J.H.CAHIAJOBCKAÑ

CHARLES DE HEKK ALAMERERALIKA OFATHO-WILDERALIKOHHUK OFROBOBAHKIA Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН Санкт-Петербургский государственный университет

л.н. синдаловский

СПРАВОЧНИК АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ



Издательство Санкт-Петербургского университета 2006

УДК 556.3 ББК 26.35 С38

Рецензенты: д-р техн. наук В.М. Шестаков (Моск. гос. ун-т),

д-р геол.-минер. наук И.С. Пашковский (АО «Геолинк»)

Печатается по постановлению Научно-технического совета Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН

Синдаловский Л.Н.

С38 Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006. – 769 с. ISBN 5-288-03868-6

В Справочнике обобщен и систематизирован мировой опыт по изучению и разработке аналитических решений для интерпретации опытных гидрогеологических опробований. Собранные в нем функциональные зависимости описывают практически все существующие типовые гидрогеологические схемы и различные технические условия проведения полевых экспериментов. Широко освещены аналитические и графоаналитические способы обработки опробований. В конце Справочника даются Приложения со специальными функциями, которые используются в приведенных аналитических зависимостях. Функции представлены в интегральном, табличном и графическом видах.

Справочник предназначен для гидрогеологов (студентов, инженеров и научных работников), занимающихся изучением, обработкой и интерпретацией данных опытно-фильтрационных опробований, для специалистов по численному моделированию фильтрационных процессов, а также может являться пособием для программистов, создающих программные комплексы для анализа опытных работ.

ББК 26.35

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-05-64231-а)

- © Л.Н. Синдаловский, 2006
- © Издательство С.-Петербургского университета, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

введ	цение	13
РАЗД	ЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	15
1.1.	Определения	15
1.2.	Типизация расчетных схем и условий	18
1.3.	Виды опробований	21
1.4.	Фильтрационные параметры	23
1.5.	Способы обработки данных опытно-фильтрационных опробований	27
	Графоаналитические способы	29
	Точечные способы	
	Подбор параметров	36
РАЗД	ЕЛ 2. ИЗОЛИРОВАННЫЙ НАПОРНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ	41
2.1.	Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса)	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровняОткачка из скважины большого диаметра	
	Откачка из скважины обльшого диаметра	
	Дуплетное опробование	
2.2.	Полуограниченный в плане водоносный пласт	
	2.2.1. Полуограниченный в плане пласт: граница I рода	59
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.2.2. Полуограниченный в плане пласт: граница II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	65
2.3.	Ограниченный в плане водоносный пласт (пласт-полоса)	68
	2.3.1. Пласт-полоса: границы I рода	71
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	76

	2.3.2. Пласт-полоса: границы II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.3.3. Пласт-полоса: границы I и II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
2.4.	U-образный водоносный пласт	89
	граница I или II рода	92
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.4.2. U-образный пласт: параллельные границы II рода, перпендикулярная	93
	граница I или II рода	07
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.4.3. U-образный пласт: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная	
	граница I или II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	103
2.5.	Угловой водоносный пласт	104
	2.5.1. Угловой водоносный пласт: границы I рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.5.2. Угловой водоносный пласт: границы II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	2.5.3. Угловой водоносный пласт: границы I и II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
2.6.	Круговой водоносный пласт	
	2.6.1. На внешнем контуре граница обеспеченного питания: граница I рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	2.6.2. Непроницаемый контур пласта: граница II рода	
	Откачка с постоянным расходом	129
2.7.	Планово-анизотропный пласт	132
2.7.	Откачка с постоянным расходом	
	-	137
2.8.	Полузакрытый пласт	141
	Откачка с постоянным расходом	142
2.9.	Плановая линейная граница ограниченной длины	142
4.7.	Откачка с постоянным расходом	
	OTRUTKE & HOCTORHHUM PROVODOM	177
РАЗЛ	[ЕЛ 3. НЕСОВЕРШЕННАЯ СКВАЖИНА: ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК В	
	НАПОРНОМ ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ	146
3.1.	Неограниченный в плане и в разрезе пласт	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	161

3.2.	Полуограниченный пласт	165
	3.2.1. Полуограниченный в плане пласт: граница І рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	169
	3.2.2. Полуограниченный в плане или в разрезе пласт: граница II рода	171
	Откачка с постоянным расходом	172
	Восстановление уровня	175
3.3.	Ограниченный пласт	
	3.3.1. Ограниченный в плане водоносный пласт: границы І рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	183
	3.3.2. Ограниченный в плане или в разрезе водоносный пласт:	
	границы II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	
	3.3.3. Ограниченный в плане водоносный пласт: границы I и II рода	
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	194
2.4	П	106
3.4.	Пласт-квадрант	
	3.4.1. Плановый пласт-квадрант: границы I рода	
	Откачка с постоянным расходом	199
	Восстановление уровня	201
	3.4.2. Плановый или профильный пласт-квадрант: границы II рода	204
	Откачка с постоянным расходом	205
	Восстановление уровня	208
	3.4.3. Плановый или профильный пласт-квадрант: границы I и II рода	
	Откачка с постоянным расходом	211
	Восстановление уровня	214
3.5.	U-образный пласт	217
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	228
3.6.	Угловой пласт	
	3.6.1. Угловой пласт неограничен в разрезе	233
	Откачка с постоянным расходом	233
	Восстановление уровня	237
	3.6.2. Угловой пласт полуограничен в разрезе	
	Откачка с постоянным расходом	241
	Восстановление уровня	244
	3.6.3. Угловой пласт ограничен в разрезе	247
	Откачка с постоянным расходом	247
PARI	ĮЕЛ 4. НЕСОВЕРШЕННАЯ СКВАЖИНА: ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК	
11104	В НАПОРНОМ ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ	250
4.1.	Неограниченный в плане и в разрезе пласт	255
	Откачка с постоянным расходом	256
	Дуплетное опробование	261

4.2.	Полуограниченный пласт для линейного источника	
	4.2.1. Полуограниченный в разрезе пласт	
	Откачка с постоянным расходом	
	4.2.2. Полуограниченный в плане пласт	
	•	
4.3.	Ограниченный пласт	
	4.3.1. Ограниченный в разрезе пласт	
	Откачка с постоянным расходом	274
	4.3.2. Ограниченный в плане водоносный пласт	
	Откачка с постоянным расходом	280
4.4.	Пласт-квадрант (плановый или профильный)	281
	Откачка с постоянным расходом	
4.5	-	
4.5.	U-образный пласт	
	Откачка с постоянным расходом	289
4.6.	Угловой пласт	293
	Откачка с постоянным расходом	295
4.7.	Наклонный линейный источник	208
7.7.	Откачка с постоянным расходом	
	откачка с постоянным расходом	
РАЗД	ЕЛ 5. ПЛАНОВО-НЕОДНОРОДНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ	300
5.1.	Линейная граница раздела: две зоны неоднородности	300
	Откачка с постоянным расходом	
5.2.	Линейная граница раздела: три зоны неоднородности	307
J.4.	Откачка с постоянным расходом	
5.3.	Круговые зоны неоднородности	
	5.3.1. Неограниченный в плане водоносный пласт	
	Откачка с постоянным расходом	
	5.3.2. Ограниченный в плане водоносный пласт	
	Откачка с постоянным расходом	
	5.3.3. Включение круговой зоны неоднородности	
	Откачка с постоянным расходом	
5.4.	Планово-неоднородные пласты, ограниченные границей обеспеченного питания	
	Откачка с постоянным расходом	321
PA3,	[ЕЛ 6. ОДНОСЛОЙНЫЙ БЕЗНАПОРНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ	323
6.1.	Совершенная скважина в безнапорном изотропном водоносном пласте	323
	Откачка с постоянным расходом	
	Нагнетание с постоянным повышением	
6.2.	Несовершенная скважина в безнапорном анизотропном водоносном пласте	
	Откачка с постоянным расходом	331
6.3.	Несовершенная скважина большого диаметра в безнапорном анизотропном	
	водоносном пласте	
	Откачка с постоянным расхолом	337

6.4.	Несовершенная скважина в полуограниченном в разрезе безнапорном	
	изотропном водоносном пласте	338
	Откачка с постоянным расходом	339
6.5.	Инфильтрационное питание и перетекание в безнапорном круговом	
	водоносном пласте	340
	Откачка с постоянным расходом	342
	Откачка с постоянным понижением	343
PA3,	ДЕЛ 7. ОТКАЧКА ОКОЛО РЕКИ	344
7.1.	Полуограниченный в плане напорный пласт: граница III рода	344
	Откачка с постоянным расходом	346
7.2.	Полуограниченный в плане безнапорный пласт: граница III рода	352
, .2.	Откачка с постоянным расходом	353
7.2		
7.3.	Неограниченный в плане безнапорный водоносный пласт пересекает река Откачка с постоянным расходом	334 356
	-	
7.4.	Скважина под рекой	
	Откачка с постоянным расходом	360
PA3	ДЕЛ 8. ДВУХСЛО ЙНЫЕ ВОДОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ	361
8.1.	Двухслойный безнапорный анизотропный комплекс	361
0.1.	Откачка с постоянным расходом	362
0.3		
8.2.	Двухслойный безнапорный изотропный комплексОткачка с постоянным расходом (без учета капиллярной каймы)	265
	Откачка с постоянным расходом (оез учета капиллярной каймы)	363 368
8.3.	Круговой двухслойный комплекс	369
	8.3.1. Круговой комплекс: два пласта с разными фильтрационными	260
	свойствамиОткачка с постоянным расходом	
	8.3.2. Круговой комплекс: два пласта с близкими фильтрационными	
	свойствами	373
	Откачка с постоянным расходом	
8.4.	-	
8.4.	Двухслойный комплекс, разделенный непроницаемым слоем	
8.5.	Двухслойный комплекс: два пласта с близкими фильтрационными свойствами	
	Откачка с постоянным расходом	387
PA3	ДЕЛ 9. ВОДОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ C ПЕРЕТЕКАНИЕМ	391
9.1.	Перетекание без учета емкости разделяющего слоя	391
	9.1.1. Перетекание из водоносных пластов с постоянным напором	
	Откачка с постоянным расходом	395
	Откачка с постоянным расходом из скважины большого диаметра	
	Отканка с постоянным понижением	401

	9.1.2.	Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором	404
		Откачка с постоянным расходом из 2-го пласта	
		Одновременная откачка из двух пластов	
9.2.	Перет	екание с учетом емкости разделяющего слоя	418
		Трехслойные системы: хорошо проницаемый слой и два	
		слабопроницаемых слоя	418
		Откачка с постоянным расходом	
	9.2.2.	Двухслойные системы: хорошо проницаемый и слабопроницаемый	
		слои	422
		Откачка с постоянным расходом	
	9.2.3.	Трехслойные системы: два хорошо проницаемых слоя разделены	
	,,_,,	слабопроницаемым слоем	426
		Откачка с постоянным расходом	
	9.2.4.	Трехслойная система с незначительным перетеканием: два хорошо	
	, . _ ,	проницаемых слоя разделены слабопроницаемым слоем	432
		Откачка с постоянным расходом	
	9.2.5.	Двухслойная система с незначительным перетеканием: хорошо	
	7.2.5.	проницаемый слой и слабопроницаемый полуограниченной	
		мощности	436
		Откачка с постоянным расходом	
9.3.	Несов	ершенная по степени вскрытия скважина в водоносном пласте с	
		сканием	439
		Несовершенная по степени вскрытия скважина в ограниченном в	
		разрезе водоносном пласте с перетеканием	440
		Откачка с постоянным расходом	
	9.3.2.	Несовершенная по степени вскрытия скважина в полуограниченном в	
		разрезе водоносном пласте с перетеканием	447
		Откачка с постоянным расходом	448
9.4.	Анизо	отропный водоносный пласт в водоносном комплексе с перетеканием	452
		Профильно-анизотропный пласт	
		Откачка с постоянным расходом	454
		Дуплетное опробование	
	9.4.2.	Планово-анизотропный пласт	458
		Откачка с постоянным расходом	
9.5.		иченные в плане водоносные комплексы с перетеканием	
		олинейные границы)	
	9.5.1.	Полуограниченные в плане водоносные комплексы с перетеканием	
		Откачка с постоянным расходом	
	9.5.2.	Пласт-полоса в водоносном комплексе с перетеканием	
		Откачка с постоянным расходом	469
	9.5.3.	Пласт-квадрант в водоносном комплексе с перетеканием	
		Откачка с постоянным расходом	
	9.5.4.	U-образный водоносный комплекс с перетеканием	
		Откачка с постоянным расходом	482
9.6.	Knyro	вой пласт с перетеканием	488
J. U .		Перетекание из водоносного пласта с постоянным напором	
	7.U.I.	A TANK TANK TIT TO DOMOTIO AT THE TOP A STANDARD TO THE TANK THE TANK TO THE TANK TH	

	9.6.1.1. Круговой пласт с перетеканием: граница I рода	491
	Откачка с постоянным расходом	491
	Откачка с постоянным понижением	494
	9.6.1.2. Круговой пласт с перетеканием: граница ІІ рода	495
	Откачка с постоянным расходом	496
	Откачка с постоянным понижением	
	9.6.2. Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором	
	9.6.2.1. Круговой пласт с перетеканием: граница І рода	502
	Откачка с постоянным расходом	502
	9.6.2.2. Круговой пласт с перетеканием: граница ІІ рода	504
	Откачка с постоянным расходом	504
РАЗД	ЕЛ 10. НАКЛОННЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ	506
10.1.	Напорный водоносный пласт переменной мощности	508
	10.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности	509
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	512
	Откачка с постоянным понижением	513
	10.1.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности:	
	граница I рода	515
	Откачка с постоянным расходом	515
	Восстановление уровня	
	10.1.3. Полуограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности:	
	граница II рода	517
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	519
10.2.		520
	10.2.1. Наклонный неограниченный в плане водоносный пласт	520
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	523
	10.2.2. Наклонный полуограниченный в плане водоносный пласт:	
	граница I рода	524
	Откачка с постоянным расходом	524
	Восстановление уровня	526
10.3.	Безнапорный наклонный водоносный пласт с перетеканием	527
	10.3.1. Наклонный неограниченный в плане водоносный пласт с перетеканием	527
	Откачка с постоянным расходом	528
	Восстановление уровня	529
	10.3.2. Наклонный полуограниченный в плане водоносный пласт	
	с перетеканием	530
	Откачка с постоянным расходом	530
РАЗД	ЕЛ 11. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ	532
111	Неограниченный в плане водоносный пласт	521
11.1.		
	Откачка с постоянным расходом	
11.2.	Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница I рода	538
	Откачка с постоянным расходом	

РАЗД	ЕЛ 12. ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТАЯ СРЕДА	544
12.1.	Трещиновато-пористый напорный водоносный пласт	544
	Откачка с постоянным расходом	54 6
12.2.	Трещиновато-пористый безнапорный водоносный пласт	550
	Откачка с постоянным расходом	
12.3.	Скважина в вертикальной трещине	553
	12.3.1. Псевдорадиальный поток к вертикальной трещине	554
	Откачка с постоянным расходом	
	12.3.2. Линейный поток к трещине	
	Откачка с постоянным расходом Восстановление уровня	
12.4	Скважина в вертикальной дайке	
12.4.	Откачка с постоянным расходом	
	-	
12.5.	Скважина в горизонтальной трещине	
	12.5.1. Безнапорный пласт	
	Откачка с постоянным расходом	
	Откачка с постоянным расходом	
	12.5.3. Напорный пласт, совершенная скважина	
	Откачка с постоянным расходом	
РАЗД	ЕЛ 13. ГРУППОВАЯ ОТКАЧКА И ПЕРЕМЕННЫЙ РАСХОД	57 7
13.1.	Ступенчатое изменение расхода	579
	Откачка с постоянным расходом	
	Восстановление уровня	583
13.2.	Функциональное изменение расхода	584
	Откачка при линейном изменении расхода	585
	Откачка при параболическом изменении расхода	
	Откачка при экспоненциальном изменении расхода	587
13.3.	Откачка с кусочно-постоянным понижением уровня в опытной скважине	588
р∆зл	ЕЛ 14. ЭКСПРЕСС-ОПРОБОВАНИЯ	590
•		570
14.1.	Цели и задачи экспресс-опробований; обзор проведенных работ в данной области	591
14.2.	Опробование в напорном пласте совершенной по степени вскрытия скважиной	
14.3.	Несовершенная по степени вскрытия скважина в напорном пласте	597
	Опробование в безнапорном пласте	
14 5	Учет профильной анизотропии при обработке экспресс-опробований	601
	Экспресс-опробования при наличии скин-эффекта	
	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
14.7.	Экспресс-опробование в скважине, пересекающей трещину	605

14.8. Колебания	з уровня при мгновенном наливе (отборе) воды из скважины	605
14.9. Радиус вли	ияния при экспресс-опробовании	608
	еская обработка экспресс-опробований на основе решений для ых опытно-фильтрационных расчетных схем	609
	щии по проведению экспресс-опробований	
приложения		611
Приложение 1.	Функция $A(u,\beta)$ для скважин с постоянным понижением	
	(самоизливающиеся скважины) в пластах без перетекания	
Приложение 2.	Функции Бесселя	
Приложение 3.	Функция $B(u, \beta_1, \beta_2)$	627
Приложение 4.	Интеграл вероятностей $\operatorname{erf}(u)$ и дополнительный интеграл	(20
Приложение 5.	вероятностей erfc u	
Приложение 5.	Функция $F(u,\beta)$ для скважин большого диаметра	
Приложение о. Приложение 7.	Функция $F(u, \rho)$ для скважин обльшого диамегра	
-		
Приложение 8.	Функция $F_f(u, \beta)$	
Приложение 9.	Функция $F_{fw}(u,\beta)$	
Приложение 10.	Функция $F_R(eta_1,eta_2)$	
Приложение 11.	Функция для экспресс-опробований $F_s(u,\beta)$	
Приложение 12.	Функция $F_{Sh}(u, oldsymbol{eta})$	
Приложение 13.	Функция $F'_{Sh}(u,eta)$	
Приложение 14.	Функция Vandenberg $F_{\mathcal{V}}(u, \beta)$	656
Приложение 15.	Функция расхода $G(u)$ для скважин с постоянным понижением	
_	(самоизливающиеся скважины) в пластах без перетекания	659
Приложение 16.	- , ,	
П 17	(самоизливающиеся скважины) в пластах с перетеканием	
=	Функция $H(u,\beta)$	
=	Функция $I(u,\beta)$	608
Приложение 19.	Модифицированная функция Бесселя 1-го рода $I_m(u)$	(71
П 20	порядков 2÷11	
	Функция $J^*(u, \beta_1, \beta_2)$	
	Функция Бесселя 1-го рода $J_m(u)$ порядков 2÷11	677
Приложение 22.	Модифицированная функция Бесселя 2-го рода $K_m(u)$	
Приномения 22	порядков 2÷11	
	Функция $L(u, \beta)$	
	Функция $M(u,\beta)$	080
приложение 25.	Функция влияния скважины $S(u,\beta)$, учитывающая емкость	601

Содержание

Приложение 26.	Функция влияния скважины $W(u)$	696
	Функция влияния скважины с учетом перетекания $\mathit{W}(\mathit{u}, \beta)$	
	Функция $W_1(u,\beta)$	
Приложение 29.	Функция $W_N(u,\beta)$	712
Приложение 30.	Функция $W_{NW}(u,\beta)$	720
Приложение 31.	Функция для скважин с постоянным понижением $Z(u, \beta_1, \beta_2)$	
	(самоизливающиеся скважины) в пластах с перетеканием	722
	Корни уравнения $\alpha_n \tan(\alpha_n) = c$	
Приложение 33.	Корни уравнений $J_0(x_n) = 0$, $J_1(x_{n,1}) = 0$	725
Приложение 34.	Корни уравнения $J_m(x_n) = 0$	727
Приложение 35.	Корни уравнения $J_0(\alpha_n)Y_0(c\alpha_n) - Y_0(\alpha_n)J_0(c\alpha_n) = 0$	728
Приложение 36.	Корни уравнения $J_1(\alpha_n)Y_0(c\alpha_n) - Y_1(\alpha_n)J_0(c\alpha_n) = 0$	730
	Корни системы уравнений	
	Функция $F_d(u,\beta)$	
Приложение 39.	Корни уравнения $J_0(\alpha_n)Y_1(c\alpha_n) - Y_0(\alpha_n)J_1(c\alpha_n) = 0$	736
	Гамма-функция Г(<i>u</i>)	
Приложение 41.	Корни уравнения $J_1(\alpha_n)Y_1(c\alpha_n) - Y_1(\alpha_n)J_1(c\alpha_n) = 0$	
	Вспомогательные функции	
Приложение 43.	СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	745
ЛИТЕРАТУРА		751
ИМЕННОЙ УКА	ЗАТЕЛЬ	763
ПРЕДМЕТНЫЙ	УКАЗАТЕЛЬ	766

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем Справочнике обобщен и систематизирован мировой опыт по изучению и разработке аналитических решений для интерпретации данных опытных гидрогеологических опробований за последние 70 лет.

Собранные в нем функциональные зависимости для понижения уровней в практически существующие охватывают пластах все гидрогеологические схемы и учитывают различные технические условия проведения полевых экспериментов. Рассмотрены одно-, двух-, трех- и многослойные водоносные комплексы в напорном, напорно-безнапорном и безнапорном режимах. Изучена плановая и профильная анизотропия водоносных пластов, плановая изменчивость фильтрационных свойств, наклон водоупора. Широко освещено влияние плановых и профильных границ различного рода и конфигурации на поведение индикаторных кривых. Рассмотрены решения для несовершенных по степени (линейный или точечный источник) и характеру вскрытия опытных скважин, решения для вертикальных и горизонтальных скважин, решения, учитывающие емкость опытной скважины. Изучены различия в понижениях уровня в наблюдательных скважинах и в пьезометрах. Решения даны как для периода откачки, так и для восстановления уровней (соответственно предложены и различные способы обработки полевых данных). Также представлены решения для различных условий на опытной скважине. Это откачка с постоянным расходом, с постоянным понижением, с произвольным изменением расхода в опытной скважине, с неограниченным количеством опытных скважин и изменяющимся расходом в каждой из них. Рассмотрены также одновременная откачка из двух смежных водоносных пластов, дуплетное опробование и экспресс-опробование.

Точные и приближенные аналитические решения приводятся как зависимости функции понижения уровня от фильтрационных параметров для нестационарной, квазистационарной, ложностационарной и стационарной фильтрации подземных вод. Для каждого решения предложен один или несколько способов обработки: графо-аналитические способы (эталонные кривые, способы прямой линии и другие), способы подбора (прямые и обратные), точечные способы, способы отношения понижений и так далее. Для некоторых решений даны алгоритмы определения параметров, предложенные различными авторами. Для большинства схем рассчитаны и приведены зависимости для построения эталонных кривых. Значительная часть предложенных способов обработки невозможна (или сильно затруднена) без использования вычислительной техники и специализированных компьютерных программ.

В конце Справочника даются Приложения со специальными функциями (как общеизвестными, так и узко специализированными), которые используются в приведенных аналитических зависимостях. Функции представлены в интегральном, табличном и графическом видах. Для большинства функций даются аппроксимационные зависимости. Функции и их аппроксимации собраны из различных источников. Практически все табличные значения функций рассчитаны заново для более широкого и дробного диапазона их аргументов и с повышенной степенью точности значений. Для ряда функций найдены собственные приближенные решения.

Отдельно проведена работа по систематизации всех условных обозначений для фильтрационных и геометрических параметров, применяемых в Справочнике. Символьные обозначения фильтрационных параметров соответствуют обозначениям, «негласно»

принятым в большинстве монографий и ведущих гидрогеологических журналов за последние 30-40 лет. К сожалению, обозначения ряда основных фильтрационных параметров не согласуются с обозначениями, принятыми в отечественной литературе. Терминология, касающаяся геолого-гидрогеологических условий, технических условий проведения эксперимента и фильтрационных параметров, главным образом взята из учебных и научных публикаций В.М. Шестакова, В.А. Мироненко, Б.В. Боревского и других ведущих отечественных специалистов [Шестаков, 1973, 1984, 1995; Мироненко, Шестаков, 1978; Мироненко, 1996; Боревский и др., 1973].

Справочник поможет специалисту: 1) провести диагностику опытного режима на предмет его соответствия той или иной расчетной схеме; 2) быстро найти гидрогеологическую схему, которая наиболее точно отвечает условиям проведения эксперимента, включая технические условия; 3) определить аналитическую зависимость, по которой наиболее вероятно должно происходить понижение или повышение уровней; 4) найти способы обработки, с помощью которых определяются фильтрационные параметры опробуемого водоносного пласта или комплекса.

Также Справочник может оказать помощь в планировании полевых экспериментов: выбрать такие технические условия опробования водоносных пластов для существующего геолого-гидрогеологического разреза, которые дадут возможность впоследствии наиболее полно проинтерпретировать полученные данные доступными аналитическими методами. Это позволит уменьшить вероятность проведения заранее неинформационных опытов.

Представленные в Справочнике аналитические решения даны без детального описания математической постановки задачи. Тем не менее, гидрогеолог, занимающийся научно-исследовательской работой, сможет найти ссылки на оригинальную, в большинстве случаев доступную литературу практически по всем решениям.

В ходе работы над Справочником был выявлен ряд опечаток и неточностей как в работах авторов тех или иных решений, так и в последующих монографиях, в которых опубликованы и используются ранее выведенные зависимости. По возможности, в Справочнике эти ошибки были исправлены.

Справочник включает: более 100 гидрогеологических схем (с учетом технических особенностей проведения эксперимента) с кратким описанием каждой из них; порядка 700 аналитических зависимостей для изменения уровней в наблюдательных и опытных скважинах; способы обработки для каждого решения; математическое описание более 40 специальных функций. Все гидрогеологические схемы и большинство графических способов обработки сопровождаются пояснительными рисунками.

Справочник является основой для разрабатываемого многофункционального программного комплекса по интерпретации данных опытно-фильтрационных опробований аналитическими и численными методами. Кроме прямых методов решения гидрогеологических задач в программном комплексе применяются алгоритмы решения обратных задач. Причем поиск фильтрационных параметров на основе фактических данных об изменениях уровня осуществляется как по аналитическим функциям, так и по результатам численного моделирования. Для решения обратных задач используются собственные разработки и оригинальный универсальный программный код (UCODE), встроенный в комплекс.

Справочник предназначен для гидрогеологов (студентов, инженеров и научных работников), занимающихся изучением, обработкой и интерпретацией данных опытнофильтрационных опробований, для специалистов по численному моделированию фильтрационных процессов, а также может являться пособием для программистов, создающих программные комплексы для анализа опытных работ.

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Определения

Анизотропный пласт (anisotropic aquifer) – пласт, свойства которого изменяются в различных направлениях [De Wiest, 1961].

Безнапорный пласт (unconfined, free, phreatic or water-table aquifer) — пласт, в котором верхней границей служит депрессионная (свободная) поверхность, на которой гидростатическое давление равно атмосферному давлению. Пласт, подстилаемый водоупором и ограниченный сверху свободной депрессионной поверхностью [Мироненко, 1996].

Водоносный комплекс (multi-layered aquifer system, leaky system) — включает в себя ряд водоносных пластов и разделяющих их слоев.

Водоносный пласт (aquifer) – слой горных пород, содержащий в пустотах или порах воду [De Wiest, 1961].

Водоупор (водоупорный пласт, непроницаемый слой, абсолютный водоупор) (aquiclude, aquifuge, impermeable bed) — слой водонепроницаемых пород, практически не пропускающих воду (хотя сами они могут быть насыщены водой). Водоупор изолирует водоносные слои, с которыми он граничит [De Wiest, 1961]. Пласт, движением и запасами воды в пределах которого при решении данной задачи можно полностью пренебречь [Мироненко, 1996]. Выдержанный по площади распространения пласт непроницаемых плотных пород, который содержит только физически связанную воду и не способен отдавать ее в данной термодинамической обстановке [Гавич, 1988].

Восстановление уровня (recovery) – изменение уровня в пласте после мгновенного уменьшения расхода опытной скважины до нуля.

Гидрогеологическая граница (geohydrologic boundary) — это поверхность, при пересечении которой гидрогеологические признаки терпят разрыв [$\Gamma aвuu$, 1988].

Градиент напора (hydraulic gradient) — изменение напора на единицу длины пути [*Мироненко*, 1996].

Граничные условия (boundary conditions) — совокупность гидрогеологических условий и процессов, происходящих на границах водоносного пласта [Биндеман, 1963]. Граничные условия характеризуют принятый для расчетов закон изменения уровней и расхода потока на его границе [Гавич, 1988].

Условие І рода (граница обеспеченного питания, граница с постоянным напором) (head distribution, recharge boundary, Dirichlet) — на границе задано значение напора; частным случаем границы І рода является граница с постоянным напором.

Условие II рода (flow distribution, barrier boundary, Neumann) — на границе задано значение расхода; частным случаем границы II рода является непроницаемая граница (расход равен нулю).

Условие III рода (полупроницаемая граница) (Cauchy) — на границе задана прямо пропорциональная связь между расходом и напором [Мироненко, 1996]. Выражает зависимость между изменением расхода потока на его границе и изменением уровня воды в самом потоке [Гавич, 1988].

Условие IV рода (interface boundary) – выражает закон неразрывности течения и представляет собой равенство расходов потока слева и справа относительно границы раздела двух сред с разными фильтрационными свойствами [Гавич, 1988].

Грунтовая вода (гравитационная вода) — это вода свободная, не подверженная действию сил притяжения к поверхности твердых частиц. Она передвигается под влиянием силы тяжести, в ней действует только гидродинамическое давление [Полубаринова-Кочина, 1977].

Емкостные свойства (elastic properties) — отражают способность горных пород к водоотдаче или водонасыщению в процессе нестационарной фильтрации [*Шестаков*, 1995]. **Изотропный пласт** (isotropic aquifer) — пласт, свойства которого в любой точке одинаковы во всех направлениях [*De Wiest*, 1961].

Инфильтрация (recharge) — просачивание воды с поверхности земли в грунт [*De Wiest*, 1961]. **Круговой пласт** (closed-circle boundary) — пласт, ограниченный круговым контуром.

Линейный источник (скважина, несовершенная по степени вскрытия) (partially penetrating well) — скважина, водоприемная часть которой охватывает только часть общей мощности пласта [Бочевер и др., 1969].

Напор гидродинамический (total head) – отображает полную энергию единицы веса движущейся жидкости [*Мироненко*, 1996].

Напор гидростатический (hydraulic or piezometric head) — показатель потенциальной энергии единицы веса жидкости, помещенной на глубину [*Мироненко*, 1996]. Характеризует уровень потенциальной энергии в данной точке потока [*Шестаков*, 1995]. Определяется уровнем воды в скважине относительно выбранной плоскости сравнения напоров [*Шестаков и др.*, 1975].

Напорно-безнапорный пласт — пласт, который на одном участке площади распространения является напорным, а на другом — безнапорным [*Гавич*, 1988].

Напорный пласт (confined, artesian, pressure or nonleaky aquifer) – пласт, верхней границей которого является контакт с водоупором, на котором гидростатическое давление больше атмосферного (пьезометрическая поверхность расположена выше этого контакта). Пласт, подстилаемый и перекрываемый абсолютными водоупорами [*Мироненко*, 1996].

Начальные условия (initial conditions) — положение пьезометрического уровня по координатам пространства в начальный момент времени, принятый за начало отсчета при изучении нестационарного процесса фильтрации [*Гавич*, 1988].

Неоднородный пласт (heterogeneous aquifer) – пласт, в котором характер, свойства или условия изотропии и анизотропии неодинаковы в разных точках [De Wiest, 1961].

Однородный пласт (homogeneous aquifer) — пласт, в котором характер, свойства, изотропные или анизотропные условия постоянны в любой точке [De Wiest, 1961].

Опытно-фильтрационное опробование (aquifer test, pumping test) – специально созданные искусственно – путем откачки (выпуска) воды из пласта или ее закачки (нагнетания, налива) – фильтрационные возмущения, изменяющие скорость и напоры в изучаемом пласте [Мироненко, 1996].

Откачка (pumping) – искусственное возмущение в гидростатике и гидродинамике водоносного пласта [*Мироненко*, *Шестаков*, 1978].

Плановая граница – граница фильтрационного потока в плане.

Пласт с перетеканием (leaky aquifer) — пласт, гидравлически связанный с соседним водоносным пластом (смежным пластом) за счет перетекания через слабопроницаемый слой [Мироненко, 1996].

Пласт-квадрант – пласт, ограниченный двумя прямолинейными перпендикулярными контурами.

Пласт-полоса – пласт, ограниченный двумя прямолинейными параллельными контурами.

Полуограниченный пласт – пласт, ограниченный одним прямолинейным контуром.

Понижение/повышение (drawdown/buildup) — изменение гидростатического давления во внутрипоровой жидкости [*Мироненко*, *Шестаков*, 1978].

Поток подземных вод (подземный поток) (groundwater flow) – движущая масса подземных вод в определенных геологических и гидравлических границах с характерной структурой баланса течения [*Шестаков*, 1984]. Пространственно-временное выражение структуры движения и баланса подземных вод в некотором объеме гидролитосферной среды в пределах принятых границ [*Гавич*, 1988].

Принцип суперпозиции (принцип сложения течений) (method of images) – в потоках с неизменной проводимостью изменение (понижение) уровней под действием откачки из системы скважин определяется как сумма понижений, вызываемых действием каждой скважины в отдельности [*Шестаков*, 1973].

Профильная граница — контакт водоносного пласта с водоупорными пластами или с поверхностью уровня грунтовых вод [*Мироненко*, 1996].

Раднус влияния (radius of investigation) – расстояние, на которое распространяется влияние данной скважины [Полубаринова-Кочина, 1977].

Разделяющий слой (aquitard, semipervious layer) — это слабопроницаемый слой, разделяющий два водоносных пласта и находящийся с ними в тесной гидравлической связи [Гавич, 1988].

Расход потока (rate of flow) – величина, пропорциональная площади поперечного сечения потока и градиенту напора по направлению движения [*Шестаков*, 1973].

Расход скважины (well discharge, discharge rate) – объем жидкости, извлекаемый из скважины (или закачиваемый в скважину) в единицу времени.

Режим подземных **вод** (режим потока) — характеризует изменение элементов потока во времени [*Шестаков*, 1995].

Квазистационарный режим (quasi-steady-state) — изменения уровней потока во всех точках происходят с одинаковой интенсивностью, так что расходы потока остаются неизменными [Шестаков, 1995].

Пожностационарный режим (pseudo-steady-state flow) — состояние кажущейся стабилизации напоров внутри потока [Шестаков, 1973].

Нестационарный режим (unsteady-state flow) – характеристики потока меняются во времени. Стационарный режим (steady-state flow) – характеристики потока неизменны во времени [Мироненко, 1996].

Скорость фильтрации (скорость движения подземных вод) (velocity of the flow, Darcy velocity) — расход жидкости, т.е. объем жидкости, протекающий в единицу времени через единицу площади, выделенную в пористой среде [Полубаринова-Кочина, 1977]. Отношение расхода потока к площади его поперечного сечения.

Слабопроницаемый слой (относительный водоупор) (aquitard, semipervious layer) — слой горных пород, очень медленно пропускающий воду по сравнению с водоносными пластами [De Wiest, 1961].

Точечный источник (point source) – простейшая модель скважины, представляющая собой сферическую скважину бесконечно малого радиуса [*Шестаков*, 1973].

Угловой пласт (wedge-shaped aquifer) – пласт, ограниченный двумя прямолинейными пересекающимися контурами.

Фиктивная скважина (отраженная скважина) (image well) – представляет собой зеркальное отображение (симметрично относительно границы) действующей скважины [Шестаков, 1973].

Фильтр (well screen) – водоприемная часть скважины.

Фильтрация (flow) – движение жидкости в насыщенной ею пористой среде, обусловленное наличием гидравлического градиента (перепада напоров) [*Мироненко*, 1996].

U-образный пласт (пласт-полуполоса) (U-shaped aquifer) — пласт-полоса, полуограниченный прямолинейным контуром.

1.2. Типизация расчетных схем и условий

Применение аналитических зависимостей для решения практических задач фильтрации подземных вод требует упрощения реальных природных условий до расчетных схем. Это вызвано, с одной стороны, сложностью геологического разреза и плановой неоднородностью участка, на котором проводится полевой эксперимент, неполными знаниями о геологии изучаемого объекта и невозможностью описать все это упрощенными аналитическими решениями, а, с другой стороны, незначительным влиянием ряда параметров геологической среды на конечный результат исследований.

Режим подземных вод при опытно-фильтрационных опробованиях зависит от двух совокупностей факторов: 1) от геологических и гидрогеологических условий на участке опробования и 2) от технических условий проведения опыта. Далее отдельно для каждого фактора дается типизация по тем или иным признакам, которые рассматриваются в данном Справочнике и для которых приведены аналитические зависимости и предложены способы интерпретации опытно-фильтрационных опробований. Представленная типизация отражает структуру настоящего Справочника.

1. Типизация по геологическим и гидрогеологическим признакам

Изучение и анализ геологических и гидрогеологических условий позволяет выявить основные закономерности фильтрации, схематизировать их и представить в виде типовых расчетных схем. Геологические условия определяются в основном количеством слоев водоносного комплекса, наличием плановых или профильных границ фильтрационного потока, степенью анизотропии и изменчивостью фильтрационного процесса во времени.

- 1.1. По профильной структуре фильтрующего комплекса или по количеству слоев, входящих в водоносный комплекс:
 - 1.1.1. однослойный пласт:
 - 1.1.2. двухслойный комплекс:
 - 1.1.2.1. значительное различие между фильтрационными параметрами двух слоев,
 - 1.1.2.2. близкие по значению фильтрационные параметры двух слоев;
 - 1.1.3. слоистый комплекс (чередование хорошо и слабопроницаемых слоев):
 - 1.1.3.1. трехслойный:
 - два водоносных пласта разделены слабопроницаемым слоем,
 - водоносный пласт перекрывает и подстилает слабопроницаемые слои;
 - 1.1.3.2. многослойный.
- 1.2. По режиму подземных вод:
 - 1.2.1. напорный режим;
 - 1.2.2. безнапорный режим;
 - 1.2.3. напорно-безнапорный режим.
- 1.3. По характеру емкостных свойств:
 - 1.3.1. гомогенный пласт;
 - 1.3.2. гетерогенный (трещиновато-пористый) пласт.

1.4. По степени фильтрационной анизотропии:

- 1.4.1. изотропный пласт;
- 1.4.2. анизотропный пласт:
 - 1.4.2.1. профильно-анизотропный пласт,
 - 1.4.2.2. планово-анизотропный пласт.

1.5. По наличию границ фильтрационного потока:

- 1.5.1. по расположению границ относительно водоносного пласта:
 - 1.5.1.1. плановые границы,
 - 1.5.1.2. профильные границы,
 - 1.5.1.3. плановые и профильные границы одновременно;
- 1.5.2. по количеству границ:
 - 1.5.2.1. неограниченный пласт (в плане, в разрезе или в плане и в разрезе одновременно),
 - 1.5.2.2. полуограниченный пласт одна граница (в плане или в разрезе).
 - 1.5.2.3. ограниченный пласт:
 - прямолинейные границы:
 - границы параллельны друг другу (в плане или в разрезе),
 - границы находятся под углом друг к другу (только в плане, при этом пласт может быть неограничен, полуограничен или ограничен в разрезе),
 - пласт-квадрант (полуограниченный в плане и в разрезе),
 - U-образный пласт (в плане или в разрезе),
 - круговая граница;
- 1.5.3. по условиям области фильтрации на границах:
 - 1.5.3.1. первый род (постоянный напор на границе),
 - 1.5.3.2. второй род (частный случай поток равен нулю),
 - 1.5.3.3. комбинация граничных условий первого и второго рода,
 - 1.5.3.4. третий род (река),
 - 1.5.3.5. четвертый род планово-неоднородный пласт:
 - линейная граница раздела,
 - круговая граница раздела;
- 1.5.4. по протяженности границы:
 - 1.5.4.1. неограниченная граница,
 - 1.5.4.2. граница ограниченной длины.

1.6. По наличию дополнительного фильтрационного питания:

- 1.6.1. водоносные комплексы без дополнительного питания (гидравлически изолированные пласты);
- 1.6.2. дополнительное питание за счет перетекания;
- 1.6.3. дополнительное питание за счет инфильтрации;
- 1.6.4. дополнительное питание за счет притока из внешних областей со стороны границы.

1.7. По взаимодействию с соседними пластами:

- 1.7.1. наличие перетекания из смежного пласта:
 - 1.7.1.1. с учетом емкости разделяющего слоя,
 - 1.7.1.2. без учета емкости разделяющего слоя;
- 1.7.2. отсутствие перетекания из смежного пласта (кровля и подошва пласта непроницаемые).
- 1.8. По наличию и количеству смежных и разделяющих слоев:
 - 1.8.1. отсутствие смежных и разделяющих слоев (кровля и подошва пласта непроницаемые);
 - 1.8.2. смежный и разделяющий слои находятся только в кровле или только в подошве основного слоя (перетекание осуществляется через один разделяющий слой);

- 1.8.3. смежные и разделяющие слои находятся в кровле и в подошве основного слоя (перетекание осуществляется через верхний и нижний разделяющие слои).
- 1.9. По наклону водоупора:
 - 1.9.1. горизонтальное залегание водоупора;
 - 1.9.2. наклонный водоупор:
 - 1.9.2.1. линейное изменение наклона водоупора (мощность водоносного пласта не меняется в пространстве).
 - 1.9.2.2. экспоненциальное изменение наклона водоупора (и, следовательно, экспоненциальное изменение мощности пласта).
- 1.10. По изменчивости напоров во времени до начала опробования рассматриваются режимы естественного потока:
 - 1.10.1. нестационарный режим;
 - 1.10.2. стационарный режим:
 - 1.10.2.1. равный начальный напор в смежных пластах,
 - 1.10.2.2. различный начальный напор в смежных пластах.
- 1.11. По изменчивости фильтрационного процесса во времени в процессе опробования:
 - 1.11.1. нестационарный режим;
 - 1.11.2. квазистационарный режим;
 - 1.11.3. ложностационарный режим;
 - 1.11.4. стационарный режим.
- 1.12. По изменению уровня в смежном пласте в процессе опробования:
 - 1.12.1. уровень в смежном пласте не меняется в процессе опробования;
 - 1.12.2. уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования.
- 1.13. По изменчивости фильтрационных параметров в процессе опробования:
 - 1.13.1. постоянство фильтрационных параметров;
 - 1.13.2. изменчивость емкостных параметров (только для безнапорных пластов).
- 2. Типизация по техническим признакам

Технические факторы в меньшей степени влияют на режим подземных вод при опытных опробованиях, чем геологические или гидрогеологические факторы, но от них во многом будут зависеть структура фильтрационного потока, выбор фильтрационной схемы и качество последующей обработки результатов эксперимента. К основным техническим факторам можно отнести совершенство скважины по степени вскрытия, ее пространственное положение и режим откачки во времени.

- 2.1. По степени вскрытия водоносного пласта опытной скважиной:
 - 2.1.1. совершенная скважина:
 - 2.1.2. несовершенная скважина:
 - 2.1.2.1. линейный источник.
 - 2.1.2.2. точечный источник.
- 2.2. По характеру вскрытия водоносного пласта опытной скважиной:
 - 2.2.1. совершенная скважина;
 - 2.2.2. несовершенная скважина.
- 2.3. По пространственному положению опытной скважины:
 - 2.3.1. вертикальная скважина;
 - 2.3.2. горизонтальная скважина;
 - 2.3.3. наклонная скважина.
- 2.4. По характеру возмущения:
 - 2.4.1. откачка (нагнетание);
 - 2.4.2. восстановление:

- 2.4.3. откачка (нагнетание) с последующим восстановлением уровня;
- 2.4.4. дуплет;
- 2.4.5. экспресс-опробование (мгновенный налив или отбор воды из скважины).
- 2.5. По способу наблюдения за изменением уровня:
 - 2.5.1. наблюдательная скважина:
 - 2.5.1.1. совершенная скважина по степени вскрытия,
 - 2.5.1.2. несовершенная скважина по степени вскрытия;
 - 2.5.2. пьезометр:
 - 2.5.2.1. находится между кровлей и подошвой водоносного пласта,
 - 2.5.2.2. находится на кровле водоносного пласта.
- 2.6. По количеству опытных скважин:
 - 2.6.1. одна опытная скважина;
 - 2.6.2. две и более опытных скважин:
 - 2.6.2.1. находятся в одном водоносном пласте,
 - 2.6.2.2. находятся в смежных пластах.
- 2.7. По режиму откачки во времени:
 - 2.7.1. постоянный дебит;
 - 2.7.2. переменный дебит:
 - 2.7.2.1. ступенчатое изменение дебита,
 - 2.7.2.2. функциональное изменение дебита;
 - 2.7.3. постоянное понижение:
 - 2.7.4. кусочно-постоянное понижение.
- 2.8. По синхронности работы опытных скважин:
 - 2.8.1. синхронная работа (одновременное включение и выключение опытных скважин);
 - 2.8.2. асинхронная работа (разновременное включение и выключение опытных скважин).
- 2.9. По влиянию емкости опытной скважины.
- 2.10. По количеству наблюдательных скважин и по их расположению в водоносном пласте (с точки зрения возможности использовать дополнительные методы обработки).
- 2.11. По расположению наблюдательных скважин в водоносном комплексе:
 - 2.11.1. в основном пласте:
 - 2.11.2. в смежном пласте;
 - 2.11.3. в разделяющем слабопроницаемом слое;
 - 2.11.4. в нескольких пластах одновременно.

1.3. Виды опробований

В Справочнике рассмотрено несколько видов опробований водоносных пластов, для которых даны аналитические зависимости и приводятся способы возможной интерпретации опытно-фильтрационных опробований.

Откачка с постоянным расходом — извлечение воды из опытной скважины с постоянным расходом в течение всего опробования. Рассматриваются понижения уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытной скважине и в наблюдательных скважинах.

Групповая откачка с постоянным расходом — извлечение воды из нескольких опытных скважин с постоянными расходами в течение всего опробования. Расходы в каждой скважине могут совпадать или быть различными. Рассматриваются понижения уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытных и наблюдательных скважинах.

Нагнетание с постоянным расходом – нагнетание воды в опытную скважину с постоянным расходом в течение всего опробования. Рассматриваются повышения уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытной скважине и в наблюдательных скважинах. В данной работе (за исключением некоторых случаев: нагнетание в безнапорный пласт, дуплетное опробование) откачка и нагнетание предполагаются симметричным действием и, следовательно, обработку нагнетания жидкости в водоносный пласт можно осуществлять аналогично обработке откачки жидкости с заменой понижения уровня на повышение уровня.

Групповое нагнетание с постоянным расходом — нагнетание воды в несколько опытных скважин с постоянными расходами в течение всего опробования. Расходы в каждой скважине могут совпадать или быть различными. Рассматриваются повышения уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытной скважине и в наблюдательных скважинах.

Восстановление уровня после откачки (нагнетания) с постоянным расходом – слежение за восстановлением уровня после остановки откачки (нагнетания) с постоянным расходом в опытной скважине и в наблюдательных скважинах.

Восстановление уровня после групповой откачки (нагнетания) с постоянным расходом — слежение за восстановлением уровня после остановки групповой откачки (нагнетания) с постоянным расходом в опытной и наблюдательной скважинах.

Откачка (нагнетание) с переменным расходом — извлечение воды из опытной скважины (или нагнетание воды в опытную скважину) с расходом, изменяющимся ступенчато или по функциональному закону. Рассматриваются понижения (повышения) уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытной скважине и в наблюдательных скважинах, а также изменение расхода в опытной скважине.

Групповая откачка (нагнетание) с переменным расходом — извлечение воды из нескольких опытных скважин (или нагнетание воды в несколько опытных скважин) с расходами, изменяющимися ступенчато или по функциональным законам. Рассматриваются понижения (повышения) уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения, в опытных и наблюдательных скважинах, а также изменения расходов в опытных скважинах.

Восстановление уровня после откачки (нагнетания) с переменным расходом – слежение за восстановлением уровня после остановки откачки (нагнетания) с переменным расходом в опытной и наблюдательной скважинах.

Восстановление уровня после групповой откачки (нагнетания) с переменным расходом — слежение за восстановлением уровня после остановки откачки (нагнетания) с переменным расходом в опытных и наблюдательных скважинах.

Откачка с постоянным понижением уровня— извлечение воды из опытной скважины с таким расходом, при котором уровень воды в опытной скважине не меняется в процессе опробования. Рассматривается изменение расхода воды в опытной скважине и понижение уровня воды в наблюдательных скважинах.

Групповая откачка с постоянным понижением уровня — извлечение воды из нескольких опытных скважин с таким расходом, при котором уровень воды в опытных скважинах не меняется в процессе опробования. Рассматриваются изменения расходов воды в опытных скважинах и понижение уровня воды в наблюдательных скважинах.

Откачка с кусочно-постоянным понижением уровня — извлечение воды из опытной скважины с таким расходом, при котором уровень воды в опытной скважине остается постоянным в течение определенного интервала времени и скачкообразно меняется в процессе опробования. Рассматривается изменение расхода воды в опытной скважине и понижение уровня воды в наблюдательных скважинах.

Групповая откачка с кусочно-постоянным понижением уровня — извлечение воды из нескольких опытных скважин с такими расходами, при которых уровни воды в опытных скважинах остаются постоянными в течение определенного интервала времени и скачкообразно меняются в процессе опробования. В каждой опытной скважине уровни могут меняться различно. Рассматриваются изменения расходов воды в опытных скважинах и понижение уровня воды в наблюдательных скважинах.

Откачка из смежных водоносных пластов — одновременная откачка из двух смежных водоносных пластов с одинаковыми или разными постоянными расходами. Рассматриваются понижения уровня воды, отсчитанные от начального (статического) положения уровня в каждом пласте, в опытных скважинах и в наблюдательных скважинах, расположенных в обоих пластах.

Дуплетное опробование — извлечение воды из одной опытной скважины с постоянным расходом и нагнетание воды в другую опытную скважину с таким же расходом (или извлечение воды из верхней части фильтра и нагнетание воды в нижнюю часть фильтра; отдельные части фильтра разделены пакерами). Рассматривается изменение уровня воды, отсчитанное от начального (статического) положения, в опытной скважине и в наблюдательных скважинах.

Экспресс-опробование — мгновенный налив или отбор воды из опытной скважины с последующим слежением за изменением уровня воды в опытной скважине или в прискважинной зоне.

1.4. Фильтрационные параметры

Одна из главных задач проведения опытно-фильтрационных опробований — это определение фильтрационных параметров водоносных пластов и комплексов на основе данных об изменении уровня подземных вод.

Основные фильтрационные параметры, их обозначения, размерности и краткие определения приводятся ниже. Терминология и определения взяты из учебных и научных публикаций В.М. Шестакова, В.А. Мироненко и Б.В. Боревского [Шестаков, 1973, 1984, 1995; Мироненко, Шестаков, 1978; Мироненко, 1996; Боревский и др., 1973]. Английские названия соответствуют общепринятым терминам, встречающимся в англоязычных научных публикациях [Hantush, 1964c; De Wiest, 1965; Walton, 1970; International..., 1974; Kruseman, Ridder, 1994].

Коэффициент фильтрации (hydraulic conductivity), k, м/сут:

коэффициент фильтрации по оси X, k_x ;

коэффициент фильтрации по оси Y, k_y ;

коэффициент фильтрации по горизонтали, k_r ;

коэффициент фильтрации по вертикали, k_{\star} .

Скорость фильтрации при единичном градиенте напора; зависит от геометрии порового пространства и от гидродинамических свойств жидкости: плотности и вязкости [Шестаков, 1973]. Характеризует способность данного грунта пропускать ту или иную жидкость [Мироненко, 1996].

Коэффициент фильтрации определяется равенством

$$k = \frac{k_0 \rho g}{\mu},\tag{1.4.1}$$

где k_0 – проницаемость (свойство пористой среды пропускать через себя жидкость под воздействием приложенного перепада давлений [Пыхачев, Исаев, 1973]; не зависит от свойств фильтрующей жидкости и определяется геометрией порово-трещинного пространства [Гавич, 1988]), м²; ρ – плотность жидкости, м³/сут; g – ускорение свободного падения, м/сек²; μ – динамическая вязкость жидкости, кг·м/сек².

Коэффициент фильтрации является коэффициентом пропорциональности между скоростью фильтрации и градиентом напора. Это соотношение выражается законом Дарси [Darcy, 1856]

$$v = -k \frac{\Delta H}{L} \,, \tag{1.4.2}$$

 ν – скорость фильтрации, м/сут; ΔH – изменение напора, м; L – длина пути фильтрации, м. Если выразить скорость фильтрации через отношение расхода потока к площади его поперечного сечения

$$v = \frac{Q}{w}, \tag{1.4.3}$$

то закон Дарси запишется в виде

$$Q = -kw\frac{\Delta H}{L},\tag{1.4.4}$$

где Q – расход потока, м³/сут; w – площадь поперечного сечения, м².

Проводимость (transmissivity, transmissibility), T, T = km, $M^2/\text{сут}$:

проводимость по оси X, T_x , $T_x = k_x m$;

проводимость по оси Y, T_v , $T_v = k_v m$.

Расход жидкости через единицу поперечного сечения водоносного пласта мощностью *т* при единичном напорном градиенте [*Боревский и др.*, 1973].

Для многослойного пласта, состоящего из п слоев, проводимость:

$$T = \sum_{i=1}^{n} k_i m_i , \qquad (1.4.5)$$

их

где n — количество слоев; k_i — коэффициент фильтрации i-го слоя, м/сут; m_i — мощность i-го слоя, м.

Пьезопроводность (hydraulic diffusivity), a, $a = T/S = k/S_s$, $M^2/\text{сут}$:

пьезопроводность по вертикали, a_z , $a_z = k_z/S_s$;

пьезопроводность по горизонтали, a_r , $a_r = k_r/S_s$.

Показатель скорости изменения напора (гидростатического давления) в пласте [Мироненко, 1996].

Уровнепроводность, a, $a = k\overline{m}/S_v$, $M^2/\text{сут}$.

Отражает скорость распространения возмущений в безнапорных пластах [Mироненко, 1996]; \overline{m} — средняя мощность безнапорного пласта, м.

Водоотдача, упругая водоотдача, упругая емкость пласта (storage coefficient, storativity), S, $S = S_s m$, безразмерный.

Характеризует изменение водонасыщенности горных пород, обусловленное

деформациями, возникающими при изменении напряженного состояния пласта вследствие действия гидродинамических факторов (изменение напора, водоотбора и т.п.) [Шестаков, 1973]. Для многослойного пласта, состоящего из *n* слоев, водоотдача

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_{si} m_i , \qquad (1.4.6)$$

n – количество слоев; S_{ei} – водоотдача i-го слоя; m_i – мощность i-го слоя, м.

Удельная водоотдача, упругая емкость породы (specific storage), S_s , 1/м.

Изменение объема воды, отнесенное к объему породы, при единичном изменении напора [*Шестаков*, 1973]. Удельная водоотдача определяется равенством:

$$S_s = \gamma_0 \left\lceil \frac{n}{E} + (1 - n)a_c \right\rceil, \tag{1.4.7}$$

 γ_0 — объемная масса жидкости, H/M^2 ; n — пористость; a_c — коэффициент сжимаемости породы (показатель интенсивности уменьшения объема пор по мере нагружения [Мироненко, 1996]), $1/\Pi$ а; $E = \frac{1}{\beta_w} \approx 2.2 \cdot 10^9$ Π а — объемный модуль Юнга (модуль

упругости воды), Π а; β_w – коэффициент сжимаемости воды или объемного сжатия воды (относительное изменение плотности воды при единичном изменении давления [*Шестаков*, 1995]), $1/\Pi$ а.

Гравитационная водоотда**ча**, *гравитационная емкость* (specific yield), S_y , безразмерный. Отношение изменения объема воды в гравитационной зоне потока к изменению объема этой зоны [*Шестаков*, 1973].

Параметр перетекания (leakage factor), B, м:

водоносного пласта;

 $B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}$ — при наличии одного питающего слоя, когда вода поступает только через слабопроницаемый слой, находящийся в кровле, или только через слой, находящийся в подошве

 $B = \sqrt{\frac{Tm'm''}{k'm' + k''m''}}$ — при наличии двух питающих слоев, когда вода поступает через слабо-

проницаемые слои, находящиеся в кровле и подошве водоносного пласта,

где T — проводимость водоносного пласта, м²/сут; k', k'' — коэффициенты фильтрации слабопроницаемых слоев, м/сут; m', m'' — мощности слабопроницаемых слоев, м.

Комплексный параметр, который зависит от проводимости основного водоносного пласта, коэффициента фильтрации и мощности разделяющих слабопроницаемых слоев [Боревский u dp., 1973]. Чем меньше величина B, тем интенсивнее, при прочих равных условиях, идет перетекание.

Коэффициент профильной анизотропии, χ , $\chi = \sqrt{k_z/k_r}$, безразмерный.

Корень из отношения коэффициента фильтрации по вертикали (k_z) к коэффициенту фильтрации по горизонтали (k_z) .

Коэффициент плановой анизотропии, χ_{XY} , $\chi = \sqrt{k_y/k_x}$, безразмерный.

Корень из отношения коэффициента фильтрации по оси $Y(k_y)$ к коэффициенту фильтрации по оси $X(k_y)$.

Сопротивление русла реки, ΔL , м.

Обобщенный гидрогеологический параметр ложа водоема, характеризующий его фильтрационное сопротивление; зависит от строения ложа водоема (его геометрии и фильтрационной неоднородности) [Шестаков, 1995].

1.5. Способы обработки данных опытно-фильтрационных опробований

Поиск фильтрационных параметров при обработке данных опытно-фильтрационных опробований осуществляется различными способами. Их можно подразделить на четыре основные группы:

- графоаналитические способы основаны на преобразовании исходных аналитических зависимостей и на использовании индикаторных кривых; они являются наиболее информативными и удобными способами;
- 2) *точечные способы* малоинформативные способы, основаны на использовании одного или двух замеров для определения фильтрационных параметров; полезны при наличии стационарных аналитических решений, а также для быстрой и приближенной оценки свойств опробуемого пласта;
- 3) подбор параметров (способ совмещения кривых прослеживания) решение прямой или обратной задачи для поиска необходимых фильтрационных параметров с последующим визуальным сравнением фактической и расчетной кривых; способ появился в результате развития вычислительной техники и требует точного решения специальных функций; он незаменим при решении задач, основанных на сложных аналитических зависимостях;
- авторские алгоритмы определения параметров определенная последовательность действий (обычно основанная на сочетании графических и точечных способов) для получения искомых параметров, предложенная различными исследователями.

Каждая расчетная гидрогеологическая схема требует своей методики интерпретации опытно-фильтрационных опробований и определенной последовательности в выборе способов обработки для наиболее оптимального и быстрого нахождения искомых параметров. Выбор способа во многом зависит от обрабатываемого временного участка индикаторной кривой — нестационарный, квазистационарный или стационарный режим соответствует выбранному участку. Так, квазистационарный режим позволяет использовать графоаналитические способы, стационарный — графоаналитические способы для площадного прослеживания или точечные способы, а нестационарный — способы подбора или эталонные кривые.

Длительность проведенной откачки в сложных водоносных комплексах может определять выбор расчетной схемы. Начальные временные участки индикаторных кривых разумнее (а иногда это единственно возможный вариант) обрабатывать по упрощенным схемам (например, ограниченные в разрезе или в плане пласты — по аналогичным схемам в неограниченных условиях, слоистые системы — по схемам с меньшим количеством слоев). При достаточной длительности опробований также возможна обработка по упрощенным

схемам с использованием приведенных коэффициентов. Это касается слоистых систем, где, используя приведенную пьезопроводность, проводят обработку по схеме однослойного пласта.

Далее приводится краткая схематизация тех способов обработки опытных данных, которые вошли в данный Справочник.

1.5.1. Схематизация способов обработки

1. Графоаналитические способы

- 1.1. Способ прямой линии:
- 1.1.1. временное прослеживание (зависимость понижения от времени, характерный график $s \lg t$);
- 1.1.2. площадное прослеживание (зависимость понижения от расстояния, характерный график $s \lg r$);
- 1.1.3. комбинированное прослеживание (зависимость понижения от времени и расстояния, характерный график $s \lg \frac{t}{r^2}$).
- 1.1.4. по набору точечных замеров (зависимость разности понижений в двух или более скважинах от расстояния или от времени и расстояния; используется при наличии редких замеров в нескольких наблюдательных скважинах, характерный график $(s_1 s_2) \lg \frac{r_2}{r_1}$ или $(s_1 s_2) \lg \frac{t_1 r_2^2}{t_1 r_2^2}$);
- 1.1.5. нестандартные графики

(основаны на приведении сложных аналитических зависимостей к прямой линии, координатные оси могут содержать некоторые фильтрационные параметры, их применение возможно только с использованием вычислительной техники; примеры

графиков для схемы с перетеканием (см. раздел 9.1):
$$s^{(1)} - \lg \left\{ \exp \left[2K_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) \right] / r^2 \right\}$$
, $\left(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 \right) - \lg t \right)$.

- 1.2. Способ эталонной кривой:
- 1.2.1. по сдвигу координатных осей графиков эталонной кривой и фактических данных (совмещение эталонной кривой с фактической осуществляется на графиках
 - временного прослеживания: $\lg s \lg t$,
 - комбинированного прослеживания: $\lg s \lg \frac{t}{r^2}$,
 - площадного прослеживания: $\lg s \lg r$);
- 1.2.2. по координатам произвольной точки на совмещенных графиках (аналогично совмещению кривых эталонного и фактического графиков; отличие состоит в том, что параметры определяются по любой точке на совмещенных графиках (см. рис. 1.1, б), которой соответствуют четыре значения на координатных осях двух графиков);

1.2.3. по набору эталонных кривых, отвечающих искомому параметру

(способ обычно применяется для сложных аналитических зависимостей, когда эталонные кривые рассчитываются заранее по специальным методикам; суть способа в следующем: строится ряд эталонных кривых, каждой из которых соответствует тот или иной фильтрационный параметр; на этом же графике в тех же координатах строится фактическая кривая; совпадение двух кривых (эталонной и фактической) укажет на искомый параметр).

1.3. Способ биссектрисы

(графически определяется соответствие фактических и расчетных значений при правильно подобранном фильтрационном параметре; для этого используется график отношения фактических понижений от отношения расчетных понижений).

1.4. Точечные графические способы

(используются определенные точки на графиках фактических понижений, которые характеризуют те или иные физические процессы и которые, в свою очередь, имеют математическое описание; это позволяет определить по ним требуемые параметры):

- по характерным точкам на графике,
- по касательной.

2. Точечные аналитические способы

- 2.1. Прямой расчет
- 2.1.1. по максимальному понижению на период стационара;
- 2.1.2. способ отношения понижений:
 - по одной скважине на разные моменты времени,
 - по двум скважинам на разные моменты времени,
 - по двум скважинам на один момент времени;
- 2.1.3. способ разности понижений:
 - по одной скважине на разные моменты времени,
 - по двум скважинам на разные моменты времени,
 - по двум скважинам на один момент времени;
- 2.1.4. способ характерных точек.
- 2.2. Подбор параметра:
 - по отношению понижений,
 - по разности понижений.
- 3. Подбор параметров
- 3.1. Ручной подбор (решение прямой задачи):
- 3.1.1. по понижению в одной или нескольких скважинах:
 - на графике временного прослеживания,
 - на графике площадного прослеживания,
 - на графике комбинированного прослеживания;
- 3.1.2. по отношению понижений на графике временного прослеживания (такой подбор позволяет избавиться от ряда параметров проницаемости, расхода):
 - по двум скважинам на период откачки,
 - по одной скважине на период откачки и восстановления;
- 3.1.3. на графике временного прослеживания расхода (для откачек с постоянным понижением).
- 3.2. Автоматический подбор (решение обратной задачи):
 - метод наименьших квадратов,
 - использование специализированных программ.

4. Авторские алгоритмы определения параметров

(как правило, дается для сложных расчетных схем; каждый приведенный алгоритм подробно описан в соответствующих разделах).

1.5.2. Примеры использования отдельных способов обработки

Для каждой расчетной гидрогеологической схемы кратко приводятся возможные способы обработки данных опытно-фильтрационных опробований и графики, на которых рекомендуется их проводить. В данном разделе подробно рассмотрены способы обработки на примере схемы однородного напорного пласта (см. раздел 2.1).

Графоаналитические способы

Большинство функций, описывающих фильтрационный процесс, при некоторых значениях времени — обычно это соответствует началу квазистационарного режима — упрощается до простых линейных уравнений. При этом их точность остается достаточно высокой. Данный подход позволяет получить осредненные результаты по одной или нескольким наблюдательным скважинам по выбранному временному интервалу опробования. Такие способы применяются к тем расчетным схемам, аналитические решения для которых наиболее разработаны в настоящее время. Это самый удобный способ определения фильтрационных параметров, так как позволяет быстро находить заранее неизвестные параметры пласта.

Пример определения фильтрационных параметров по способу эталонной кривой

1. По сдвигу осей графиков эталонной кривой и фактических понижений

Способ эталонной кривой основан на логарифмировании исходной аналитической зависимости и на логарифмировании аргумента специальной функции, входящей в эту зависимость.

Рассмотрим систему уравнений:

$$\begin{cases} s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \\ u = \frac{r^2}{4at} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s = \lg \frac{Q}{4\pi T} + \lg W(u) \\ \lg \frac{1}{u} = \lg \frac{t}{r^2} - \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{t} + \lg \frac{Q}{t} + \lg \frac{Q}{t} \\ \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} - \lg \frac{Q}{t} + \lg \frac{Q}{t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg \frac{Q}{t} + \frac{Q}{t} + \lg \frac{Q}{t} + \frac{Q}{t} + \lg \frac{Q}{t} + \frac{Q}{t} +$$

где

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

 $D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$ — расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

 $E = \lg(4at)$ — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

s – понижение в наблюдательной скважине, м:

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функции;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26).

Из системы уравнений (1.5.1) видно, что график фактической кривой удобно строить в координатах $\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$, а график эталонной кривой — в координатах $\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$. При этом оси ординат графиков фактической и эталонной кривых будут сдвинуты на величину D, а оси абсцисс — на величину E (рис. 1.1, a). График фактической кривой является графиком комбинированного прослеживания. Для расчетных схем, в которых не учитывается влияние границ, индикаторные кривые по разным наблюдательным скважинам должны совпадать.

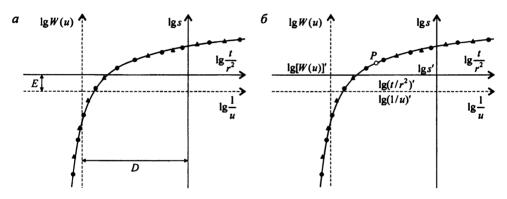


Рис. 1.1. Определение параметров по способу эталонной кривой.

а – по сдвигу координатных осей графиков эталонной и фактической кривых; б – по координатам точки на совмещенных графиках. Сплошная линия – эталонная кривая, треугольники и кружки – фактические замеры для двух наблюдательных скважин.

По-разному представляя второе уравнение системы (1.5.1), получаем различные возможности использования способа эталонной кривой.

Для графика временного прослеживания фактических данных второе уравнение системы (1.5.1) можно записать в виде

$$u = \frac{r^2}{4at} \Rightarrow \lg \frac{1}{u} = \lg t - \lg \frac{4a}{r^2} \Rightarrow \lg t - \lg \frac{1}{u} = \lg \frac{4a}{r^2} \Rightarrow \lg t - \lg \frac{1}{u} = E, \qquad (1.5.2)$$

где $E = \lg(4a/r^2)$, и соответственно график фактической кривой $\lg s - \lg t$, а график эталонной кривой $\lg W(u) - \lg(1/u)$.

А для графика площадного прослеживания фактических данных второе уравнение системы (1.5.1) следующее:

$$u = \frac{r^2}{4at} \Rightarrow \lg \sqrt{u} = \lg r - \lg \sqrt{4at} \Rightarrow \lg r - \lg \sqrt{u} = \lg \sqrt{4at} \Rightarrow \lg r - \lg \sqrt{u} = E, \quad (1.5.3)$$

где $E=\lg\sqrt{4at}$, и соответственно график фактической кривой $\lg s - \lg r$, а график эталонной кривой $\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$.

В этих двух примерах (равенства (1.5.2) и (1.5.3)) величина $D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$.

Все возможные комбинации построения графиков эталонных и фактических кривых и формулы для определения фильтрационных параметров сведены в табл. 1.5.1.

	Таблица 1.5.1
Таблица для построения графиков эталонных и фактических криг	вых

Способ обработки	График фактической кривой	График эталонной кривой	Сдвиг осей ординат	Сдвиг осей абсцисс
Комбинированное прослеживание	$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$		$E = \lg(4at)$
Временное прослеживание	$\lg s - \lg t$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$	$E = \lg \frac{4a}{r^2}$
Площадное прослеживание	$\lg s - \lg r$	$\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$		$E = \lg \sqrt{4at}$

2. По координатам произвольной точки на совмещенных графиках

Для определения параметров по точке, лежащей на совмещенных кривых фактического и эталонного графиков (рис. 1.1, δ), необходимо снять с двух графиков координаты, соответствующие точке $P: \lg s', \lg[W(u)]', \lg(t/r^2)', \lg(1/u)'$. Затем подставить их в систему уравнений и найти проводимость и пьезопроводность:

$$\begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} \Rightarrow \begin{cases} \lg s' - \lg[W(u)]' = \lg \frac{Q}{4\pi T} \\ \lg \frac{t}{r^2} - \lg \frac{1}{u} = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s' - \lg[W(u)]' = \lg \frac{Q}{4\pi T} \Rightarrow \begin{cases} \lg T = \lg \frac{Q}{4\pi} - \lg s' + \lg[W(u)]' \\ \lg \left(\frac{t}{r^2}\right)' - \lg\left(\frac{1}{u}\right)' = \lg(4at) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg a = \lg\left(\frac{t}{r^2}\right)' - \lg\left(\frac{1}{u}\right)' - \lg(4t). \end{cases}$$

. Результаты определения параметров по сдвигу графиков и по точке на совмещенных кривых должны совпадать.

3. По набору эталонных кривых

Фактические данные и эталонные кривые наносят на один график (рис. 1.2) в одном масштабе. Параметры наиболее подходящей эталонной кривой отвечают параметрам водоносного пласта, в so котором проводился эксперимент.

На рис. 1.2 показан пример обработки данных экспресс-опробования (см. раздел 14). Фактические замеры наносят на график нормализованного напора $\frac{s}{s^0}$ от аргумента специальной

функции, который определяется как $\frac{Tt}{r^2}$. Так как ось абсцисс включает заранее неизвестный параметр (проводимость T),

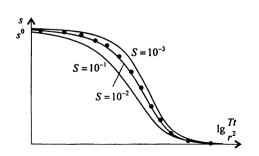


Рис. 1.2. Определение параметров по набору эталонных кривых.

Точками показаны фактические замеры, сплошными линиями – эталонные кривые.

то график строится с предполагаемым значением проводимости. Затем наносят несколько эталонных кривых. Если фактические замеры не совмещаются ни с одной эталонной кривой, то необходимо перестроить график фактических данных с новой предполагаемой проводимостью. И так до наилучшего совпадения. Каждой эталонной кривой соответствует своя водоотдача водоносного пласта S. Следовательно, добившись наилучшего результата, получаем два важных фильтрационных параметра — проводимость и водоотдачу.

Пример получения фильтрационных параметров по способу прямой линии

Способы прямой линии основаны на преобразовании исходных аналитических зависимостей к уравнениям прямой линии.

Таблица 1.5.2

Определение параметров по способу прямой линии		
Временное	Площадное	Комбинированное
прослеживание (рис. 1.3, а)	прослеживание (рис. $1.3, 6$)	прослеживание (рис. 1.3, в)
График		
$s-\lg t$	$s - \lg r$	$s-\lg\frac{t}{r^2}$
Форма уравнения (1.5.4)		
$s = \frac{0.183Q}{T} \left(\lg t + \lg \frac{2.25a}{r^2} \right)$	$s = \frac{0.366Q}{T} \left(-\lg r + \lg \sqrt{2.25at} \right)$	$s = \frac{0.183Q}{T} \left(\lg \frac{t}{r^2} + \lg(2.25a) \right)$
Линейная зависимость		
$s = C \lg t + A$	$s = -C\lg r + A$	$s = C \lg \frac{t}{r^2} + A$
Угол наклона (на графике)		
$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	$C = \frac{s_1 - s_2}{\lg r_2 - \lg r_1}$	$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg(t/r^2)_2 - \lg(t/r^2)_1}$
Угол наклона (по аналитической зависимости)		
$C = \frac{Q}{4\pi T} \ln 10 \approx \frac{0.183Q}{T}$	$C = \frac{Q}{2\pi T} \ln 10 \approx \frac{0.366Q}{T}$	$C = \frac{Q}{4\pi T} \ln 10 \approx \frac{0.183Q}{T}$
Величина на оси ординат (на графике): А – снимается с графика		
Величина на оси ординат (по аналитической зависимости)		
$A = C\lg \frac{4a}{e^{\gamma}r^2} \approx C\lg \frac{2.25a}{r^2}$	$A = \frac{C}{2} \lg \frac{4a}{e^{\gamma}} \approx \frac{C}{2} \lg (2.25a)$	$A = C \lg \frac{4a}{e^{r}} \approx C \lg (2.25a)$
Расчет проводимости, м ² /сут		
$T = \frac{0.183Q}{C}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$
Расчет пьезопроводности, м ² /сут		
$a = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Примечание. C – угол наклона прямой; A – величина, которую отсекает прямая на оси ординат; $\gamma = 0.5772156649$ – постоянная Эйлера.

Логарифмическая аппроксимация уравнения Тейса (2.1.1) с учетом перехода к десятичному логарифму дает следующую зависимость для понижения уровня:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2} \,. \tag{1.5.4}$$

Представляя уравнения (1.5.4) в различных формах (2.1.5) — (2.1.7), получим три способа определения фильтрационных параметров с помощью прямой линии. По углу наклона прямой линии и по величине, которую она отсекает на оси ординат, определяют проводимость пласта T и пьезопроводность пласта a.

Определение параметров по способу прямой линии в зависимости от вида прослеживания сведены в табл. 1.5.2.

Вместо угла наклона C также используется величина, которую отсекает прямая линия на оси абсцисс (A_x). В этом случае в табл. 1.5.2 при определении фильтрационных параметров необходимо сделать замену: $C = \frac{A}{A_x}$.

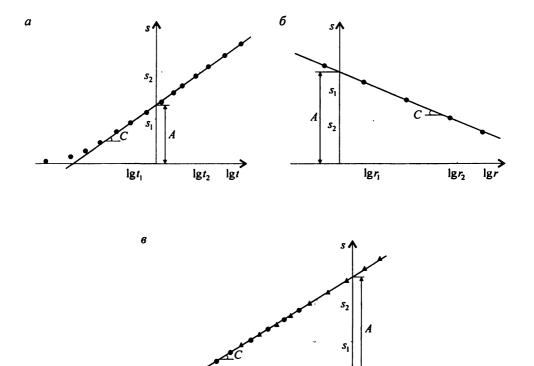


Рис. 1.3. Определение параметров по способу прямой линии на графиках временного (a), площадного (б) и комбинированного (в) прослеживания.

Треугольниками и кружками показаны фактические замеры.

Пример получения фильтрационных параметров по способу биссектрисы

При наличии данных об изменении уровня в двух скважинах получаем систему уравнений для понижений в первой (s_1) и второй (s_2) наблюдательных скважинах:

$$\begin{cases} s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r_1^2}{4at}\right) \\ s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W \left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W \left(\frac{r_2^2}{4at}\right)} \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W(u_1)}{W(u_2)}, \tag{1.5.5}$$

гле

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 $r_1,\,r_2$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до опытной скважины, м; $u_1,\,u_2$ — аргументы функции для первой и второй наблюдательных скважин.

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы на графике $\frac{s_1}{s_2} - \frac{W(u_1)}{W(u_2)}$. График наблюдаемых значений в этих координатах представляет собой

прямую линию, проходящую через начало координат под углом 45° (рис. 1.4). Это утверждение истинно при правильно подобранном значении пьезопроводности.

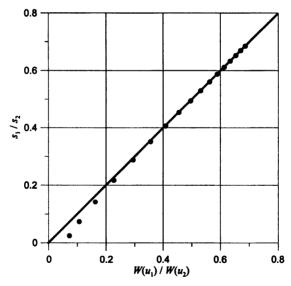


Рис. 1.4. Пример определения параметров по способу биссектрисы. Точками показаны фактические замеры.

Способ биссектрисы является графическим аналогом точечного способа получения параметров по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах. Его использование возможно только с применением специализированных компьютерных программ.

При наличии одной наблюдательной скважины и данных об изменении уровня в ней на период откачки и период восстановления вместо системы уравнений (1.5.5) можно записать следующую систему:

$$\begin{cases}
s_0 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r}{4at_0}\right) \\
s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r}{4at_r}\right) \right] \Rightarrow \frac{s_0}{s} = \frac{W\left(\frac{r}{4at_0}\right)}{W\left(\frac{r}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r}{4at_r}\right)}, \quad (1.5.6)
\end{cases}$$

где

 $s_0\,$ –понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 t_0 – длительность откачки, сут;

 t_r — время от начала восстановления, сут.

В последнем случае график необходимо строить в координатах $\frac{s_0}{s} - \frac{W(u)}{W'(u)}$, где W'(u) – выражение в квадратных скобках второго уравнения системы (1.5.6); u – аргументы функции.

Точечные способы

Примеры получения фильтрационных параметров

Прямой расчет

Определение параметров по единичному замеру осуществляется, как правило, по таким функциональным зависимостям, в которых можно выразить какой-либо параметр через понижение. Например, понижение в наблюдательной скважине на период стационара в круговом пласте радиуса R определяется по следующей зависимости:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \,. \tag{1.5.7}$$

Отсюда получаем значение проводимости пласта по понижению на период стационара:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{-}} \ln \frac{R}{r}.$$
 (1.5.8)

Способы разности и отношения понижений

Для определения фильтрационных параметров по двум замерам в одной или двух наблюдательных скважинах применяются два способа — способ разности понижений и способ отношения понижений. Оба способа позволяют сократить количество определяемых параметров. Если по одному из этих способов явно нельзя определить искомый параметр, то его поиск осуществляется подбором.

По разности понижений в двух наблюдательных скважинах:

$$\begin{cases} s_{1} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at_{1}}{r_{1}^{2}} \\ s_{2} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at_{2}}{r_{2}^{2}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_{1} - s_{2} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_{1}r_{2}^{2}}{t_{2}r_{1}^{2}} \rightarrow t_{1} \neq t_{2}; r_{1} \neq r_{2} \\ s_{1} - s_{2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_{2}}{r_{1}} \rightarrow t_{1} = t_{2}; r_{1} \neq r_{2} \\ s_{1} - s_{2} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_{1}}{t_{2}} \rightarrow t_{1} \neq t_{2}; r_{1} = r_{2}, \end{cases}$$

$$(1.5.9)$$

где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму замеру или к первой и второй наблюдательной скважине.

Здесь, как видно из правой части системы уравнений (1.5.9), возможны три варианта определения параметров: 1) по замерам в двух скважинах на разные моменты времени, 2) по замерам в двух скважинах на один момент времени, 3) по замерам в одной скважине на разные моменты времени. Данный способ позволяет явно определить проводимость при наличии двух понижений, отвечающих периоду квазистационарного режима:

$$T = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1 r_2^2}{t_2 r_1^2} \\ \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \\ \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1}{t_2} \end{cases}$$
(1.5.10)

По отношению понижений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_1}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at_2}\right)} = \frac{\ln\frac{2.25at_1}{r_1^2}}{\ln\frac{2.25at_2}{r_2^2}}.$$
 (1.5.11)

Данный способ позволяет подбором определить пьезопроводность при наличии двух понижений. Так же, как и в способе разности понижений, здесь возможны три варианта определения параметров: 1) по замерам в двух скважинах на разные моменты времени, 2) по замерам в двух скважинах на один момент времени, 3) по замерам в одной скважине на разные моменты времени. Отличие состоит в том, что в данном способе нельзя исключить временную или площадную составляющую. Способ удобен тем, что он работает на любом временном интервале. Для правой части уравнения (1.5.11) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

При наличии одной наблюдательной скважины и данных об изменении уровня в ней на период откачки и восстановления вместо (1.5.11) записывается уравнение

$$\frac{s_0}{s} = \frac{W\left(\frac{r}{4at_0}\right)}{W\left(\frac{r}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r}{4at_r}\right)} = \frac{\ln\frac{2.25at_0}{r}}{\ln\frac{t_0 + t_r}{t_r}}.$$
 (1.5.12)

Подбор параметров

Способ «ручного» подбора параметров на графиках временного, площадного или комбинированного прослеживания применяется для всех рассматриваемых расчетных схем. Данный способ, который появился в результате развития вычислительной техники, решает прямую фильтрационную задачу и позволяет подбирать искомые коэффициенты путем визуального сравнения графика фактических понижений с теоретической кривой (рис. 1.5), рассчитанной по соответствующей зависимости, для заданных технических величин

опробования (расход, расстояние эксплуатационной скважины, время и др.) и предполагаемых фильтрационных параметров. Способ подбора возможность быстро наглялно проводить анализ чувствительности выбранной схемы различным фильтрационным техническим И параметрам, также сравнивать результаты. полученные ПО разным подбор расчетным схемам. «Ручной» способом становится незаменимым обработки опытно-фильтрационных опробований при сложной аналитической зависимости расчетной схемы или при

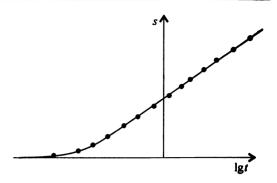


Рис. 1.5. Определение параметров способом подбора. Сплошная линия – расчетная кривая; точки – фактические замеры.

обработке групповой откачки с переменным расходом, где не существует приемлемого графоаналитического способа. При такой обработке надо иметь в виду, что в ряде фильтрационных схем, где подбор осуществляется более чем по двум параметрам, возможна неоднозначность найденных коэффициентов. В первую очередь это относится к схемам с профильной анизотропией. Особенностью «ручного» подбора для схем, использующих принцип суперпозиции (полуограниченные, ограниченные пласты или групповые откачки), является то, что на графиках площадного прослеживания трудно оценивать понижение в произвольной точке опробуемого пласта, так как понижение зависит не только от расстояния до опытной скважины, но и от расстояния до границы фильтрационного потока. Поэтому подбор может осуществляться по точкам, в которых расположены наблюдательные скважины.

Подбор параметров позволяет осуществлять прогноз изменения уровня во времени в данной точке (на графике временного прослеживания) или в пространстве на любой момент времени (на графике площадного прослеживания). Это особенно актуально при вероятных изменениях в производительности опытных скважин, когда нет простых аналитических решений для быстрой оценки влияния опытного возмущения. Подбор параметров на графике комбинированного прослеживания, когда на один график наложены индикаторные кривые по нескольким наблюдательным скважинам, дает возможность оценить степень неоднородности или анизотропию опробуемого участка.

Способ отношения понижений является разновидностью «ручного» подбора и применяется, если при опробовании ведется наблюдение по нескольким скважинам. На графике временного прослеживания строится график отношения понижений по двум выбранным наблюдательным скважинам. Подбор параметров осуществляется аналогично способу, «ручного» подбора. Преимущество этого способа перед предыдущим в том, что при откачке с одной опытной скважиной и постоянным расходом исходное уравнение преобразуется к уравнению с одним неизвестным (обычно пьезопроводность) и из подбора исключается ряд величин (расход, проводимость), а подбор ведется по одному параметру (для некоторых схем по двум):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)}.$$
 (1.5.13)

График $\frac{s_1}{s_2} - \lg t$ удобнее строить для наблюдательных скважин, находящихся на

расстояниях $r_1 < r_2$, т.е. за величину s_1 принимать понижения в ближней к опытной скважине точке наблюдения.

Способ отношения понижений в данном виде является некоторым аналогом точечных способов, которые широко использовались ранее, с той разницей, что исследователь получает осредненные параметры по всему выбранному временному интервалу, а не по одному или двум замерам.

Способ «автоматического» подбора параметров осуществляется по выбранным экспериментальным данным одной или нескольких наблюдательных скважин минимизацией отклонения этих данных от аналитической зависимости (решение обратной задачи). Для подбора используются метод наименьших квадратов или специализированные компьютерные программы (например, UCODE [Poeter, Hill, 1998]) применительно к исходным аналитическим зависимостям.

Процедура применения данного способа для метода наименьших квадратов (на примере схемы неограниченного напорного пласта (см. раздел 2.1, схему Тейса)) выглядит следующим образом.

Пусть понижение s_i в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии r от опытной скважины, в определенный момент времени t_i определяется по уравнению Тейса (см. раздел 2.1):

$$s_i = c_k W \left(\frac{r^2}{4at_i} \right), \tag{1.5.14}$$

где $c_k = \frac{Q}{4\pi T}$ — постоянная величина, которая зависит от расхода опытной скважины Q и проводимости водоносного пласта T .

Рассмотрим сумму квадратов погрешностей фактических замеров и расчетных значений при некоторых неизвестных параметрах a и c_k , которые подлежат определению:

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} \left[s_i - c_k W \left(\frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 = f(a, c_k), \qquad (1.5.15)$$

n - количество фактических замеров, которые участвуют в решении обратной задачи.

Задача сводится к нахождению таких значений параметров a и c_k , при которых погрешность имеет минимум. Продифференцировав функцию $f(a,c_k)$ по каждому неизвестному параметру и приравняв частные производные к нулю, получим линейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными a и c_k :

$$\begin{cases}
\frac{\partial f}{\partial a} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[s_i - c_k W \left(\frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 \right\}' = 0 \\
\frac{\partial f}{\partial c_k} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[s_i - c_k W \left(\frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 \right\}' = 0.
\end{cases} (1.5.16)$$

Далее найдем производные:

$$\begin{cases}
\frac{\partial f}{\partial a} = 2\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[s_{i} - c_{k} W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right] \left(-c_{k} \right) \frac{\partial W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right)}{\partial a} \right\} = 0 \\
\frac{\partial f}{\partial c_{k}} = 2\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[s_{i} - c_{k} W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right] \left[-W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right] \right\} = 0
\end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases}
\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[s_{i} - c_{k} W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right] \frac{1}{a} \exp \left(-\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right\} = 0 \\
\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[s_{i} - c_{k} W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right] W \left(\frac{r^{2}}{4at_{i}} \right) \right\} = 0.
\end{cases}$$
(1.5.17)

Окончательно система уравнений для определения необходимых фильтрационных параметров выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n} \left[s_{i} \frac{1}{a} \exp\left(-\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right] - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[s_{i} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right]}{\sum_{i=1}^{n} \left[W\left(\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right]^{2}} \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[s_{i} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right] \frac{1}{a} \exp\left(-\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right\} = 0$$

$$c_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[s_{i} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right]}{\sum_{i=1}^{n} \left[W\left(\frac{r^{2}}{4at_{i}}\right) \right]^{2}}, \tag{1.5.18}$$

где пьезопроводность a находится из первого уравнения системы (1.5.18), например «методом вилки» или итерационно, а параметр c_k (и, следовательно, проводимость пласта T) вычисляется прямым расчетом из второго уравнения системы (1.5.18). Подбор пьезопроводности осуществляется с любой заданной точностью.

Общую запись системы уравнений для произвольной схемы с любым количеством опытных и наблюдательных скважин и с произвольным изменением расхода (здесь рассматривается скачкообразное изменение) в каждой опытной скважине можно представить в таком виде:

$$\begin{cases}
\frac{\partial f}{\partial a} = \begin{cases}
\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_0} \left(s_i^m \Delta Q \frac{\partial F(a)}{\partial a} \right) - \\
-c_k \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[\sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_0} \left[\Delta Q F(a) \right] \right] \left[\sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_0} \left(\Delta Q \frac{\partial F(a)}{\partial a} \right) \right] \right\} = 0 \\
\frac{\partial f}{\partial c_k} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_0} \left[s_i^m \Delta Q F(a) \right] - c_k \sum_{i=1}^{n} \left\{ \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_0} \left[\Delta Q F(a) \right] \right\}^2 = 0,
\end{cases} (1.5.19)$$

где

F(a) – функция, описывающая гидрогеологическую схему;

 s_i^m — значение фактического замера в наблюдательной скважине, м;

 ΔQ – изменение расхода, м³/сут;

 c_k — постоянная величина, которая зависит от выбранной схемы (как правило, в нее входит проводимость или коэффициент фильтрации пласта);

N – количество опытных скважин;

M — количество фиктивных скважин для ограниченных и полуограниченных пластов, для неограниченных пластов M=0;

 N_0 – количество наблюдательных скважин, по которым ведется подбор;

n — количество фактических замеров, по которым ведется подбор (в каждой наблюдательной скважине может быть разное):

i = 1,2,3,...,n - номер замера;

j = 1, 2, 3, ..., N + M — номер опытной скважины (реальной и фиктивной);

 $m = 1,2,3,...,N_0$ – номер наблюдательной скважины.

Как и для системы уравнений (1.5.18), решение первого уравнения системы (1.5.19) основано на приближенном вычислении корня. Из него находят пьезопроводность опробуемого пласта с любой заданной точностью. Полученное значение подставляют во второе уравнение системы (1.5.19), откуда прямым расчетом определяют проводимость или коэффициент фильтрации:

$$c_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_{0}} \left[s_{i}^{m} \Delta Q F(a) \right]}{\sum_{i=1}^{n} \left\{ \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^{N_{0}} \left[\Delta Q F(a) \right] \right\}^{2}}.$$
 (1.5.20)

Перед началом процедуры «автоматического» подбора желательно исключить из расчета заведомо некондиционные по каким-либо причинам (технические факторы или ошибки исследователя) замеры. В противном случае конечные результаты могут быть сильно искажены. Рекомендуется по подобранным параметрам построить расчетную кривую на графике временного, площадного или комбинированного прослеживания и визуально сравнить фактические и теоретические данные.

РАЗДЕЛ 2. ИЗОЛИРОВАННЫЙ НАПОРНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ

Кровля и подошва однослойного водоносного пласта перекрыты абсолютными (полностью непроницаемыми) водоупорами. Уровень подземных вод не опускается ниже кровли пласта. Водоносный пласт имеет постоянную мощность. Опытная и наблюдательная скважины совершенны по степени вскрытия.

2.1. Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса)

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, неограниченный в плане;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- режим снижения уровней: два периода нестационарный и квазистационарный;
- типовая схема: рис. 2.1.

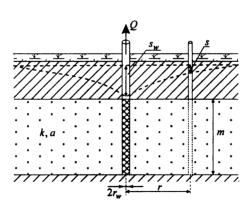


Рис. 2.1. Типовая схема неограниченного напорного пласта (разрез).

<u>Литература:</u> Dupuit, 1863; Thiem, 1906; Meinzer, Fishel, 1934; Theis, 1935; Jacob, 1940, 1946a, 1950; Wenzel, 1942; Cooper, Jacob, 1946; Jacob, Lohman, 1952; Chow Ven Te, 1952; Jaeger, 1959; Скабалланович, 1960; Jacob, 1963b; Warren, 1963; Hantush, 1964c; Карслоу, Егер, 1964; De Wiest, 1965; Papadopulos, Cooper, 1967; Бочевер, 1968; Sternberg, 1969; Lohman, 1972; Шестаков, 1973; Боревский и др., 1973; Саѕе et al., 1974; Опытно-фильтрационные работы, 1974; Fenske, 1977; Мироненко, Шестаков, 1978; Мироненко, 1996.

Условные обозначения:

- А величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);
- $A(u, \beta)$ специальная функция (Приложение 1);
- a пьезопроводность водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;
- С угол наклона прямой (для способа прямой линии);
- D расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;
- Е расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;
- $F_{I}(u, \beta_{1}, \beta_{2})$ специальная функция: определяется уравнением (2.1.36);
- $F(u, \beta)$ специальная функция (Приложение 6);
- G(u) специальная функция (Приложение 15);
- $J_0(u)$ функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $J_1(u)$ функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- $K_0(eta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $K_1(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- L расстояние между опытными скважинами при дуплетном опробовании, м;
- $L_p\,$ расстояние от наблюдательной скважины до линии нулевого понижения (см. рис. 2.5), м;
- L_{w} расстояние от опытной скважины до линии нулевого понижения (см. рис. 2.5), м;
- Q расход опытной скважины (переменная величина при откачке с постоянным понижением), м³/сут;
- Q_1, Q_2 расходы опытной скважины на два момента времени при откачке с постоянным понижением, м³/сут;
- $R = 1.5\sqrt{at}$ радиус влияния, м;
- r расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;
- r_1 , r_2 расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин или расстояния от наблюдательной скважины до первой и второй опытных скважин при дуплетном опробовании, м;
- r_c радиус обсадной трубы, м;
- r_w радиус опытной скважины, м;
- S водоотдача водоносного пласта;
- S' водоотдача водоносного пласта при восстановлении уровня;
- $S(u, \beta)$ специальная функция (Приложение 25);
- s понижение в наблюдательной скважине, м;
- $s_0\,$ –понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;
- s_1, s_2 понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени (рис. 2.2), м;
- $s_{\it m}$ понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;
- $s_{\it mw}$ понижение в опытной скважине на период стационара, м;
- $s_r = s_0 s$ восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;
- $s_{r,1}, s_{r,2}$ восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

- s_w понижение в опытной скважине (постоянная величина при откачке с постоянным понижением), м;
- $s_{w,1}, s_{w,2}$ понижения в опытной скважине на разные моменты времени, м;
- T проводимость водоносного пласта, м²/сут;
- t время от начала откачки, сут;
- t_0 длительность откачки, сут;
- t_1, t_2 время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;
- t_r время от начала восстановления, сут;
- t_{r1}, t_{r2} время двух замеров от начала восстановления (для точечных способов обработки), сут;
- $t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r}$ приведенное время для периода восстановления уровней, сут;
- t_1', t_2' приведенное время t' двух замеров для времен t_{r1} и t_{r2} (для точечных способов обработки), сут;
- \hat{t} время наступления максимальной скорости снижения уровня, сут;
- u аргумент функций;
- W(u) функция влияния скважины (Приложение 26);
- $Y_0(\beta)$ функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $Y_1(\beta)$ функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- β , β_1 , β_2 аргументы функций.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.1.1);
- понижение с учетом изменения расхода в начальное время: уравнение (2.1.2);
- точное решение с учетом емкости опытной скважины: уравнение (2.1.3);
- понижение для квазистационарного периода: уравнение (2.1.4);
- три формы записи уравнения квазистационарного периода: уравнения (2.1.5), (2.1.6),
 (2.1.7);
- альтернативные формы уравнений нестационарной фильтрации: уравнения (2.1.8) (2.1.10);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.1.21) и (2.1.26);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнения (2.1.22) и (2.1.27);
- понижение в наблюдательной скважине при откачке из скважины большого диаметра для нестационарного периода: уравнение (2.1.35);
- понижение в опытной скважине большого диаметра для нестационарного периода: уравнения (2.1.37) – (2.1.39);
- понижение для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (2.1.40) – (2.1.42);
- расход для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнение (2.1.43);
- расход для нестационарного периода (частные решения) при откачке с постоянным понижением: уравнения (2.1.44) – (2.1.46);
- стационарное понижение (повышение) в опытной и наблюдательной скважинах при дуплетном опробовании: уравнения (2.1.48) и (2.1.49).

Откачка с постоянным расходом

& Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Тейса (основное уравнение для понижения в наблюдательной скважине) [Карслоу, Егер, 1964; Theis, 1935]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4at}\right). \tag{2.1.1}$$

Решение (2.1.1) получено для бесконечно малого диаметра скважины (без учета ее емкости) и с этой точки зрения является приближенным. В начальные моменты расход опытной скважины является переменным.

2. Решение с учетом изменения расхода в опытной скважине в начальные моменты времени:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \exp\left(-\frac{r_w^2}{4at}\right) W\left(\frac{r^2}{4at}\right). \tag{2.1.2}$$

3. Точное решение с учетом емкости опытной скважины [*Карслоу*, *Егер*, 1964; *Theis*, 1935; *Бочевер*, 1968]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} S\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}\right). \tag{2.1.3}$$

Уравнение для квазистационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине [Карслоу, Егер, 1964; Jacob, 1946; Cooper, Jacob, 1946]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2}.$$
 (2.1.4)

Время наступления квазистационарного периода $t > 2.5r^2/a$.

Формы записи уравнения (2.1.4) для временного, площадного и комбинированного прослеживания понижения уровня следующие:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \left[\lg t + \lg \frac{2.25a}{r^2} \right], \tag{2.1.5}$$

$$s = \frac{0.366Q}{T} \left[-\lg r + \lg \sqrt{2.25at} \right], \tag{2.1.6}$$

$$s = \frac{0.183Q}{T} \left[\lg \frac{t}{r^2} + \lg(2.25a) \right]. \tag{2.1.7}$$

Альтернативные формы уравнений нестационарной фильтрации [Sternberg, 1969]:

аналог уравнения (2.1.1):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2at}}\right)}{\sqrt{\frac{r_w^2}{2at}} K_1 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2at}}\right)};$$
 (2.1.8)

— для времени $t > 50 \frac{r_w^2}{a}$ (или для неравенства $\frac{r_w^2}{2at} < 0.01$) уравнение (2.1.8) записывается в виде

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2at}} \right); \tag{2.1.9}$$

– для времени $t > 50 \frac{r^2}{a}$ (или для неравенства $\frac{r^2}{2at} < 0.01$) уравнение (2.1.9) имеет вид

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.52at}{r^2}; \tag{2.1.10}$$

уравнение (2.1.10) является аналогом уравнения (2.1.4).

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.1.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2} \ (1)$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{-}$		$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t \ (2)$	$\frac{\operatorname{lg} n(u) - \operatorname{lg} - u}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$
$\lg s - \lg r \ (3)$	$\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$		$a = \frac{10^{-2E}}{4t}$

Примечание. (1) — индикаторные графики ложатся на одну кривую; (2) — определение параметров производится отдельно для каждой наблюдательной скважины; (3) — определение параметров производится по нескольким наблюдательным скважинам на один момент времени [Warren, 1963].

Способ прямой линии

Для обработки по способу прямой линии (способ Jacob) используются понижения, отвечающие квазистационарному периоду [Cooper, Jacob, 1946].

 Таблица 2.1.2

 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s - \lg r$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s - \lg \frac{t}{r^2}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ прямой линии по разности выборочных понижений

Используя точечные решения и произвольно комбинируя разность понижений в различных скважинах на один момент времени или на разные моменты времени, получаем прямую линию, по которой определяется проводимость водоносного пласта.

Таблица 2.1.3 Расчетные формулы для определения параметров по выборочным понижениям

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$(s_1-s_2)-\lg(r_2/r_1)$	$T = \frac{0.366Q}{C}$
Комбинированное прослеживание	$(s_1 - s_2) - \lg(t_1 r_2^2 / t_2 r_1^2)$	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)}.$$
 (2.1.11)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

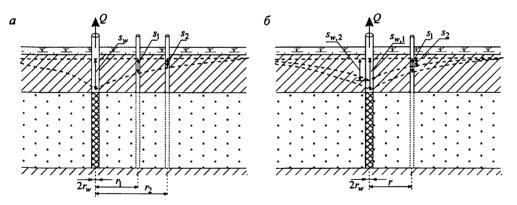


Рис. 2.2. Примеры расположения скважин. a – две наблюдательные скважины; δ – одна наблюдательная скважина (показана депрессионная воронка на два момента времени).

Точечные способы

1. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода):

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_1 r_2^2}{t_2 r_1^2}.$$
 (2.1.12)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.1.12) тремя различными способами:

- по замерам в двух скважинах на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1 r_2^2}{t_2 r^2};$$
 (2.1.13)

- по замерам в двух скважинах на один момент времени (формула Тима [Thiem, 1906]):

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$
 (2.1.14)

или по опытной скважине и наблюдательной скважине (формула Дюпюи [Dupuit, 1863]):

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_w - s)} \ln \frac{r}{r_w};$$
 (2.1.15)

по замерам в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1}{t_2}$$
 (2.1.16)

или для опытной скважины:

$$T = \frac{Q}{4\pi (s_{w,1} - s_{w,2})} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (2.1.17)

2. При отсутствии наблюдательных скважин и наличии понижений только в одной опытной скважине для определения проводимости используется величина радиуса влияния ($R \approx 1.5\sqrt{at}$):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{w}} \ln \frac{R}{r_{w}}.$$
 (2.1.18)

Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности) [Jaeger, 1959]:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_1}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at_2}\right)} = \frac{\lg\frac{2.25at_1}{r_1^2}}{\lg\frac{2.25at_2}{r_2^2}}.$$
 (2.1.19)

Для правой части уравнения (2.1.19) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

4. Способ характерных точек: по времени наступления максимальной скорости снижения уровня $\hat{\imath}$:

$$a = r^2 / 0.4\hat{t} . {(2.1.20)}$$

Подбор параметров

Таблица 2.1.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.1.1, 2.1.2, 2.1.3	T, a	$s-\lg t$
2.1.11	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)} \right) - W \left(\frac{r^2}{4at_r} \right) \right]. \tag{2.1.21}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.1.22)

Замечание

Для учета различия в параметрах водоотдачи водоносного пласта при откачке и восстановлении уровня используется следующее уравнение для изменения уровня на период квазистационарного режима [Jacob, 1963b]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} - \ln \frac{S}{S'} \right), \qquad (2.1.22a)$$

где S' – водоотдача водоносного пласта при восстановлении уровня.

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

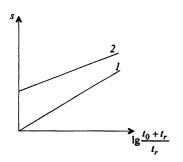


Рис. 2.3. График восстановления уровня при правильном (1) и неправильном (2) задании статического уровня.

Способ прямой линии (для обработки данных используются понижения уровня квазистационарного периода)

Прямая линия должна пересекать начало координат (рис. 2.3), если водоотдачи водоносного при понижении и при восстановлении уровня не меняется $(\frac{S}{S'} = 1)$ (см. табл. 2.1.5). Прямая

отклоняться координат в результате ошибочного замера статического уровня [Шестаков, 1973].

Расчетные формулы для определения параметров

Таблица 2.1.5

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Отношение водоотдачи
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$\frac{S}{S'} = 10^{A/C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}\right)}.$$
(2.1.23)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по единичному замеру восстановления уровня для периода квазистационарного режима на основе уравнения (2.1.22):

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{s} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.1.24)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_{r1})}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4at_{r1}}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_{r2})}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at_{r2}}\right)}.$$
(2.1.25)

Подбор параметров

Таблица 2.1.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения Подбираемые параметры График			
2.1.21	T, a	$s - \lg t_r$	
2.1.23	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$	

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at_0} \right) - W \left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)} \right) + W \left(\frac{r^2}{4at_r} \right) \right]. \tag{2.1.26}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{r^2},$$
 (2.1.27)

$$t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r} \,. \tag{2.1.28}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.1.7

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s_r - \lg t'$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s_r - \lg r$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t')}$
Комбинированное прослеживание	$s_r - \lg \frac{t'}{r^2}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}\right)}.$$
(2.1.29)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода):

$$s_{r,1} - s_{r,2} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_1' r_2^2}{t_2' r_1^2}.$$
 (2.1.30)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.1.30) тремя различными способами:

- по замерам в двух скважинах на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_{r,1} - s_{r,2})} \ln \frac{t_1' r_2^2}{t_2' r_1^2},$$
 (2.1.31)

по замерам в двух скважинах на один момент времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_{r,1} - s_{r,2})} \ln \frac{r_2}{r_1},$$
 (2.1.32)

по замерам в одной скважине на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_{r_1} - s_{r_2})} \ln \frac{t_1'}{t_2'}.$$
 (2.1.33)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_{r1})}\right) + W\left(\frac{r_1^2}{4at_{r1}}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_{r2})}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_{r2}}\right)} = \frac{\lg \frac{2.25at_1'}{r_1^2}}{\lg \frac{2.25at_2'}{r_2^2}}.$$
 (2.1.34)

Для правой части уравнения (2.1.34) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

Подбор параметров

Таблица 2.1.8

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.1.26	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.1.29	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

Откачка из скважины большого диаметра

Схема проведения опыта:

- общие условия для неограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.1);
- учитывается разница в радиусе фильтра опытной скважины (r_w) и радиусе обсадной трубы (r_c) ;
- учитывается емкость опытной скважины;
- типовая схема: рис. 2.4.

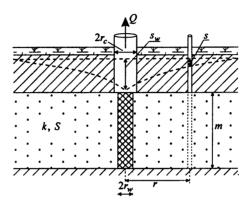


Рис. 2.4. Типовая схема (разрез) неограниченного напорного пласта при откачке из скважины большого диаметра.

🌣 Базовые аналитические зависимости [Papadopulos, Cooper, 1967]

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F\left(\frac{r_w^2 S}{4Tt}, \frac{r}{r_w}, S\frac{r_w^2}{r_c^2}\right), \tag{2.1.35}$$

где

$$F_{L}(u,\beta_{1},\beta_{2}) = 8 \frac{\beta_{3}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2}}{4u}\right)}{\tau^{2}} \times \left[\frac{J_{0}(\beta_{1}\tau)[\tau Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}Y_{1}(\tau)] - J_{0}}{-Y_{0}(\beta_{1}\tau)[\tau J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}J_{1}(\tau)]} \right] \times \frac{J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}J_{1}(\tau)}{[\tau J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}J_{1}(\tau)]^{2} + [\tau Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}Y_{1}(\tau)]^{2}} \right\} d\tau . \quad (2.1.36)$$

Частные случаи нестационарной фильтрации

Понижение в опытной скважине:

точное решение

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi T} F\left(\frac{r_{w}^{2} S}{4Tt}, S \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}}\right); \tag{2.1.37}$$

- для времени $t > 250 \frac{r_c^2}{T}$ уравнение (2.1.37) упрощается:

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r_{w}^{2} S}{4Tt} \right) = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at} \right);$$
 (2.1.38)

— для достаточно больших значений выражения $\frac{r_w^2 S}{4Tt}$ (и, следовательно, для начальных моментов времени)

$$s_{w} = \frac{Qt}{\pi r_{c}^{2}}.$$
 (2.1.39)

Из уравнения (2.1.39) видно, что в начальный момент времени понижение в опытной скважине зависит только от объема извлеченной воды (Qt) и радиуса обсадной трубы (πc^2).

Способы обработки откачки из скважины большого диаметра

Способ эталонной кривой

Таблица 2.1.9 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s_w - \lg t$	$\lg F\left(u, \frac{r_w^2 S}{r_c^2}\right) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r_w^2 \cdot 10^E}{4}$

 Π р и м е ч а н и е . Водоотдача S определяется подбором при построении эталонной кривой. При изменении подбираемой водоотдачи будут корректироваться и параметры, определяемые графоаналитическим способом — проводимость и пьезопроводность.

Подбор параметров

Таблица 2.1.10 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.1.35	TC	$s-\lg t$
2.1.37	1,5	$s_w - \lg t$

Замечание

По достижении времени $t>250\frac{r_c^2}{T}$ на основе уравнения (2.1.38) обработку проводят аналогично обработке для решений, не учитывающих емкость скважины.

Откачка с постоянным понижением

♦ Базовые аналитические зависимости [Jacob, Lohman, 1952; Hantush, 1964c; Бочевер, 1968; Lohman, 1972]

Решения для понижения

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = s_w A \left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w} \right). \tag{2.1.40}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Для больших моментов времени ($t > 500r_w^2/a$) или для условия, когда значение первого аргумента специальной функции $A(u,\beta)$ в уравнении (2.1.40) больше 500, понижение в наблюдательной скважине (по известному постоянному понижению в опытной скважине)

$$s = s_w \frac{W\left(\frac{r^2}{4at}\right)}{\ln\frac{2.25at}{r_w^2}}$$
 (2.1.41)

или понижение в наблюдательной скважине (по известному переменному расходу в опытной скважине)

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4at}\right),\tag{2.1.42}$$

где Q — переменный во времени расход, $M^3/\text{сут}$.

Решения для расхода

Уравнения нестационарной фильтрации

$$Q = 2\pi T s_w G \left(\frac{at}{r_w^2}\right). \tag{2.1.43}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для начальных моментов времени ($t < 0.05r_w^2/a$) или для условия, когда значение аргумента специальной функции G(u) в уравнении (2.1.43) меньше 0.05,

$$Q = 2\pi T s_w \left[0.5 + \frac{r_w}{\sqrt{\pi a t}} \right]. \tag{2.1.44}$$

2. Для больших моментов времени

$$Q \approx \frac{4\pi T s_w}{W\left(\frac{r_w^2}{4at}\right)}.$$
 (2.1.45)

Для больших моментов времени $(t > 500r_w^2/a)$ или для условия, когда значение 3. аргумента специальной функции G(u) в уравнении (2.1.43) больше 500,

$$Q \approx \frac{4\pi T s_w}{\ln(2.25at/r_w^2)}$$
 (2.1.46)

Способы обработки откачки с постоянным понижением

Способ эталонной кривой

Таблииа 2.1.11 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезо- проводность, м ² /сут	Понижение в опытной скважине, м
$\lg s - \lg t$	$ \lg A \left(u, \frac{r}{r_w} \right) - \lg u $	-	$a = \frac{10^E}{r_w^2}$	$s_w = 10^D$
$\lg Q - \lg t$	$\lg G(u) - \lg u$	$T = \frac{10^D}{2\pi s_w}$	r_w^2	_

Способ прямой линии

Таблица 2.1.12 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$\frac{s_w}{Q} - \lg t$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r_w^2}{2.25}}$

Примечание. Для табл. 2.1.12 используются данные о расходе опытной скважины на большие моменты времени.

Таблица 2.1.13 Расчетные формулы для определения параметров

for any conference makes and conference for			
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$\frac{s}{Q} - \lg t$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$\frac{s}{Q} - \lg r$	$T = \frac{0.366}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$\frac{s}{Q} - \lg \frac{t}{r^2}$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Примечание. Для табл. 2.1.13 используются понижения в наблюдательных скважинах на большие моменты времени ($t > 500r^2/a$) [Боревский и др., 1973].

Точечные способы

1. Способ отношения понижений (определение подбором пьезопроводности по отношению расходов опытной скважины на два момента времени):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{G\left(\frac{at_1}{r_w^2}\right)}{G\left(\frac{at_2}{r_w^2}\right)}.$$
(2.1.47)

2. Определение подбором пьезопроводности по понижению в наблюдательной скважине на большие моменты времени — на основе уравнения (2.1.41).

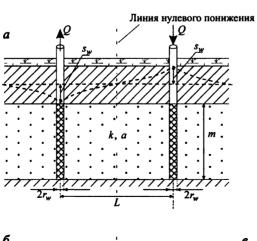
Подбор параметров

Таблица 2.1.14 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.1.40	а	$s-\lg t$
2.1.43	T, a	$Q - \lg t$

Дуплетное опробование

Две совершенные по степени вскрытия опытные скважины находятся в неограниченном по простиранию однородном изотропном водоносном пласте на некотором расстоянии друг от друга. Из одной опытной скважины, откачивают воду с постоянным расходом, а в другую закачивают с таким же расходом (рис. 2.5) [Jacob, 1950; Керкис, 1956; De Wiest, 1965].



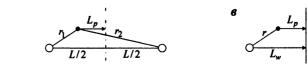


Рис. 2.5. Типовая схема неограниченного напорного пласта при дуплетном опробовании. a – разрез; b – план; b – представление дуплетного опробования как откачки у границы обеспеченного питания.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения для периода стационара

1. Понижение (повышение) в опытной скважине:

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{L - r_w}{r_w} \approx \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{L}{r_w}.$$
 (2.1.48)

2. Понижение (повышение) в наблюдательной скважине:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \,. \tag{2.1.49}$$

Если наблюдательная скважина находится ближе к откачивающей скважине ($r_1 < r_2$), то s_m — понижение на период стационара. Если наблюдательная скважина находится ближе к нагнетательной скважине ($r_1 > r_2$), то s_m — повышение на период стационара (значение при этом получается отрицательное, $s_m < 0$). На линии равных расстояний от опытных скважин ($r_1 = r_2$) понижение и повышение равно нулю ($s_m = 0$).

« Способы обработки дуплетного опробования

Способ прямой линии

Таблица 2.1.15

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg \frac{r_2}{r_1}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{L - r_w}{r_w} \approx \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{L}{r_w}. \qquad (2.1.50)$$

Определение проводимости по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (2.1.51)

Замечания

Для обработки можно использовать другие способы.

Все способы, которые применяются при откачке у границы обеспеченного питания (см. раздел 2.2.1). Предполагаемая граница должна проходить посередине между опытными скважинами и перпендикулярно линии, которая их соединяет (см. рис. 2.5, в). При этом в расчете учитывается одна опытная скважина — та, которая находится ближе к наблюдательной скважине. Расстояние от опытной скважины до предполагаемой

границы $L_{\rm w} = L/2$, а от наблюдательной скважины $L_p = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2L}$.

2. Способы обработки для групповой откачки (две опытные скважины) с постоянным расходом в каждой из них (см. раздел 13): в первой скважине расход равен Q, во второй скважине расход равен -Q.

2.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная бесконечная граница;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 2.6):

вариант 1: граница обеспеченного питания (условие І рода);

вариант 2: непроницаемая граница (условие II рода).

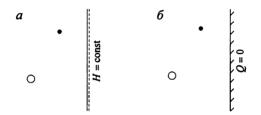


Рис. 2.6. Схематичный план полуограниченного пласта. a – граница обеспеченного питания; b – непроницаемая граница.

<u>Литература:</u> Форхгеймер, 1930; De Wiest, 1969; Шестаков, 1973; Мироненко, Шестаков, 1978; Kruseman, Ridder, 1994; Мироненко, 1996.

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $f^{I}(r, \rho, t)$ – вспомогательная функция, учитывающая влияние границы І рода: определяется уравнением (2.2.4);

 $f''(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границы II рода: определяется уравнением (2.2.22);

 $L_{p}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 $L_{p,1}, L_{p,2}\,$ – расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до границы, м;

 L_{w} – расстояние от опытной скважины до границы, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $r_{\rm w}$ — радиус опытной скважины, м;

 $r' = (\rho / r)^2$ – приведенное расстояние для способа эталонной кривой;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_0 – понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 s_m – понижение на период стационара в наблюдательной скважине, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах на период стационара, м;

 $s_{\it mr}$ — максимальное восстановление в наблюдательной скважине, м;

 s_{mw} — понижение на период стационара в опытной скважине, м; $s_r = (s_0 - s)$ — восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_0 — длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 – время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 $t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_0}$ — приведенное время для периода восстановления уровней, сут;

 t_1', t_2' — приведенное время (t') двух замеров для времени t_{r1} и t_{r2} (для точечных способов обработки), сут;

t, – время от начала восстановления, сут;

 $t_{r1},\,t_{r2}\,$ – время двух замеров от начала восстановления (для точечных способов обработки), сут: u – аргумент функции;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26);

W'(u) — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $y = \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$ — проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной скважины на линию границы, м;

 р – расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, определяется уравнением (2.2.1) или (2.2.2), м;

 $ho_1,
ho_2$ – расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной скважины, м.

Определение расстояния до фиктивной скважины

Расстояние от наблюдательной скважины до отраженной от границы (фиктивной) скважины (рис. 2.7) рассчитывается по следующей зависимости: $\rho = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + y^2} = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ .$

$$\rho = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + y^2} = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} . \tag{2.2.1}$$

При нахождении опытной и наблюдательной скважин в створе, перпендикулярном границе (рис. 2.8), зависимость (2.2.1) упрощается и расстояние до фиктивной скважины

$$\rho = L_{\mathbf{w}} + L_{\mathbf{p}} \,. \tag{2.2.2}$$

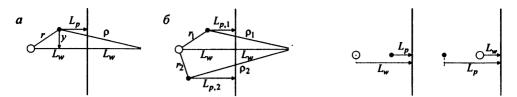


Рис. 2.7. Определение расстояний. a — для одной наблюдательной скважины; b — для двух наблюдательных скважин.

Рис. 2.8. Опытная и наблюдательная скважины находятся в створе, перпендикулярном границе.

2.2.1. Полуограниченный в плане пласт: граница І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.2);
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины;
- режим снижения уровней: три периода нестационарный, переходный (начало влияния границы) и стационарный;
- типовая схема: рис. 2.9.

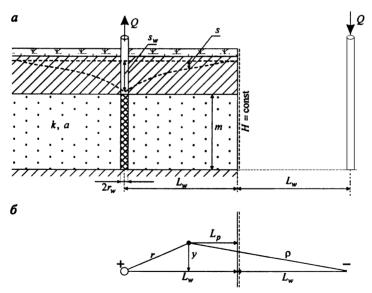


Рис. 2.9. Типовая схема напорного полуограниченного водоносного пласта с границей обеспеченного питания. a – разрез; δ – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.2.3);
- понижение для периода стационара: уравнение (2.2.5);
- понижение для периода стационара в опытной скважине: уравнение (2.2.6);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.2.13) и (2.2.16);
- восстановление для периода стационара: уравнение (2.2.17).

Откачка с постоянным расходом

Вазовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f^{I}(r, \rho, t), \qquad (2.2.3)$$

$$f^{I}(r,\rho,t) = W\left(\frac{r^{2}}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho^{2}}{4at}\right). \tag{2.2.4}$$

Уравнения для периода стационара

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{\rho}{r}$$
 (2.2.5)

Частный случай для стационарного периода

Для опытной скважины выражение для понижения записывается в следующем виде (формула Форхгеймера):

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2L_w}{r_w} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2L_w}{r_w}$$
 (2.2.6)

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.2.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	Q	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\frac{\operatorname{Ig} m}{u}$	$T = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. $W'(u) = W(u) - W(ur'); r' = (\rho/r)^2$.

Способ прямой линии

Таблица 2.2.2 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg \frac{\rho}{r}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t)}{f^I(r_2, \rho_2, t)}.$$
 (2.2.7)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению в наблюдательной скважине на период стационара:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{s_m} \lg \frac{\rho}{r}.$$
 (2.2.8)

2. Определение проводимости по понижению в опытной скважине на период стационара:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{2L_w}{r} = \frac{0.366Q}{s_{mw}} \lg \frac{2L_w}{r} \,. \tag{2.2.9}$$

3. Способ разности понижений (по замерам в двух скважинах на период стационара)

$$s_{m,1} - s_{m,2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}.$$
 (2.2.10)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.2.10):

$$T = \frac{Q}{2\pi (s_{m,1} - s_{m,2})} \ln \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}.$$
 (2.2.11)

4. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t_1)}{f^I(r_2, \rho_2, t_2)}.$$
 (2.2.12)

Подбор параметров

Таблица 2.2.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.2.3	T, a	$s-\lg t$
2.2.7	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I}(r, \rho, t_{0} + t_{r}) - f^{I}(r, \rho, t_{r}) \right]. \tag{2.2.13}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t_0 + t_r) - f^I(r_1, \rho_1, t_r)}{f^I(r_2, \rho_2, t_0 + t_r) - f^I(r_2, \rho_2, t_r)}.$$
 (2.2.14)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t_0 + t_{r_1}) - f^I(r_1, \rho_1, t_{r_1})}{f^I(r_2, \rho_2, t_0 + t_{r_2}) - f^I(r_2, \rho_2, t_{r_2})}.$$
 (2.2.15)

Подбор параметров

Таблица 2.2.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	ения Подбираемые параметры График	
2.2.13	T, a	$s - \lg t_r$
2.2.14	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^I(r, \rho, t_0) - f^I(r, \rho, t_0 + t_r) + f^I(r, \rho, t_r) \right]. \tag{2.2.16}$$

Уравнение для периода стационара

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{\rho}{r}$$
 (2.2.17)

❖ Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.2.5

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \lg(\rho/r)$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t_0) - f^I(r_1, \rho_1, t_0 + t_r) + f^I(r_1, \rho_1, t_r)}{f^I(r_2, \rho_2, t_0) - f^I(r_2, \rho_2, t_0 + t_r) + f^I(r_2, \rho_2, t_r)}.$$
 (2.2.18)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mr}} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{s_{mr}} \lg \frac{\rho}{r}.$$
 (2.2.19)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^I(r_1, \rho_1, t_0) - f^I(r_1, \rho_1, t_0 + t_{r1}) + f^I(r_1, \rho_1, t_{r1})}{f^I(r_2, \rho_2, t_0) - f^I(r_2, \rho_2, t_0 + t_{r2}) + f^I(r_2, \rho_2, t_{r2})}.$$
 (2.2.20)

Подбор параметров

Таблица 2.2.6

Подбираемые параметры	и и рекомендуемые	графики
-----------------------	-------------------	---------

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.2.16	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.2.18	а	$s_{r,1}/s_{r,2} - \lg t_r$

2.2.2. Полуограниченный в плане пласт: граница II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.2);
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен расходу опытной скважины;
- режим снижения уровней: три периода нестационарный, переходный (начало влияния границы) и квазистационарный;
- типовая схема: рис. 2.10.

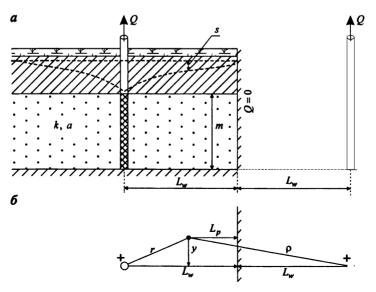


Рис. 2.10. Типовая схема напорного полуограниченного водоносного пласта с непроницаемой границей. a – разрез; b – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.2.21);
- понижение для квазистационарного периода: уравнение (2.2.22);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.2.30) и (2.2.35);
- восстановление для периода стационара: уравнения (2.2.31) и (2.2.36).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f^{II}(r, \rho, t), \qquad (2.2.21)$$

$$f^{II}(r,\rho,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + W\left(\frac{\rho^2}{4at}\right). \tag{2.2.22}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at}{r\rho} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r\rho}.$$
 (2.2.23)

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.2.7

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\frac{\lg s - \lg \frac{t}{r^2}}{\lg s - \lg t}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$ $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. W'(u) = W(u) + W(ur'); $r' = (\rho/r)^2$.

Способ прямой линии

Таблица 2.2.8

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м²/сут
Временное	$s - \lg t$		$a = 10^{A/C + \lg \frac{r\rho}{2.25}}$
прослеживание]	a = 10 2.23
Площадное	$s - \lg(r\rho)$	$T = \frac{0.366Q}{}$	$a = 10^{A/C - \lg(2.25 \cdot t)}$
прослеживание	5 15(1 <i>P</i>)	$I = \frac{1}{C}$	a = 10
Комбинированное прослеживание	$s-\lg\frac{t}{r\rho}$		$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f'''(r_1, \rho_1, t)}{f'''(r_2, \rho_2, t)}.$$
 (2.2.24)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода):

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{t_1 r_2 \rho_2}{t_2 r_1 \rho_1}.$$
 (2.2.25)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.2.25) тремя различными способами:

- по замерам в двух скважинах на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1 r_2 \rho_2}{t_2 r_1 \rho_1}; \qquad (2.2.26)$$

по замерам в двух скважинах на один момент времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2 \rho_2}{r_1 \rho_1}; \qquad (2.2.27)$$

по замерам в одной скважине на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (2.2.28)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f''(r_1, \rho_1, t_1)}{f''(r_2, \rho_2, t_2)} = \frac{\lg \frac{2.25at_1}{r_1 \rho_1}}{\lg \frac{2.25at_2}{r_2 \rho_2}}.$$
 (2.2.29)

Для правой части уравнения (2.2.29) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

Подбор параметров

Таблица 2.2.9

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.2.21	T, a	$s - \lg t$
2.2.24	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{II}(r, \rho, t_0 + t_r) - f^{II}(r, \rho, t_r) \right]. \tag{2.2.30}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.2.31)

❖ Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Таблица 2.2.10 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f''(r_1, \rho_1, t_0 + t_r) - f''(r_1, \rho_1, t_r)}{f''(r_2, \rho_2, t_0 + t_r) - f''(r_2, \rho_2, t_r)}.$$
 (2.2.32)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по единичному замеру восстановления уровня для периода квазистационарного режима на основе уравнения (2.2.31):

$$T = \frac{Q}{2\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.366Q}{s} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.2.33)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II}(r_1, \rho_1, t_0 + t_{r1}) - f^{II}(r_1, \rho_1, t_{r1})}{f^{II}(r_2, \rho_2, t_0 + t_{r2}) - f^{II}(r_2, \rho_2, t_{r2})}.$$
 (2.2.34)

Подбор параметров

Таблица 2.2.11 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.2.30	T, a	$s - \lg t_r$
2.2.32	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

❖ Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{II}(r, \rho, t_0) - f^{II}(r, \rho, t_0 + t_r) + f^{II}(r, \rho, t_r) \right]. \tag{2.2.35}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s_r = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r\rho} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{r\rho},$$
 (2.2.36)

$$t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r} \,. \tag{2.2.37}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.2.12 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s_r - \lg t'$		$a = 10^{A/C + \lg \frac{r\rho}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s_r - \lg(r\rho)$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg(2.25t')}$
Комбинированное прослеживание	$s_r - \lg \frac{t'}{r\rho}$		$a=10^{A/C-\lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^{II}(r_1, \rho_1, t_0) - f^{II}(r_1, \rho_1, t_0 + t_r) + f^{II}(r_1, \rho_1, t_r)}{f^{II}(r_2, \rho_2, t_0) - f^{II}(r_2, \rho_2, t_0 + t_r) + f^{II}(r_2, \rho_2, t_r)}.$$
(2.2.38)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода):

$$s_{r,1} - s_{r,2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{t_1' r_2 \rho_2}{t_2' r_1 \rho_1}.$$
 (2.2.39)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.2.39) тремя различными способами:

по замерам в двух скважинах на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_{r,1} - s_{r,2})} \ln \frac{t_1' r_2 \rho_2}{t_2' r_1 \rho_1}; \qquad (2.2.40)$$

- по замерам в двух скважинах на один момент времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_{r,1} - s_{r,2})} \ln \frac{r_2 \rho_2}{r_1 \rho_1}; \qquad (2.2.41)$$

по замерам в одной скважине на разные моменты времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_{-1} - s_{-2})} \ln \frac{t_1'}{t_2'}.$$
 (2.2.42)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^{II}(r_1, \rho_1, t_0) - f^{II}(r_1, \rho_1, t_0 + t_{r1}) + f^{II}(r_1, \rho_1, t_{r1})}{f^{II}(r_2, \rho_2, t_0) - f^{II}(r_2, \rho_2, t_0 + t_{r2}) + f^{II}(r_2, \rho_2, t_{r2})} = \frac{\lg \frac{2.25at_1'}{r_1 \rho_1}}{\lg \frac{2.25at_2'}{r_2 \rho_2}}.$$
 (2.2.43)

Для правой части уравнения (2.2.43) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

Подбор параметров

Таблица 2.2.13 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.2.35	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.2.38	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.3. Ограниченный в плане водоносный пласт (пласт-полоса)

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, ограниченный в плане;
- границы: две параллельные бесконечные прямолинейные границы;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

Рассматривается три варианта граничных условий (рис. 2.11):

вариант 1: две границы обеспеченного питания (условия І рода);

вариант 2: две непроницаемые границы (условия ІІ рода);

вариант 3: смешанные граничные условия (условия I и II рода).

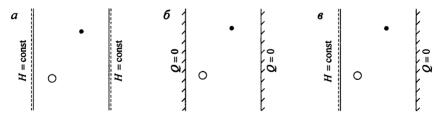


Рис. 2.11. Схематичный план пласта-полосы.

a – две границы обеспеченного питания; b – две непроницаемые границы; b – смещанные граничные условия.

<u>Литература:</u> Романов, 1952; Бочевер, 1959, 1968; Бочевер, Веригин, 1961; Биндеман, 1963; De Wiest, 1969; Боревский и др., 1973; Полубаринова-Кочина, 1977; Vandenberg, 1977; Мироненко, Шестаков, 1978; Kruseman, Ridder, 1994; Мироненко, 1996.

Условные обозначения:

- А величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);
- a пьезопроводность водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

C – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

E — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $\operatorname{erfc} u$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $f^{I-I}(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние параллельных границ І рода: определяется уравнением (2.3.6);

 $f^{I-II}(r, \rho, t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние смешанных параллельных границ I и II рода: определяется уравнением (2.3.45);

 $f^{II-II}(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние параллельных границ II рода: определяется уравнением (2.3.28);

 H_{0p} — начальный напор в наблюдательной скважине, м;

 H_{0w} – начальный напор в опытной скважине, м;

 H_1 – напор на контуре питания, м;

 H_2 – напор на контуре стока, м;

 $H_{\it mp}\,$ – напор в наблюдательной скважине на период стационара, м;

i=1,2 – отражения от левой (i=1) и от правой (i=2) границ;

 $i\operatorname{erfc}(u) = -u\operatorname{erfc}(u) + \frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp(-u^2)$ – кратный интеграл вероятностей (Приложение 4);

j = 1, 2, 3, ..., n – номер отражения;

 j_0 — номер отражения при определении расстояния до j-й фиктивной скважины в уравнениях (2.3.1) и (2.3.2);

L — ширина полосы, м;

 $L_{p}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до левой границы, м;

 $L_{p,1}, L_{p,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до левой границы, м;

 $L_p' = (L - L_p)$ – расстояние от наблюдательной скважины до правой границы, м;

 $L_{w}\,$ – расстояние от опытной скважины до левой границы, м;

 $L_{w}' = (L - L_{w})$ – расстояние от опытной скважины до правой границы, м;

n — количество отражений от одной границы (общее количество фиктивных скважин равно

2n), для практических расчетов достаточно 10-20 отражений; n — номер суммы;

Р – вспомогательный параметр;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $r_i^{\prime j} = (\rho_i^{j} / r)^2$ – приведенное расстояние для обработки по способу эталонной кривой;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_0 — понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 $s_{\it m}$ — понижение на период стационара в наблюдательной скважине, м;

 $s_{mw}\,$ – понижение на период стационара в опытной скважине, м;

 $s_r = (s_0 - s)$ — восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

 s_{w} – понижение в опытной скважине, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_0 — длительность откачки, сут;

 $t_1,\,t_2$ — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 t_r — время от начала восстановления, сут;

u — аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

W'(u) — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $y = \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$ – проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной скважины на линию границы, м;

 ρ_i^j — расстояния от наблюдательной скважины до *j*-х фиктивных скважин, отраженных от левой (*i* = 1) или от правой (*i* = 2) границы: определяются уравнениями (2.3.1) – (2.3.4), м; $\rho_1 = \rho_1^1$; $\rho_2 = \rho_2^1$;

 $ho_{i,1}^{j},
ho_{i,2}^{j}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной скважины, м.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин (рис. 2.12), отраженных от левой (ρ_1^j) и от правой (ρ_2^j) границ, рассчитываются по следующим зависимостям:

при произвольном расположении опытной и наблюдательной скважин:

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + y^2},$$
 (2.3.1)

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_p' + L_w' + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w'\right)^2 + y^2};$$
 (2.3.2)

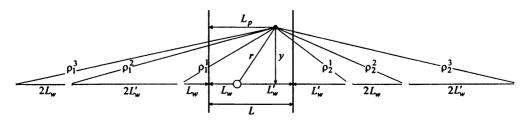
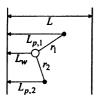


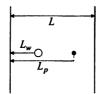
Рис. 2.12. Схематичный план пласта-полосы с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин.

 при нахождении опытной и наблюдательной скважин в створе, перпендикулярном границам (рис. 2.14):

$$\rho_1^f = L_p + L_w + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_w , \qquad (2.3.3)$$

$$\rho_2^j = L_p' + L_w' + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_w'.$$
 (2.3.4)





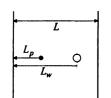


Рис. 2.13. Определение расстояний для двух наблюдательных скважин.

Рис. 2.14. Опытная и наблюдательная скважины находятся в створе, перпендикулярном границам.

2.3.1. Пласт-полоса: границы I рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.3);
- фиктивные скважины: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.15, б;
- режим снижения уровней: три периода нестационарный, переходный (начало влияния границ) и стационарный;
- типовая схема: рис. 2.15.

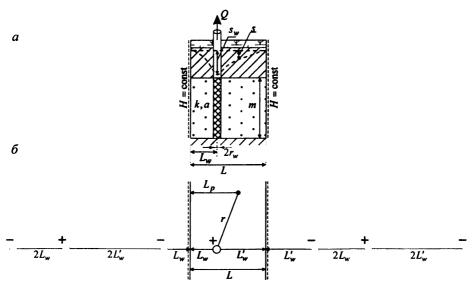


Рис. 2.15. Типовая схема напорного ограниченного водоносного пласта с параллельными границами обеспеченного питания. а – разрез; б – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (2.3.5) и (2.3.7);
- понижение для начальных моментов времени: уравнение (2.3.8);
- понижение для определенного расположения наблюдательной скважины для нестационарного периода: уравнение (2.3.9);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнение (2.3.10);
- понижение для стационарного периода: уравнение (2.3.11);
- понижение в опытной скважине для стационарного периода: уравнение (2.3.12);
- понижение для определенного расположения наблюдательной скважины для стационарного периода: уравнение (2.3.13);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.3.22) и (2.3.26);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнение (2.3.23).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное на основе суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f^{I-I} \left(r, \rho_i^j, t \right), \tag{2.3.5}$$

$$f^{I-I}(r,\rho_i^j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right]. \tag{2.3.6}$$

2. Решение без использования функции влияния скважины W(u) [Бочевер, 1959; Бочевер, Веригин, 1961]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \ln \frac{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_p + L_w)}{L}}{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_p - L_w)}{L}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \left(\cos \frac{n\pi (L_p + L_w)}{L} - \cos \frac{n\pi (L_p - L_w)}{L} \right) \times \left(\exp \left(-\frac{n\pi y}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{L} - \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) + \exp \left(\frac{n\pi y}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \right] \right\}$$

$$(2.3.7)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для времени $t < (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ понижение можно определять, используя приближенное решение, полученное на основе уравнения (2.3.5) путем однократного отражения реальной скважины относительно контуров пласта:

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_1^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_2^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.3.8}$$

Точность решения (2.3.8) составляет 3-5% при ощутимом влиянии второго слагаемого в фигурных скобках уравнения (2.3.7) [Бочевер, Веригин, 1961].

 Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной (см. рис. 2.14),

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \ln \frac{1 - \cos \frac{\pi(L_p + L_w)}{L}}{1 - \cos \frac{\pi(L_p - L_w)}{L}} + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{n} \left(\cos \frac{n\pi(L_p + L_w)}{L} - \cos \frac{n\pi(L_p - L_w)}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} \right) \right] \end{cases}. \tag{2.3.9}$$

3. Для опытной скважины [Бочевер, Веригин, 1961] на основе уравнения (2.3.7) получим

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \ln \frac{2L \sin \frac{\pi L_{w}}{L}}{\pi r_{w}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \left(\cos \frac{2n\pi L_{w}}{L} - \cos \frac{n\pi r_{w}}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{L} \right) \right] \right\}. \quad (2.3.10)$$

Уравнения для периода стационара

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_{p} + L_{w})}{L}}{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_{p} - L_{w})}{L}}.$$
 (2.3.11)

Время наступления стационара $t > (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ [Бочевер, Веригин, 1961].

Частные случаи для стационарного периода

1. Понижение в опытной скважине [Романов, 1952; Биндеман, 1963; Полубаринова-Кочина, 1977]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2L \sin \frac{\pi L_w}{L}}{\pi r_w}.$$
 (2.3.12)

Время наступления стационара для опытной скважины $t > (0.05 \div 0.1) \frac{L^2}{a}$ [Бочевер, Веригин, 1961].

2. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной (см. рис. 2.14),

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{1 - \cos \frac{\pi (L_{p} + L_{w})}{L}}{1 - \cos \frac{\pi (L_{p} - L_{w})}{L}}.$$
 (2.3.13)

Замечание

В данном разделе рассматривались решения при постоянных и равных напорах на границах. В случае различных напоров (рис. 2.16) на левой и правой границах (наличие в водоносном пласте контура питания H_1 и контура стока H_2) начальные напоры в опытной скважине H_{0w} и в наблюдательной скважине H_{0p} определяются по линейной зависимости [Романов, 1952] соответственно для напорного пласта

$$H_{0w} = \frac{H_1 - H_2}{L} (L - L_w) + H_2, \ H_{0p} = \frac{H_1 - H_2}{L} (L - L_p) + H_2$$
 (2.3.14)

и для безнапорного пласта

$$H_{0w} = \sqrt{\frac{H_1^2 - H_2^2}{L} (L - L_w) + H_2^2} , H_{0p} = \sqrt{\frac{H_1^2 - H_2^2}{L} (L - L_p) + H_2^2} . \tag{2.3.15}$$

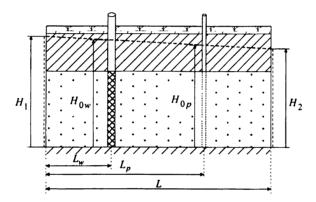


Рис. 2.16. Пример пласта-полосы с различными напорами на границах.

Напор в наблюдательной скважине, расположенной на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной, на период стационара равен для напорного пласта

$$H_{mp} = -\frac{Q}{4\pi T} \ln \left[\frac{1 - \cos\frac{\pi(L_p + L_w)}{L}}{1 - \cos\frac{\pi(L_p - L_w)}{L}} \right] - \frac{H_1 - H_2}{L} \left(L_p - \frac{L}{2} \right) + \frac{H_1 + H_2}{2}$$
 (2.3.16)

и для безнапорного пласта

$$H_{mp} = \sqrt{-\frac{Q}{2\pi T} \ln \left[\frac{1 - \cos \frac{\pi (L_p + L_w)}{L}}{1 - \cos \frac{\pi (L_p - L_w)}{L}} \right] - \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L} \left(L_p - \frac{L}{2} \right) + \frac{H_1^2 + H_2^2}{4}} . \quad (2.3.17)$$

Понижения уровня на период стационара в опытной и наблюдательной скважинах не зависят от перепада напоров на границах.

Таблииа 2.3.1

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	T = <u>Q</u>	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	1g // (u) - 1g u	$T = \frac{2}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u) = W(u) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{j}).$$

Способ прямой линии

Таблица 2.3.2 Расчетные формулы для определения параметров

т шо тотпъто фо	разуны дам определени	in napamorpos
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \ln P$	$T = \frac{Q}{4\pi C}$

 Π р и м е ч а н и е . P – выражение под знаком логарифма в уравнении (2.3.11).

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t)}{f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t)}.$$
 (2.3.18)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине:

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2L \sin \frac{\pi L_w}{L}}{\pi r_{m}}.$$
 (2.3.19)

2. Определение проводимости по максимальному понижению:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_{-}} \ln P \,, \tag{2.3.20}$$

где P – выражение под знаком логарифма в уравнении (2.3.11) или (2.3.13).

3. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_1)}{f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_2)}.$$
 (2.3.21)

Для начальных моментов времени подбор пьезопроводности по единичным замерам можно осуществлять на основе уравнения (2.3.8), а по данным в опытной скважине – по уравнению (2.3.10).

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.5, 2.3.7	T, a	$s - \lg t$
2.3.10	T, a	$s_w - \lg t$
2.3.18	a	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-I} \left(r, \rho_i^j, t_0 + t_r \right) - f^{I-I} \left(r, \rho_i^j, t_r \right) \right]. \tag{2.3.22}$$

Таблица 2.3.3

Уравнение квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.3.23)

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Таблица 2.3.4 Расчетные формулы для определения параметров

•		
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) - f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) - f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
(2.3.24)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.5 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Подбираемые параметры Номер уравнения 2.3.22

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-I}(r, \rho_i^j, t_0) - f^{I-I}(r, \rho_i^j, t_0 + t_r) + f^{I-I}(r, \rho_i^j, t_r) \right]. \tag{2.3.25}$$

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0) - f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) + f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0) - f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) + f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
(2.3.26)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.6 Полбираемые параметры и рекоменлуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.25	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.3.26	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.3.2. Пласт-полоса: границы II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.3);
- фиктивные скважины: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.17, 6;

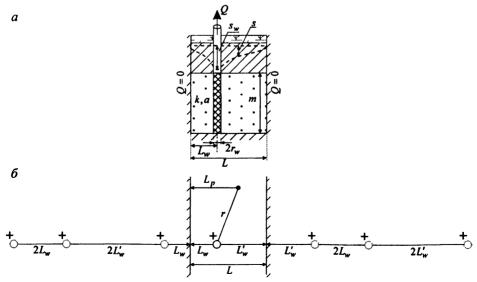


Рис. 2.17. Типовая схема напорного ограниченного водоносного пласта с параллельными непроницаемыми границами. а – разрез; б – план.

- режим снижения уровней: три периода нестационарный, переходный (начало влияния границ) и квазистационарный;
- типовая схема: рис. 2.17.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (2.3.27) и(2.3.29);
- понижение для начальных моментов времени: уравнение (2.3.30);
- понижение для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (2.3.31);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнение (2.3.32);
- понижение для определенного расположения наблюдательной скважины для нестационарного периода: уравнения (2.3.33), (2.3.34) и (2.3.35);
- понижение для квазистационарного периода: уравнение (2.3.36);
- понижение в опытной скважине для квазистационарного периода: уравнение (2.3.37);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.3.40) и (2.3.42).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации [Бочевер, 1959; Бочевер, Веригин, 1961]

1. Решение, полученное на основе суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f^{II-II} \left(r, \rho_i^j, t \right), \tag{2.3.27}$$

$$f^{II-II}(r,\rho_i^j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right]. \tag{2.3.28}$$

2. Решение без использования функции влияния скважины W(u):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \frac{4\pi \sqrt{at}}{m} i \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \\ \frac{\exp\left(2\frac{\pi y}{L}\right)}{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\frac{\pi(L_p + L_w)}{L}\right] \left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\frac{\pi(L_p - L_w)}{L}\right]} \\ -\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n}\left(\cos\frac{n\pi(L_p + L_w)}{L} + \cos\frac{n\pi(L_p - L_w)}{L}\right) \times \\ +\exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} - \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \\ +\exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) \end{cases} \end{cases}$$
(2.3.29)

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для времени $t < (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ понижение можно определять, используя приближенное решение, полученное на основе уравнения (2.3.27) путем однократного отражения реальной скважины относительно контуров пласта:

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\left(\rho_1^1\right)^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\left(\rho_2^1\right)^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.3.30}$$

Точность решения (2.3.30) составляет 3-5% при ощутимом влиянии третьего слагаемого в фигурных скобках уравнения (2.3.29) [Бочевер, Веригин, 1961].

2. Для времени $t > (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ уравнение (2.3.29) записывается в следующем виде:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \frac{4\pi \sqrt{at}}{L} i \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \exp\left(2\frac{\pi y}{L}\right) + \ln \frac{\exp\left(2\frac{\pi y}{L}\right)}{4\left[\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi(L_p + L_w)}{L}\right] \left[\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi(L_p - L_w)}{L}\right]} \right\}. \quad (2.3.31)$$

3. Для опытной скважины [Бочевер, Веригин, 1961]

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \frac{3.55\sqrt{at}}{L} + \ln\frac{0.16L}{r_{w}\sin\frac{\pi L_{w}}{L}} - \\ -\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \left(\cos\frac{2n\pi L_{w}}{L} + \cos\frac{2n\pi r_{w}}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} \right) \right] \end{cases}$$
(2.3.32)

4. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной (см. рис. 2.14),

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \frac{4\sqrt{\pi at}}{m} - \ln\left[4\left(1 - \cos\frac{\pi(L_p + L_w)}{L}\right)\left(1 - \cos\frac{\pi(L_p - L_w)}{L}\right)\right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{n}\left(\cos\frac{n\pi(L_p + L_w)}{L} + \cos\frac{n\pi(L_p - L_w)}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L}\right)\right] \right\}. \tag{2.3.33}$$

И аналогично для времени $t > (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \frac{4\sqrt{\pi at}}{L} - \ln \left[4 \left(1 - \cos \frac{\pi \left(L_p + L_w \right)}{L} \right) \left(1 - \cos \frac{\pi \left(L_p - L_w \right)}{L} \right) \right] \right\}. \tag{2.3.34}$$

5. Решение Vandenberg [1977; Kruseman, Ridder, 1994]. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии, отвечающем неравенству $\sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2} > L$,

$$s = \frac{Q}{2TL} \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2} \left[\frac{\exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right)}{\sqrt{\pi \frac{r^2}{4at}}} - \operatorname{erfc}\sqrt{\frac{r^2}{4at}} \right]. \tag{2.3.35}$$

Уравнение для квазистационарного периода

Для времени $t \ge 10 \frac{y}{\sqrt{a}}$ с точностью до 10 % решение (2.3.29) записывается как уравнение прямой линии [Боревский и др., 1973]:

$$s = \left\{ \frac{0.56Q\sqrt{a}}{TL} \sqrt{t} + \frac{Q}{4\pi T \ln \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi(L_p + L_w)}{L} \left[\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi(L_p - L_w)}{L} \right]} \right\}. \quad (2.3.36)$$

Критерием наступления квазистационарного режима является параллельность графиков в координатах $s - \sqrt{t}$ по различным наблюдательным скважинам [Боревский и др., 1973].

Частный случай для квазистационарного периода

Понижение в опытной скважине для времени $t > (0.05 \div 0.1) \frac{L^2}{a}$ (следует из уравнения (2.3.32)) записывается как

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \frac{3.55\sqrt{at}}{L} + \ln \frac{0.16L}{r_{w} \sin \frac{\pi L_{w}}{L}} \right\}.$$
 (2.3.37)

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.3.7 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	Q	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$u = \frac{1g}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u) = W(u) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{i,j}).$$

Способ прямой линии

Таблица 2.3.8

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s-\sqrt{t}$	$T = rac{0.56Q\sqrt{a}}{LC}$ или $T = rac{Q}{4\pi A}P$	$a = \left(\frac{TmC}{0.56Q}\right)^2$

Примечание. Р – второе слагаемое в фигурных скобках уравнения (2.3.36) или при построении индикаторной кривой по понижениям в опытной скважине уравнения (2.3.37).

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t)}{f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t)}.$$
 (2.3.38)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы

Точечные способы

Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):
$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II-II}\left(r_1, \rho_{i,1}^{j}, t_1\right)}{f^{II-II}\left(r_2, \rho_{i,2}^{j}, t_2\right)}.$$
 (2.3.39)

Данным способом подбор пьезопроводности можно также осуществить:

- для начальных моментов времени на основе уравнения (2.3.30);
- для больших интервалов времени по уравнениям (2.3.31) и (2.3.36);
- по данным в опытной скважине по уравнениям (2.3.32) и (2.3.37);
- при определенном расположении наблюдательных скважин по уравнениям (2.3.33) и (2.3.35).

Подбор параметров

Таблица 2.3.9

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.27, 2.3.29	T, a	$s - \lg t$
2.3.32		$s_w - \lg t$
2.3.38	a	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{II-II} \left(r, \rho_i^j, t_0 + t_r \right) - f^{II-II} \left(r, \rho_i^j, t_r \right) \right]. \tag{2.3.40}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) - f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) - f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
(2.3.41)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.10 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.40	T, a	$s - \lg t_r$
2.3.41	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{II-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} \right) - f^{II-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) + f^{II-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{r} \right) \right]. \tag{2.3.42}$$

***** Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0) - f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) + f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0) - f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) + f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
 (2.3.43)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.11 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.42	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.3.43	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.3.3. Пласт-полоса: границы I и II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 2.3);
- фиктивные скважины: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.18, б;
- режим снижения уровней: три периода нестационарный, переходный (начало влияния границ) и стационарный;
- типовая схема: рис. 2.18.

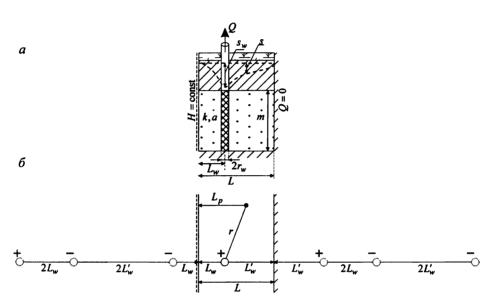


Рис. 2.18. Типовая схема напорного ограниченного водоносного пласта со смешанными условиями на параллельных границах. a – разрез: δ – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (2.3.44) и (2.3.46);
- понижение для начальных моментов времени: уравнение (2.3.47);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнение (2.3.48);
- понижение для определенного расположения наблюдательной скважины для нестационарного периода: уравнение (2.3.49);
- понижение для стационарного периода: уравнение (2.3.50);
- понижение в опытной скважине для стационарного периода: уравнение (2.3.51);
- понижение для определенного расположения наблюдательной скважины для стационарного периода: уравнение (2.3.52);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.3.56) и (2.3.60);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнение (2.3.57).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное на основе суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f^{I-II}(r, \rho_i^j, t), \qquad (2.3.44)$$

$$f^{I-II}(r,\rho_{i}^{j},t) = \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at}\right) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at}\right) + \\ + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at}\right) \end{bmatrix}.$$
(2.3.45)

2. Решение без использования функции влияния скважины W(u) [Бочевер, 1959; Бочевер, Веригин, 1961]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\cosh \frac{\pi y}{2L} - \cos \frac{\pi (L_p + L_w)}{2L}}{2L} \right] \left[\cosh \frac{\pi y}{2L} + \cos \frac{\pi (L_p - L_w)}{2L}} \right] + \\ & \left[\cosh \frac{\pi y}{2L} + \cos \frac{\pi (L_p + L_w)}{2L} \right] \left[\cosh \frac{\pi y}{2L} - \cos \frac{\pi (L_p - L_w)}{2L}} \right] + \\ & \left[\frac{1 - (-1)^n}{n} \left(\cos \frac{n\pi (L_p + L_w)}{2L} - \cos \frac{n\pi (L_p - L_w)}{2L}} \right) \times \right] \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp \left(-\frac{n\pi y}{2L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} - \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) + \right] \\ & + \exp \left(\frac{n\pi y}{2L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} + \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (2.3.46)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для времени $t < (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ понижение можно определять, используя приближенное решение, полученное на основе уравнения (2.3.44) путем однократного отражения реальной скважины относительно контуров пласта:

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_1^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_2^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.3.47}$$

Точность решения (2.3.47) составляет 3–5% при ощутимом влиянии второго слагаемого в фигурных скобках уравнения (2.3.46) [Бочевер, Веригин, 1961].

2. Для опытной скважины [Бочевер, 1959; Бочевер, Веригин, 1961] на основе уравнения (2.3.46) получим

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \ln \frac{4L}{\pi r_{w} \tan \frac{\pi L_{w}}{2L}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - (-1)^{n}}{n} \left(\cos \frac{n\pi L_{w}}{L} - \cos \frac{n\pi r_{w}}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} \right) \right] \right\}.$$
 (2.3.48)

3. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной (см. рис. 2.14),

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \ln \left[\frac{1 - \cos \frac{\pi(L_p + L_w)}{2L}}{1 + \cos \frac{\pi(L_p - L_w)}{2L}} \right] + \cos \frac{\pi(L_p - L_w)}{2L} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \left[2 \frac{1 - (-1)^n}{n} \left(\cos \frac{n\pi(L_p + L_w)}{2L} - \cos \frac{n\pi(L_p - L_w)}{2L} \right) \times \right] \\ \times \operatorname{erfc} \left(\frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} \right) \end{cases}$$
(2.3.49)

Уравнение для периода стационара

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{\left[\cosh\frac{\pi y}{2L} - \cos\frac{\pi (L_{p} + L_{w})}{2L}\right] \left[\cosh\frac{\pi y}{2L} + \cos\frac{\pi (L_{p} - L_{w})}{2L}\right]}{\left[\cosh\frac{\pi y}{2L} + \cos\frac{\pi (L_{p} + L_{w})}{2L}\right] \left[\cosh\frac{\pi y}{2L} - \cos\frac{\pi (L_{p} - L_{w})}{2L}\right]}.$$
 (2.3.50)

Время наступления стационара $t > (0.5 \div 0.8) \frac{L^2}{a}$ [Бочевер, Веригин, 1961].

Частные случаи для стационарного периода

1. Понижение в опытной скважине

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{4L}{m_w \tan \frac{\pi L_w}{2L}} \right). \tag{2.3.51}$$

Время наступления стационара для опытной скважины $t > (0.25 \div 0.5) \frac{L^2}{a}$ [Бочевер, Веригин, 1961].

2. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной линии (перпендикулярной границам) с опытной скважиной,

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{\left[1 - \cos\frac{\pi(L_{p} + L_{w})}{2L}\right] \left[1 + \cos\frac{\pi(L_{p} - L_{w})}{2L}\right]}{\left[1 + \cos\frac{\pi(L_{p} + L_{w})}{2L}\right] \left[1 - \cos\frac{\pi(L_{p} - L_{w})}{2L}\right]}.$$
 (2.3.52)

Таблица 2.3.12

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

 График фактической кривой
 График эталонной кривой
 Проводимость, м²/сут
 Пьезопроводность, м²/сут

 $\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$ $\lg w'(u) - \lg \frac{1}{u}$ $T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$ $a = \frac{10^E}{4}$
 $\lg s - \lg t$ $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

$$\Pi \text{ р и мечание. } W'\!\!\left(u\right) = W\!\!\left(u\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left(-1\right)^{\!(j+2i-1)/2} W\!\!\left(\!ur_{i}^{\prime\,j}\right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} \left(-1\right)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\!\!\left(\!ur_{i}^{\prime\,j}\right).$$

Способ прямой линии

Таблица 2.3.13 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \ln P$	$T = \frac{Q}{4\pi C}$

 Π р и м е ч а н и е . P — выражение под знаком логарифма в уравнении (2.3.50).

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t)}{f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t)}.$$
 (2.3.53)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_m} \ln P, \qquad (2.3.54)$$

где P – выражение под знаком логарифма в уравнении (2.3.50) или (2.3.52).

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^J, t_1)}{f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^J, t_2)}.$$
 (2.3.55)

Для начальных моментов времени подбор пьезопроводности по единичным замерам можно осуществлять на основе уравнения (2.3.47), а по данным в опытной скважине – по уравнению (2.3.48).

Подбор параметров

Таблица 2.3.14 Полбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.44, 2.3.46	T, a	$s - \lg t$
2.3.48		$s_w - \lg t$
2.3.53	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстаиовление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-II} \left(r, \rho_i^j, t_0 + t_r \right) - f^{I-II} \left(r, \rho_i^j, t_r \right) \right]. \tag{2.3.56}$$

Уравнение квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.3.57)

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Таблица 2.3.15
Расчетные формулы для определения параметров

Two location debt with other description and an experience the second sec			
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	

Точечное решение

Определение проводимости:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} \,. \tag{2.3.58}$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) - f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) - f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
(2.3.59)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.16 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения Подбираемые параметры График			
2.3.56	T, a	$s - \lg t_r$	
2.3.59	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$	

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} \right) - f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) + f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{r} \right) \right]. \tag{2.3.60}$$

***** Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0) - f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r) + f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t_r)}{f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0) - f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r) + f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t_r)}.$$
 (2.3.61)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.3.17 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.3.60	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.3.61	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.4. U-образный водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, ограниченный в плане;
- границы: две параллельные полубесконечные прямолинейные границы и одна ограниченная прямолинейная граница, перпендикулярная к параллельным границам;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

Рассматриваются шесть вариантов граничных условий (рис. 2.19):

вариант 1: параллельные границы І рода, перпендикулярная граница І рода;

вариант 2: параллельные границы I рода, перпендикулярная граница II рода;

вариант 3: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница I рода;

вариант 4: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница II рода; вариант 5: параллельные границы I и II родов, перпендикулярная граница I рода;

вариант 6: параллельные границы I и II родов, перпендикулярная граница II рода.

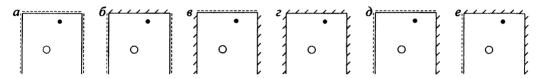


Рис. 2.19. Схематичный план U-образного пласта.

a, b — параллельные границы обеспеченного питания; b, c — непроницаемые параллельные границы; b, c — смешанные граничные условия на параллельных границах.

<u>Литература:</u> Ferris at el., 1962; Walton, 1962, 1970; Kruseman, Ridder, 1994.

Условные обозначения:

a – пьезопроводность водоносного пласта, M^2 /сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $f^{I-I}(r,\rho,t)$ – функция, учитывающая влияние параллельных границ I рода: определяется уравнением (2.3.6);

 $f^{I-II}(r,\rho,t)$ — функция, учитывающая влияние смешанных параллельных границ I и II рода: определяется уравнением (2.3.45);

 $f^{II-II}(r,\rho,t)$ — функция, учитывающая влияние параллельных границ II рода: определяется уравнением (2.3.28);

i = 1, 2 – отражения от левой (i = 1) и от правой (i = 2) границ;

j = 1, 2, 3, ..., n – номер отражения;

 j_0 — номер отражения при определении расстояния до j-й фиктивной скважины в уравнениях (2.4.1) — (2.4.4);

L – расстояние между параллельными границами, м;

 L_p – расстояние от наблюдательной скважины до левой параллельной границы, м;

 $L_{p}^{\prime}=\left(L-L_{p}\right)$ — расстояние от наблюдательной скважины до правой параллельной границы, м;

 $L_{p,1}, L_{p,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до левой параллельной границы (см. рис. 2.21), м;

 L_{U_D} – расстояния от наблюдательной скважины до перпендикулярной границы, м;

 $L_{Up,1}$, $L_{Up,2}$ – расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до перпендикулярной границы (см. рис. 2.21), м;

 L_{Uw} – расстояния от опытной скважины до перпендикулярной границы, м;

 L_{w} – расстояния от опытной скважины до первой и второй границы, м;

 $L'_{w} = (L - L_{w})$ – расстояние от опытной скважины до правой границы, м;

n – количество отражений от одной границы (общее количество отраженных скважин равно 4n+1), для практических расчетов достаточно 10-20 отражений;

P – вспомогательный параметр;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 $R^{\prime I-I}$, $R^{\prime II-II}$ — свертка расстояний соответственно для параллельных границ I рода определяется по равенству (2.4.10) и II рода — по равенству (2.4.24);

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

 $r_i^{\prime\, j} = \left({{
ho _i}^j \, / \, r} \right)^2 \, -$ приведенное расстояние (для обработки по способу эталонной кривой);

 $r_U' = (\rho_U/r)^2$ – приведенное расстояние (для обработки по способу эталонной кривой);

 $r_{Ui}^{\prime j} = \left(
ho_{Ui}^{j} / r
ight)^{2}$ — приведенное расстояние (для обработки по способу эталонной кривой);

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

s – понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 – понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 $s_{\it mr}$ — восстановление в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 s_r – восстановление в наблюдательной скважине, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления для первой и второй наблюдательных скважин, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_0 – длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 t_r – время от начала восстановления, сут;

u – аргумент функции;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

W'(u) – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 ρ_i^j — расстояния от наблюдательной скважины до *j*-х фиктивных скважин первого ряда, отраженных от левой (*i* = 1) и от правой (*i* = 2) границ: определяются уравнениями (2.4.1) и (2.4.2), м;

 $\rho_{i,1}^{j}$, $\rho_{i,2}^{j}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивных скважин первого ряда, м;

 ρ_U — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы: определяется уравнением (2.4.5), м;

 $ho_{U,1}$, $ho_{U,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы, м;

 ρ_{Ui}^{j} — расстояния от наблюдательной скважины до j-х фиктивных скважин второго ряда, отраженных от левой (i=1) и от правой (i=2) границ: определяются уравнениями (2.4.3) и (2.4.4), м; ρ_{Ui}^{j} , ρ_{Ui}^{j} , — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивных

± — знак «—» ставится в приведенных ниже уравнениях перед функциями при учете граничного условия І рода на перпендикулярной границе, знак «+» — при учете граничного условия ІІ рода на перпендикулярной границе.

Определение расстояний до фиктивных скважин (рис. 2.20)

скважин второго ряда, м;

1. Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин первого ряда, отраженных от левой (ρ_1^j) и от правой (ρ_2^j) границ:

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^2},$$
 (2.4.1)

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_p' + L_w' + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w'\right)^2 + \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^2} . \tag{2.4.2}$$

2. Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин второго ряда, отраженных от левой (ρ_{U1}^{j}) и от правой (ρ_{U2}^{j}) границ:

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w}' + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w}\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}},$$
 (2.4.3)

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(L_{p}' + L_{w}' + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w}'\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}}.$$
 (2.4.4)

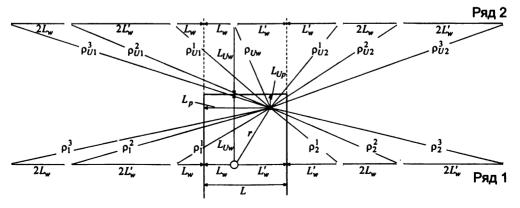


Рис. 2.20. Схематичный план U-образного пласта с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин первого и второго ряда.

3. Расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы (ρ_U):

$$\rho_U = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_{Uw} + L_{Up})^2} . \tag{2.4.5}$$

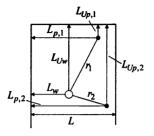


Рис. 2.21. Определение расстояний для двух наблюдательных скважин в U-образном пласте.

Замечание

При задании расстояния между опытной и наблюдательной скважинами и при известных расстояниях до границ от опытной и наблюдательной скважин должно сохраняться следующее равенство:

$$r = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_{Uw} - L_{Up})^2} . {(2.4.6)}$$

2.4.1. U-образный пласт:

параллельные границы I рода, перпендикулярная граница I или II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для U-образного водоносного пласта (см. начало раздела 2.4);
- фиктивные скважины: два ряда бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.22, б и в;
- типовая схема: рис. 2.22.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.4.7);
- понижение для стационарного периода (для варианта с перпендикулярной границей I рода): уравнения (2.4.8) и(2.4.9);
- восстановление для нестационарного периода: уравнение (2.4.14) и (2.4.18);
- восстановление для квазистационарного периода (для варианта с перпендикулярной границей II рода): уравнение (2.4.15);
- восстановление для стационарного периода (для варианта с перпендикулярной границей I рода): уравнение (2.4.19).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-I} \left(r, \rho_i^j, t \right) \pm f^{I-I} \left(r_U, \rho_{Ui}^j, t \right) \right]. \tag{2.4.7}$$

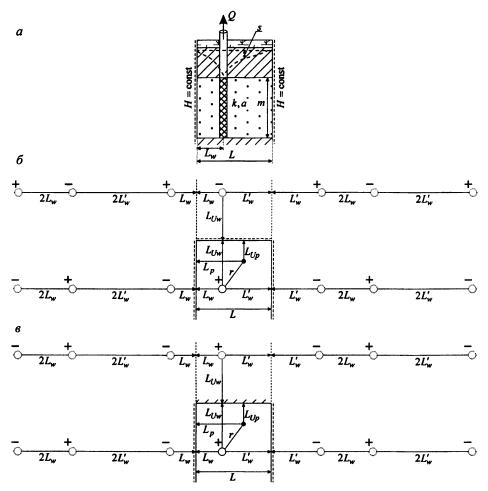


Рис. 2.22. Типовая схема напорного U-образного водоносного пласта с параллельными границами обеспеченного питания. a — разрез; b — план для перпендикулярной границы обеспеченного питания; b — план для непроницаемой перпендикулярной границы.

Уравнения для периода стационара (для варианта с перпендикулярной границей I рода)

1. Решение, полученное на основе функций Грина [Kruseman, Ridder, 1994]:

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \begin{bmatrix} \frac{\cosh \frac{\pi(L_{Up} - L_{Uw})}{L} - \cos \frac{\pi(L_{p} + L_{w})}{L}}{\frac{L}{\cosh \frac{\pi(L_{Up} - L_{Uw})}{L} - \cos \frac{\pi(L_{p} - L_{w})}{L}}} \\ \frac{\cosh \frac{\pi(L_{Up} + L_{Uw})}{L} - \cos \frac{\pi(L_{p} - L_{w})}{L}}{\frac{L}{\cosh \frac{\pi(L_{Up} + L_{Uw})}{L} - \cos \frac{\pi(L_{p} + L_{w})}{L}}} \end{bmatrix}$$
(2.4.8)

2. Решение, полученное на основе суперпозиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{I-I}, \qquad (2.4.9)$$

$$R'^{I-I} = \frac{\rho_U}{r} \prod_{j=1,3,\dots}^{n} \left(\frac{\rho_1^j \rho_2^j}{\rho_{U1}^j \rho_{U2}^j} \right) \prod_{j=2,4,\dots}^{n} \left(\frac{\rho_{U1}^j \rho_{U2}^j}{\rho_1^j \rho_2^j} \right). \tag{2.4.10}$$

Здесь даны произведения расстояний до фиктивных скважин, отраженных от левой и от правой границ, для четных (j=2,4,...) и нечетных отражений (j=1,3,...). Для практики достаточно порядка 10 отражений с каждой стороны для получения хорошей сходимости.

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

Таблица 2.4.1

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	T - Q	$a=\frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	1g // (u) - 1g u	$I = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

$$\Pi \text{ р и мечание. } W'(u) = \left[W(u) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{\prime \ j})\right] \pm \left[W(ur_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{Ui}^{\prime \ j})\right].$$

Способ прямой линии (для варианта с перпендикулярной границей I рода)

Таблица 2.4.2

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Спосоо обработки	1 рафик	проводимость, м /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg R'^{I-I}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-I}(r_1, \rho_{i,1}^j, t) \pm f^{I-I}(r_1, \rho_{Ui,1}^j, t)}{f^{I-I}(r_2, \rho_{i,2}^j, t) \pm f^{I-I}(r_2, \rho_{Ui,2}^j, t)}.$$
 (2.4.11)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы (для варианта с перпендикулярной границей I рода)

Определение проводимости по понижению на период стационара:

1) на основе уравнения (2.4.8)

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{-}} \ln P \,, \tag{2.4.12}$$

где Р – выражение под знаком логарифма в уравнении (2.4.8);

2) на основе уравнения (2.4.9)

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln R'^{I-I} \,. \tag{2.4.13}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.7	T, a	$s - \lg t$
2.4.11	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} f^{I-I}(r, \rho_i^j, t_0 + t_r) \pm f^{I-I}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_0 + t_r) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f^{I-I}(r, \rho_i^j, t_r) \pm f^{I-I}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_r) \end{bmatrix} \right\}.$$
 (2.4.14)

<u>Уравнение для квазистационарного периода</u> (для варианта с перпендикулярной границей II рода)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} \,. \tag{2.4.15}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии (для варианта с перпендикулярной границей II рода)

Таблица 2.4.4

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t}{t_0 + t}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\begin{cases} \left[f^{I-I} \left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \pm f^{I-I} \left(\rho_{U,1}, \rho_{U,1}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \right] - \\ - \left[f^{I-I} \left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r} \right) \pm f^{I-I} \left(\rho_{U,1}, \rho_{U,1}^{j}, t_{r} \right) \right] \\ \left[\left[f^{I-I} \left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \pm f^{I-I} \left(\rho_{U,2}, \rho_{U,2}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \right] - \\ - \left[f^{I-I} \left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r} \right) \pm f^{I-I} \left(\rho_{U,2}, \rho_{U,2}^{j}, t_{r} \right) \right] \end{cases} \tag{2.4.16}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечное решение (для варианта с перпендикулярной границей II рода)

Определение проводимости:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} \,. \tag{2.4.17}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.14	T, a	$s - \lg t_r$
2.4.16	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \left[f^{I-I}(r, \rho_{i}^{j}, t_{0}) \pm f^{I-I}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0}) \right] - \\ - \left[f^{I-I}(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}) \pm f^{I-I}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0} + t_{r}) \right] + \\ + \left[f^{I-I}(r, \rho_{i}^{j}, t_{r}) \pm f^{I-I}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{r}) \right] \end{cases}$$
(2.4.18)

<u>Уравнение для периода стационара</u> (для варианта с перпендикулярной границей I рода)

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{I-I} \,. \tag{2.4.19}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии (для варианта с перпендикулярной границей I рода)

Таблица 2.4.6

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \lg R'^{I-I}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{S_{r,1}}{S_{r,2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f^{I-I}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
+ \left[f^{I-I}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{I-I}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r}\right)\right] - \\
- \left[f^{I-I}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
- \left[f^{I-I}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{I-I}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] - \\
- \left[f^{I-I}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{I-I}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r}\right)\right]$$
(2.4.20)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечное решение (для варианта с перпендикулярной границей II рода)

Определение проводимости:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{--}} \ln R'^{I-I} \,. \tag{2.4.21}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.7 Полбираемые параметры и рекоменлуемые графики

110A011Pacinible inspanies P21 if percentage in page 1		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.18	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.4.20	а	$s_{r,1}/s_{r,2} - \lg t_r$

2.4.2. U-образный пласт: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница I или II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для U-образного водоносного пласта (см. начало раздела 2.4);
- фиктивные скважины: два ряда бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.23, δ и ε ;
- типовая схема: рис. 2.23.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.4.22);
- понижение для стационарного периода (для варианта с перпендикулярной границей І рода): уравнение (2.4.23);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.4.27) и (2.4.29);
- восстановление для квазистационарного периода (для варианта с перпендикулярной границей I рода): уравнение (2.4.30).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{II-II} \left(r, \rho_i^j, t \right) \pm f^{II-II} \left(\rho_U, \rho_{U_i}^j, t \right) \right]. \tag{2.4.22}$$

<u>Уравнение для стационарного периода</u> (для перпендикулярной границы I рода)

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{II-II} \,, \tag{2.4.23}$$

$$R'^{II-II} = \frac{\rho_U}{r} \prod_{i=1}^n \frac{\rho_{U1}^j \rho_{U2}^j}{\rho_1^j \rho_2^j}.$$
 (2.4.24)

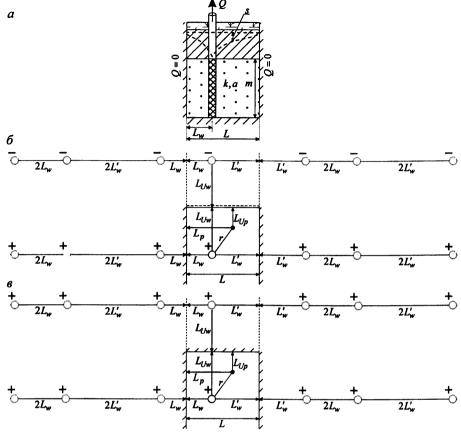


Рис. 2.23. Типовая схема напорного U-образного водоносного пласта с непроницаемыми параллельными границами. a – разрез; δ – план для перпендикулярной границы обеспеченного питания; e – план для непроницаемой перпендикулярной границы.

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.4.8 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$ $\lg s - \lg t$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$ $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u) = \left[W(u) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{'j})\right] \pm \left[W(ur_{U}^{'}) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{Ui}^{'j})\right].$$

Способ прямой линии (для перпендикулярной границы І рода)

Таблица 2.4.9

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg R'^{II-II}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{II-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t) \pm f^{II-II}(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^j, t)}{f^{II-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t) \pm f^{II-II}(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^j, t)}.$$
 (2.4.25)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечное решение (для перпендикулярной границы I рода)

Определения проводимости по понижению на период стационара:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln R'^{II-II} \,. \tag{2.4.26}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.10

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.22	T, a	$s - \lg t$
2.4.25	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} f^{II-II}(r, \rho_i^j, t_0 + t_r) \pm f^{II-II}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_0 + t_r) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f^{II-II}(r, \rho_i^j, t_r) \pm f^{II-II}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_r) \end{bmatrix} \right\}.$$
(2.4.27)

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f^{II-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] - \\
-\left[f^{II-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r}\right)\right]
\end{cases}}{\left[\left[f^{II-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] - \\
-\left[f^{II-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r}\right)\right]
\end{cases}} (2.4.28)$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.4.11

Подбираемые	параметры и	рекомендуемые графики	1
-------------	-------------	-----------------------	---

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.27	Т, а	$s - \lg t_r$
2.4.28	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} f^{II-II}(r, \rho_{i}^{j}, t_{0}) \pm f^{II-II}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0}) - \\ -\left[f^{II-II}(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}) \pm f^{II-II}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0} + t_{r})\right] + \\ +\left[f^{II-II}(r, \rho_{i}^{j}, t_{r}) \pm f^{II-II}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{r})\right] \end{cases}$$
(2.4.29)

Уравнение для стационарного периода (для перпендикулярной границы I рода)

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{II-II} . {(2.4.30)}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии (для перпендикулярной границы I рода)

Таблица 2.4.12

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, $M^2/сут$
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \lg R'^{II-II}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f^{II-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
+ \left[f^{II-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{II-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r}\right)\right] - \\
- \left[f^{II-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
+ \left[f^{II-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{II-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{II-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r}\right)\right]
\end{cases} (2.4.31)$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

<u>Точечное решение</u> (для варианта с перпендикулярной границей II рода) Определение проводимости:

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{II-II} \,. \tag{2.4.32}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.13 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.29	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.4.31	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.4.3. U-образный пласт: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница I или II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для U-образного водоносного пласта (см. начало раздела 2.4);
- фиктивные скважины: два ряда бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 2.24, δ , ϵ ;
- типовая схема: рис. 2.24.

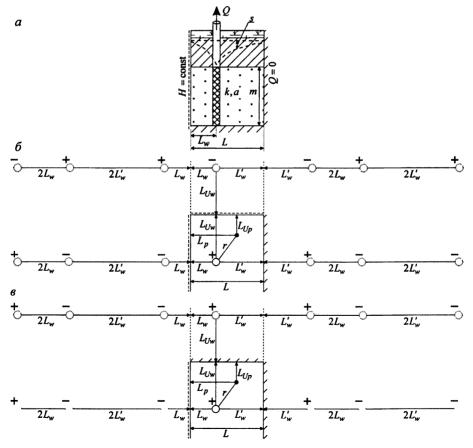


Рис. 2.24. Типовая схема напорного U-образного водоносного пласта со смешанными условиями на параллельных границах. a – разрез; b – план для перпендикулярной границы обеспеченного питания; b – план для непроницаемой перпендикулярной границы.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.4.33);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.4.35) и (2.4.39);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнение (2.4.36).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f^{I-II} \left(r, \rho_i^j, t \right) - f^{I-II} \left(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t \right) \right]. \tag{2.4.33}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.4.14 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	Q	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\frac{1gm(u)-1g-u}{u}$	$I = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.

$$W'(u) = \begin{cases} \left[W(u) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W(ur_{i}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{\prime j}) \right] \pm \\ \pm \left[W(ur_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W(ur_{U_{i}}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{U_{i}}^{\prime j}) \right] \end{cases}.$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f^{I-II}(r_1, \rho_{i,1}^j, t) \pm f^{I-II}(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^j, t)}{f^{I-II}(r_2, \rho_{i,2}^j, t) \pm f^{I-II}(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^j, t)}.$$
(2.4.34)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.33	T, a	$s - \lg t$
2.4.34	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} f^{I-II}(r, \rho_i^j, t_0 + t_r) \pm f^{I-II}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_0 + t_r) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f^{I-II}(r, \rho_i^j, t_r) \pm f^{I-II}(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_r) \end{bmatrix} \right\}.$$
(2.4.35)

Уравнение для квазистационарного периода

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_-} \,. \tag{2.4.36}$$

❖ Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии (для варианта с перпендикулярной границей II рода)

Таблица 2.4.16

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t}{t_0 + t}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\left\{ \left[f^{I-II} \left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \right] - \left\{ - \left[f^{I-II} \left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r} \right) \right] \right\}}{\left\{ \left[f^{I-II} \left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \right] - \left[f^{I-II} \left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r} \right) \right] \right\}} \right\} (2.4.37)$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечное решение

Определение проводимости:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t} \,. \tag{2.4.38}$$

Подбор параметров

Таблица 2.4.17

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.35	T, a	$s - \lg t_r$
2.4.37	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \left[f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0} \right) \right] - \left[f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0} + t_{r} \right) \right] + \left[f^{I-II} \left(r, \rho_{i}^{j}, t_{r} \right) \pm f^{I-II} \left(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{r} \right) \right] \end{cases}$$
(2.4.39)

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f^{I-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
+ \left[f^{I-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{I-II}\left(r_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r}\right)\right] - \\
- \left[f^{I-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0}\right)\right] - \\
- \left[f^{I-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}\right)\right] + \\
+ \left[f^{I-II}\left(r_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}\right) \pm f^{I-II}\left(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r}\right)\right]
\end{cases} (2.4.40)$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.4.18

110gonpacable napawelph in perconcerny emble i parpira		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.4.39	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.4.40	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.5. Угловой водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, ограниченный в плане;
- границы: две пересекающиеся полубесконечные прямолинейные границы;
- фиктивные скважины: количество определяется величиной угла между двумя пересекающимися границами (табл. 2.5.1);
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

Рассматривается три варианта граничных условий (рис. 2.25):

вариант 1: две границы обеспеченного питания (условия І рода);

вариант 2: две непроницаемые границы (условия ІІ рода);

вариант 3: смешанные граничные условия (условия I и II родов).

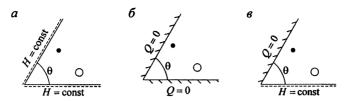


Рис. 2.25. Схематичный план углового пласта. a – две границы обеспеченного питания; b – две непроницаемые границы; b – смещанные граничные условия.

<u>Литература:</u> Щелкачев, Лапук, 1949; Jacob, 1950; Ferris et al., 1962; Чарный, 1963; Van Poolen, 1965; Hantush, 1967a; De Wiest, 1969; Walton, 1970; Боревский и др., 1973; Пыхачев, Исаев, 1973; Streltsova, 1988.

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $f_A^{\ I-I}(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ І рода: определяется уравнением (2.5.15);

 $f_A^{\ I-II}(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние смешанных границ: определяется уравнением (2.5.57);

 $f_A^{II-II}(r,\rho,t)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ II рода: определяется уравнением (2.5.34);

j = 1, 2, ..., n — номер фиктивной скважины, нумерация идет от наблюдательной скважины против часовой стрелки;

 $L_{\it Ap}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до вершины угла, м;

 $L_{{\scriptscriptstyle Aw}}$ – расстояние от опытной скважины до вершины угла, м;

 L_p – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 L_p' — расстояние от наблюдательной скважины до второй границы, используется для угла 90° при определении расстояний до фиктивных скважин по формулам (2.5.5) – (2.5.7), м;

 $L_{\rm w}\,$ – расстояние от опытной скважины до границы, м;

 L'_{w} – расстояние от опытной скважины до второй границы, используется для угла 90° при определении расстояний до фиктивных скважин по формулам (2.5.5) – (2.5.7), м;

n – общее число отраженных скважин: определяется равенством (2.5.12);

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 $R^{\prime I-I}$, $R^{\prime II-II}$, $R^{\prime I-II}$ — свертка расстояний соответственно для границ I рода, II рода и смешанных границ: определяется по равенствам (2.5.19), (2.5.39) и (2.5.60);

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

 $r'_{i} = (\rho_{i}/r)^{2}$ – приведенное расстояние (для обработки по способу эталонных кривых);

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_0 — понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_{mr} — максимальное восстановление в наблюдательной скважине, м;

 $s_r = (s_0 - s)$ — восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

T – проводимость водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

t — время от начала откачки, сут;

 t_0 – длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 t_{r} — время от начала восстановления, сут;

 $t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r}$ — приведенное время для периода восстановления уровней, сут;

u – аргумент функции;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

W'(u) — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 θ – угол между двумя пересекающимися границами, градус;

 θ_j – угол, характеризующий положение *j*-й фиктивной скважины: определяется равенством (2.5.2), градус;

 θ'_j — угол, характеризующий положение *j*-й фиктивной скважины (j = 1, 2) для угла 120°: определяется равенствами (2.5.9) и (2.5.10), м;

 θ_p – угол, характеризующий положение наблюдательной скважины: определяется равенством (2.5.4), градус;

 θ_{w} — угол, характеризующий положение опытной скважины: определяется равенством (2.5.3), градус;

 $ho_0 = r$ – введено для упрощения решений при смещанных граничных условиях;

 ρ_j — расстояние от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины: определяется равенством (2.5.1), м;

 ρ'_{j} — расстояние от наблюдательной скважины до j-й фиктивной скважины (j=1,2) для угла 120°: определяется равенством (2.5.8), м; или расстояние от наблюдательной скважины до j-й фиктивной скважины (j=1,2,3) для угла 90°: определяется равенствами (2.5.5) — (2.5.7), м;

 $ho_{j,1},
ho_{j,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной скважины, м.

Определение расстояний до фиктивных скважин и количества отражений

Порядок отражения фиктивных скважин от двух пересекающихся границ впервые дан в работе [Ferris et al., 1962] и показан на рис. 2.26.

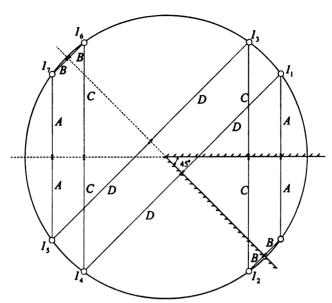


Рис. 2.26. Схема построения отраженных (фиктивных) скважин для угла 45°. I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , I_6 , I_7 – номера фиктивных скважин, размещенных в порядке отражения; A, B, C, D – расстояния от опытной скважины и от фиктивных скважин до границ.

Для удобства расчета расстояний от наблюдательной скважины до фиктивных скважин будем использовать иную схему. Положение опытной скважины и наблюдательной скважины характеризуется расстоянием до вершины угла (точка пересечения двух границ) и расстоянием до границы. Нумерация отраженных скважин осуществляется от опытной скважины по кругу против часовой стрелки (рис. 2.27). Формулы для определения расстояний до фиктивных скважин следующие:

расстояние от наблюдательной скважины до отраженной (фиктивной) (рис. 2.27, a)

$$\rho_j = \sqrt{\left(L_w \cos \theta_j - L_p \cos \theta_p\right)^2 + \left(L_w \sin \theta_j - L_p \sin \theta_p\right)^2} , \qquad (2.5.1)$$

$$\theta_j = \theta_w + 2 \sum_{i=1,3,...}^{j} (\theta - \theta_w) + 2 \sum_{i=2,4,...}^{j} \theta_w,$$
 (2.5.2)

$$\theta_w = \arcsin(L_w/L_{Aw}), \tag{2.5.3}$$

$$\theta_p = \arcsin(L_p / L_{Ap}); \tag{2.5.4}$$

 для угла 90° можно воспользоваться более удобными, чем уравнение (2.5.1), формулами (рис. 2.27, б):

$$\rho_1' = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' - L_p')^2}, \qquad (2.5.5)$$

$$\rho_2' = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} , \qquad (2.5.6)$$

$$\rho_3' = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} ; \qquad (2.5.7)$$

 расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной при угле 120° и при ее симметричном расположении относительно границ (см. рис. 2.30)

$$\rho'_{j} = \sqrt{\frac{L_{Aw}\sqrt{1 + \frac{2}{\sin 60}\cos \theta'_{j} - L_{Ap}\cos \theta_{p}}^{2} + \left(L_{Aw}\sqrt{1 + \frac{2}{\sin 60}\sin \theta'_{j} - L_{Ap}\sin \theta_{p}}\right)^{2}},$$
(2.5.8)

$$\theta_1' = 150 + \arctan(\sin 60) = 190.89$$
, (2.5.9)

$$\theta_2' = 330 - \arctan(\sin 60) = 289.11;$$
 (2.5.10)

 для определения понижения в опытной скважине необходимо знать расстояние от опытной скважины до ее отражения. В этом случае равенство (2.5.1) упрощается:

$$\rho_j = 2L_{Aw} \sin \frac{\theta_j - \theta_w}{2}. \tag{2.5.11}$$

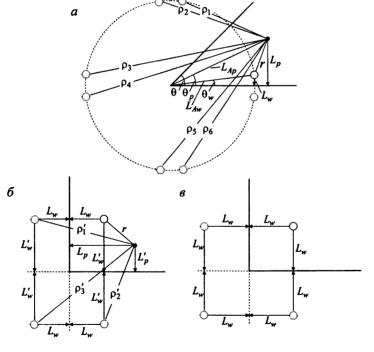


Рис. 2.27. Схематичный план углового пласта с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин. a – для произвольного угла (на примере угла 45°); δ – для угла 90°; ε – угол 90°, опытная скважина находится на равном расстоянии от границ.

Общее правило для определения числа отражений выражается следующим образом: $n = 360/\theta - 1$. (2.5.12)

Прежде чем воспользоваться формулой (2.5.12), необходимо проверить кратность угла θ 180° (для граничных условий I или II рода) или 90° (для смешанных граничных условий). В

противном случае необходимо использовать ближайший угол, который удовлетворяет данному требованию (табл. 2.5.1).

Таблица 2.5.1 Количество фиктивных скважин в зависимости от величины угла и граничных условий

Граничные		Угол, градус							
условия	5	10	15	20	30	45	60	90	180
I – I	71	35	23	17	11	7	5	3	1
II – II	71	35	23	17	11	7	5	3	1
I – II	71	35	23	_	11	7	_	3	_

Замечание

При задании расстояния r между опытной скважиной и наблюдательной и при известных расстояниях от них до границы и до вершины угла должно сохраняться следующее равенство:

$$r = \sqrt{\left(L_{Aw}\cos\theta_w - L_{Ap}\cos\theta_p\right)^2 + \left(L_{Aw}\sin\theta_w - L_{Ap}\sin\theta_p\right)^2} \ . \tag{2.5.13}$$

2.5.1. Угловой водоносный пласт: границы І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для углового пласта (см. начало раздела 2.5);
- знаки расходов фиктивных скважин см. на рис. 2.28, δ , ϵ .
- типовая схема: рис. 2.28.

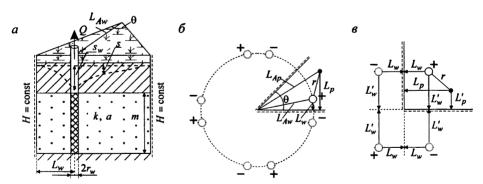


Рис. 2.28. Типовая схема углового водоносного пласта с пересекающимися границами обеспеченного питания. a — разрез; δ — план; s — план для частного случая: угол 90°.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.5.14);
- понижение для угла 90° для нестационарного периода: уравнения (2.5.16) и (2.5.17);
- понижение для стационарного периода: уравнение (2.5.18);
- понижение для угла 90° для стационарного периода: уравнения (2.5.20) (2.5.22);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.5.27) и (2.5.29);
- восстановление для стационарного периода: уравнение (2.5.30).

Откачка с постоянным расходом

& Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f_A^{I-I}(r, \rho_j, t), \qquad (2.5.14)$$

$$f_A^{I-I}(r,\rho_j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right).$$
 (2.5.15)

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Для угла 90° (см. рис. 2.28, ϵ)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_1^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_2^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_3^2}{4at} \right) \right]$$
 (2.5.16)

или то же при определении расстояний по формулам (2.5.5), (2.5.6) и (2.5.7):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{{\rho_1'}^2}{4at} \right) - W \left(\frac{{\rho_2'}^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_3'}^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.5.17}$$

Уравнения для стационарного периода

$$s_m = \frac{0.366Q}{T} \lg R'^{I-I}, \qquad (2.5.18)$$

$$R'^{I-I} = \frac{\prod_{j=1,3,\dots}^{n} \rho_{j}}{\prod_{j=2,4}^{n} \rho_{j}}.$$
 (2.5.19)

Частные случаи для стационарного периода (для угла 90°)

1. Понижение в наблюдательной скважине:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_1 \rho_3}{r \rho_2} \tag{2.5.20}$$

или при определении расстояний по формулам (2.5.5), (2.5.6) и (2.5.7)

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_1' \rho_2'}{r \rho_2'}.$$
 (2.5.21)

2. Понижение в опытной скважине при равном расстоянии от скважины до границ (см. рис. 2.27, в) [Jacob, 1950]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\sqrt{2}L_w}{r} \,. \tag{2.5.22}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 2.5.2 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	Q	$a=\frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\frac{1gw}{u} = \frac{1g-1g}{u}$	$I = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. $W'(u) = W(u) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} W(ur'_{j}).$

Способ прямой линии

Таблица 2.5.3

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg R'^{I-I}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Таблица 2.5.4 Расчетные формулы для определения параметров для угла 90°

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg \frac{\rho_1 \rho_3}{r \rho_2}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t)}{f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t)}.$$
 (2.5.23)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы (по понижению на период стационара)

1. Определение проводимости по понижению в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln R'^{I-I}$$
 (2.5.24)

или для угла 90°

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{\rho_1 \rho_3}{r \rho_2} \,. \tag{2.5.25}$$

2. Определение проводимости по понижению в опытной скважине для угла 90° и при равном расстоянии от скважины до границ (см. рис. 2.27, в):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{\sqrt{2}L_w}{r_w}.$$
 (2.5.26)

Подбор параметров

Таблица 2.5.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.14	Т, а	$s-\lg t$
2.5.23	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_A^{I-I} \left(r, \rho_j, t_0 + t_r \right) - f_A^{I-I} \left(r, \rho_j, t_r \right) \right]. \tag{2.5.27}$$

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) - f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) - f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
 (2.5.28)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.5.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.27	T, a	$s - \lg t_r$
2.5.28	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_{A}^{I-I} \left(r, \rho_{j}, t_{0} \right) - f_{A}^{I-I} \left(r, \rho_{j}, t_{0} + t_{r} \right) + f_{A}^{I-I} \left(r, \rho_{j}, t_{r} \right) \right]. \tag{2.5.29}$$

Уравнение для стационарного периода

$$s_{mr} = \frac{0.366Q}{T} \lg R'^{I-I}. \tag{2.5.30}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.5.7

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \lg R'^{I-I}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t_0) - f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) + f_A^{I-I}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t_0) - f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) + f_A^{I-I}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
 (2.5.31)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Определение проводимости по понижению на период стационара:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mr}} \ln R'^{I-I} \,. \tag{2.5.32}$$

Подбор параметров

Таблица 2.5.8

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.29	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.5.31	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.5.2. Угловой водоносный пласт: границы II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для углового пласта (см. начало раздела 2.5);
- знаки расходов фиктивных скважин см. на рис. 2.29, б, в.
- типовая схема: рис. 2.29.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.5.33);
- понижение для угла 90° для нестационарного периода: уравнения (2.5.35) и (2.5.36);
- понижение для угла 120° для нестационарного периода: уравнение (2.5.37);
- понижение для квазистационарного периода: уравнение (2.5.38);
- понижение для угла 90° для квазистационарного периода: уравнение (2.5.40);
- понижение для угла 120° для квазистационарного периода: уравнение (2.5.41);

- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.5.48) и (2.5.52);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнения (2.5.49) и (2.5.53).

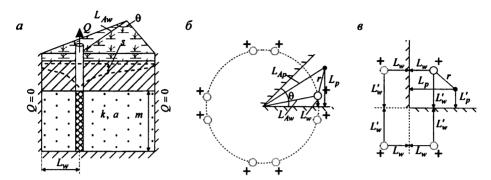


Рис. 2.29. Типовая схема углового водоносного пласта с пересекающимися непроницаемыми границами. a – разрез; δ – план; ϵ – план для частного случая: угол 90°.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f_A^{II-II} \left(r, \rho_j, t \right), \qquad (2.5.33)$$

$$f_A^{II-II}(r,\rho_j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right).$$
 (2.5.34)

Частный случай для нестационарной фильтрации

1. Для угла 90° (см. рис. 2.29, в)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_1^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_2^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_3^2}{4at} \right) \right]$$
 (2.5.35)

или то же при определении расстояний по формулам (2.5.5), (2.5.6) и (2.5.7):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_1'}^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_2'}^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_3'}^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.5.36}$$

2. Для угла 120° и при симметричном расположении опытной скважины относительно границ (рис. 2.30) [*Щелкачев*, *Лапук*, 1949]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_1'}^2}{4at} \right) + W \left(\frac{{\rho_2'}^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.5.37}$$

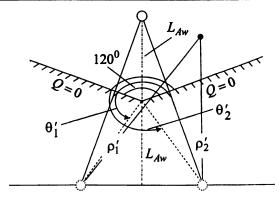


Рис. 2.30. Схематичный план частного случая углового пласта: угол 120°.

Уравнения для квазистационарного периода

$$s = \frac{(n+1)Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{\left(R'^{II-II}\right)^2} = \frac{0.183(n+1)Q}{T} \lg \frac{2.25at}{\left(R'^{II-II}\right)^2},$$
 (2.5.38)

$$R'^{II-II} = \left(r \prod_{j=1}^{n} \rho_j\right)^{1/(n+1)}.$$
 (2.5.39)

Частные случаи для квазистационарного периода

1. Для угла 90° (см. рис. 2.29, в)

$$s = \frac{Q}{\pi T} \ln \frac{2.25at}{\sqrt{r\rho_1 \rho_2 \rho_3}} = \frac{Q}{\pi T} \ln \frac{2.25at}{\sqrt{r\rho_1' \rho_2' \rho_3'}}.$$
 (2.5.40)

2. Для угла 120° при симметричном расположении опытной скважины относительно границ (см. рис. 2.30)

$$s = \frac{3Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{\left(r\rho_1'\rho_2'\right)^{2/3}}.$$
 (2.5.41)

« Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

 Таблица 2.5.9

 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \left(t/r^2\right)$	10W'(v) 10 1	Q	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$I = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u) = W(u) + \sum_{j=1}^{n} W(ur'_{j}).$$

Способ прямой линии

Таблица 2.5.10 Расчетные формулы для определения параметров

		•	•
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
для произвольного угла			
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$T = \frac{0.183(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{\left(R^{\cdot H - H}\right)^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s-\lg R'^{II-II}$	$T = \frac{0.366(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s - \lg \frac{t}{\left(R'^{II-II}\right)^2}$	$T = \frac{0.183(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$
	,	для угла 90°	•
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$T = \frac{0.733Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{\sqrt{r\rho_1 \rho_2 \rho_3}}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s-\lg(r\rho_1\rho_2\rho_3)$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{\frac{A}{2C} - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s - \lg \frac{t}{\sqrt{r\rho_1 \rho_2 \rho_3}}$	$T = \frac{0.733Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$
		для угла 120°	
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$T = \frac{0.55Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{(r\rho_1'\rho_2')^{2/3}}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s-\lg(r\rho_1'\rho_2')$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{\frac{2A}{3C} - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s-\lg\frac{t}{(r\rho_1'\rho_2')^{2/3}}$	$T = \frac{0.55Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t)}{f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t)}.$$
 (2.5.42)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода):

$$s_1 - s_2 = \frac{Q(n+1)}{4\pi T} \ln \frac{t_1 \left(R_2^{\prime II-II}\right)^2}{t_2 \left(R_1^{\prime II-II}\right)^2}.$$
 (2.5.43)

Определение проводимости осуществляется на основе уравнения (2.5.43) тремя различными способами:

- по замерам в двух скважинах на разные моменты времени

$$T = \frac{Q(n+1)}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1 (R_2'^{II-II})^2}{t_2 (R_1'^{II-II})^2};$$
 (2.5.44)

- по замерам в двух скважинах на один момент времени

$$T = \frac{Q(n+1)}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{\left(R_2^{\prime II-II}\right)^2}{\left(R_1^{\prime II-II}\right)^2};$$
 (2.5.45)

- по замерам в одной скважине на разные моменты времени

$$T = \frac{Q(n+1)}{4\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (2.5.46)

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_1)}{f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_2)} = \frac{\lg \frac{2.25at_1}{\left(R_1^{\prime II-II}\right)^2}}{\lg \frac{2.25at_2}{\left(R_2^{\prime II-II}\right)^2}}.$$
 (2.5.47)

Для правой части уравнения (2.5.47) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.

Подбор параметров

Таблица 2.5.11

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.33	T, a	$s - \lg t$
2.5.42	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_A^{II-II} \left(r, \rho_j, t_0 + t_r \right) - f_A^{II-II} \left(r, \rho_j, t_r \right) \right]. \tag{2.5.48}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s = \frac{(n+1)Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183(n+1)Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.5.49)

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии (используются понижения квазистационарного периода)

Таблица 2.5.12

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	
Временное прослеживание	$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	$T = \frac{0.183(n+1)Q}{C}$	

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) - f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) - f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
(2.5.50)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Определение проводимости по единичному замеру восстановления уровня для периода квазистационарного режима на основе уравнения (2.5.49):

$$T = \frac{(n+1)Q}{4\pi s} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183(n+1)Q}{s} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (2.5.51)

Подбор параметров

Таблица 2.5.13

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.48	T, a	$s - \lg t_r$
2.5.50	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_{A}^{II-II} \left(r, \rho_{j}, t_{0} \right) - f_{A}^{II-II} \left(r, \rho_{j}, t_{0} + t_{r} \right) + f_{A}^{II-II} \left(r, \rho_{j}, t_{r} \right) \right]. \tag{2.5.52}$$

Уравнение для квазистационарного периода

$$s_r = \frac{(n+1)Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{\left(R'^{II-II}\right)^2} = \frac{0.183(n+1)Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{\left(R'^{II-II}\right)^2},$$
 (2.5.53)

$$t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r} \,. \tag{2.5.54}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.5.14

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg t'$	$T = \frac{0.183(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{\left(R'^{H-H}\right)^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s - \lg R'^{II-II}$	$T = \frac{0.366(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t')}$
Комбинированное прослеживание	$s-\lg\frac{t'}{\left(R'^{II-II}\right)^2}$	$T = \frac{0.183(n+1)Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0) - f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) + f_A^{II-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0) - f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) + f_A^{II-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
 (2.5.55)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.5.15 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.52	T, a	$s_r - \lg t_r$
2.5.55	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.5.3. Угловой водоносный пласт: границы I и II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для углового пласта (см. начало раздела 2.5);
- знаки расходов фиктивных скважин см. на рис. 2.29, δ , ϵ .
- типовая схема: рис. 2.31.

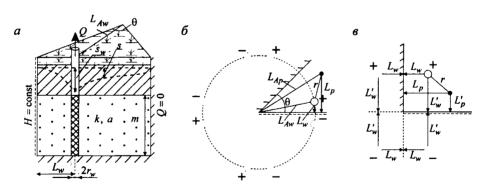


Рис. 2.31. Типовая схема углового водоносного пласта с пересекающимися границами со смешанными условиями. a – разрез; b – план; b – план для частного случая: угол 90°.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.5.56);
- понижение для угла 90° для нестационарного периода: уравнение (2.5.58);
- понижение для стационарного периода: уравнение (2.5.59);
- понижение для угла 90° для стационарного периода: уравнения (2.5.61) (2.5.63);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (2.5.68) и (2.5.70);
- восстановление для стационарного периода: уравнение (2.5.71).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f_A^{I-II}(\mathbf{r}, \rho_j, t) , \qquad (2.5.56)$$

$$f_A^{I-II}(r,\rho_j,t) = \sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left[W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right) + W\left(\frac{\rho_{j+1}^2}{4at}\right) \right], \tag{2.5.57}$$

где $\rho_0 = r$.

Частный случай для нестационарной фильтрации

Для угла 90° (см. рис. 2.31, в)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) + W \left(\frac{\rho_1^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_2^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_3^2}{4at} \right) \right]. \tag{2.5.58}$$

Уравнения для стационарного периода

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln R'^{I-II} = \frac{0.366Q}{T} \lg R'^{I-II}, \qquad (2.5.59)$$

$$R'^{I-II} = \prod_{j=0}^{n} \frac{\rho_{j+2}}{\rho_{j}}, \qquad (2.5.60)$$

где $\rho_0 = r$.

Частные случаи для стационарного периода (для угла 90°, см. рис. 2.31, в)

1. Понижение в наблюдательной скважине

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_2 \rho_3}{r \rho_1}$$
 (2.5.61)

или то же при определении расстояний по формулам (2.5.5), (2.5.6) и (2.5.7):

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_1' \rho_3'}{r \rho_2'} \,. \tag{2.5.62}$$

2. Понижение в опытной скважине при равном расстоянии от скважины до границ (см. рис. 2.31, в) [Jacob, 1950]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\sqrt{8}L_w}{r_{...}} \,. \tag{2.5.63}$$

Таблииа 2.5.16

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	T = Q	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	ig w (u) - ig - u	$I = \frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u) = \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} [W(ur'_j) + W(ur'_{j+1})], r'_0 = 1.$$

Способ прямой линии

Таблица 2.5.17 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg R'^{I-II}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Таблица 2.5.18
Расчетные формулы для определения параметров для угла 90°

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s_m - \lg \frac{\rho_2 \rho_3}{r \rho_1}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{I-II}(\mathbf{r}_1, \rho_{j,1}, t)}{f_A^{I-II}(\mathbf{r}_2, \rho_{j,2}, t)}.$$
 (2.5.64)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы (по понижению на период стационара)

1. Определение проводимости по понижению в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{m}} \ln R'^{I-II}$$
 (2.5.65)

или для угла 90°

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{\rho_2 \rho_3}{r \rho_1}.$$
 (2.5.66)

2. Определение проводимости по понижению в опытной скважине для угла 90° и при равном расстоянии от скважины до границ (см. рис. 2.27, в):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{\text{max}}} \ln \frac{\sqrt{8}L_{\text{w}}}{r_{\text{w}}}.$$
 (2.5.67)

Подбор параметров

Таблица 2.5.19

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.56	T, a	$s-\lg t$
2.5.64	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровия

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_A^{I-II} (r, \rho_j, t_0 + t_r) - f_A^{I-II} (r, \rho_j, t_r) \right]. \tag{2.5.68}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_A^{I-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) - f_A^{I-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{I-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) - f_A^{I-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
 (2.5.69)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 2.5.20

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.68	T, a	$s - \lg t_r$
2.5.69	а	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left[f_{A}^{I-II} \left(r, \rho_{j}, t_{0} \right) - f_{A}^{I-II} \left(r, \rho_{j}, t_{0} + t_{r} \right) + f_{A}^{I-II} \left(r, \rho_{j}, t_{r} \right) \right]. \tag{2.5.70}$$

Уравнение для стационарного периода

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi T} \ln R'^{I-II} = \frac{0.366Q}{T} \lg R'^{I-II}. \tag{2.5.71}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 2.5.21

тае тетые формуны для определения параметрев		
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
дное прослеживание	$s_{mr} - \lg R'^{I-II}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_A^{I-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0) - f_A^{I-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r) + f_A^{I-II}(r_1, \rho_{j,1}, t_r)}{f_A^{I-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0) - f_A^{I-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r) + f_A^{I-II}(r_2, \rho_{j,2}, t_r)}.$$
(2.5.72)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Плошал

Определение проводимости по максимальному восстановлению:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mr}} \ln R'^{I-II}.$$
 (2.5.73)

Подбор параметров

Таблица 2.5.22

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.5.70	Т, а	$s_r - \lg t_r$
2.5.72	а	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

2.6. Круговой водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, замкнутый в плане;
- граница: круговая граница;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- опытная скважина: находится в центре кругового пласта или смещена от центра.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 2.32):

вариант 1: внешний контур – граница обеспеченного питания (граничное условие I рода); вариант 2: внешний контур непроницаемый (граничное условие II рода).

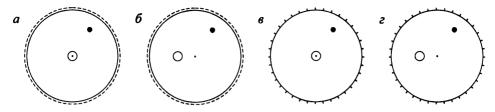


Рис. 2.32. Схематичный план кругового пласта. a, b – граница обеспеченного питания; b, z – непроницаемая граница.

Условные обозначения:

a - пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

F – площадь водоносного пласта (для кругового пласта $F = \pi R^2$), M^2 ;

 h_e — начальная обводненная мощность безнапорного водоносного пласта, м;

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $J_1(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода первого порядка (Приложение 2);

 $J_m(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода *m*-го порядка (Приложение 21);

 L_{pc} – расстояние от центра кругового пласта до наблюдательной скважины, м;

 L_{wc} – расстояние от центра кругового пласта до опытной скважины, м;

m — порядок функции Бесселя;

n — номер корня;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

Q' – величина привлекаемых запасов, которая определяется инфильтрационным питанием и притоком воды из внешней области, м³/сут;

R – радиус кругового пласта (расстояние от центра скважины до границы), м;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

r — приведенное расстояние от центра пласта до точки, где измеряется напор: определяется уравнениями (2.6.4) и (2.6.5), м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

S – водоотдача водоносного пласта;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 s_m — понижение на период стационара в наблюдательной скважине, м;

 $s_{mw}\,$ – понижение на период стационара в опытной скважине, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t – время от начала откачки, сут;

 $t_1,\,t_2$ — время первого и второго замеров (для точечного способа обработки), сут;

 x_n – корни уравнения $J_0(x_n) = 0$ (Приложение 33);

 $x_{n,1}$ – корни уравнения $J_1(x_{n,1}) = 0$ (Приложение 33);

 $x_{n,m}$ – корни уравнения $J_m(x_{n,m}) = 0$ (Приложение 34);

 β – аргумент функций;

- θ угол между векторами, идущими от центра кругового пласта до опытной и наблюдательной скважин: определяется уравнением (2.6.1), градус;
- ρ расстояние от наблюдательной скважины до отраженной скважины: определяется уравнением (2.6.8), м;
- ρ_w расстояние от опытной скважины до отраженной скважины: определяется уравнением (2.6.9), м.

Определение угла

Косинус угла между векторами, идущими от центра кругового пласта до опытной скважины и до наблюдательной, определяется по зависимости

$$\cos\theta = \frac{L_{wc}^2 + L_{pc}^2 - r^2}{2L_{wc}L_{pc}}.$$
 (2.6.1)

2.6.1. На внешнем контуре граница обеспеченного питания: граница І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для кругового пласта (см. начало раздела 2.6);
- внешний контур: граница обеспеченного питания;
- типовая схема: рис. 2.33.

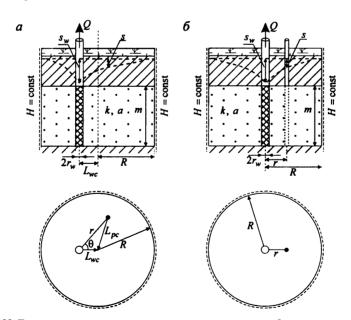


Рис. 2.33. Типовая схема напорного кругового пласта с границей обеспеченного питания. a – разрез и план для опытной скважины, расположенной эксцентрично; δ – разрез и план для опытной скважины, расположенной в центре кругового пласта.

<u>Литература:</u> Muskat, 1937; Щелкачев, Лапук, 1949; Jacob, 1950; Hantush, Jacob, 1960; Бочевер, Веригин, 1961; Биндеман, 1963; Чарный, 1963; De Wiest, 1965; Бочевер, 1968; Бочевер и др., 1969; Боревский и др., 1973; Пыхачев, Исаев, 1973; Щелкачев, 1990.

Список решений:

- понижение в наблюдательной скважине для нестационарного периода: уравнение (2.6.2);
- понижение для нестационарного периода с учетом привлекаемых запасов: уравнение (2.6.3);
- понижение для стационарного периода: уравнения (2.6.6) (2.6.10);
- понижение в опытной скважине для стационарного периода: уравнения (2.6.11) и (2.6.12).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Опытная скважина находится в центре кругового пласта:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[\frac{R}{r_w} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left(x_n \frac{r}{R} \right) \exp\left(-x_n^2 \frac{at}{R^2} \right)}{x_n^2 J_1^2(x_n)} \right]. \tag{2.6.2}$$

2. Для длительных периодов времени и с учетом притока воды из внешней области и инфильтрационного питания (решение учитывает сдвиг опытной скважины от центра кругового пласта)

$$s \approx \frac{Q - Q'}{S\pi R^2} t + \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r}, \qquad (2.6.3)$$

где

 r^* — приведенное расстояние от центра пласта до точки, где измеряется напор, м; Q' — величина привлекаемых запасов, м³/сут.

При произвольном расположении опытной скважины относительно центра кругового пласта приведенное расстояние рассчитывается по следующей зависимости:

$$r^* = r\sqrt{1 - \frac{L_{pc}^2}{R^2} \frac{R^2 - L_{wc}^2}{R^2} - \frac{L_{wc}^2}{R^2} + \frac{r^2}{R^2} \exp\left(\frac{3}{4} - \frac{L_{pc}^2 + L_{wc}^2}{2R^2}\right)},$$
 (2.6.4)

а при расположении опытной скважины в центре кругового пласта

$$r^* = r \exp\left(0.75 - 0.5 \frac{r^2}{R^2}\right). \tag{2.6.5}$$

Уравнения для периода стационара

1. Решение без расчета расположения фиктивной скважины:

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left[\left(\frac{L_{wc}}{rR} \right)^{2} \left(\frac{R^{4}}{L_{wc}^{2}} + L_{pc}^{2} - 2 \frac{L_{pc}R^{2}}{L_{wc}} \cos \theta \right) \right].$$
 (2.6.6)

2. Решение, учитывающее фиктивную скважину (рис. 2.34):

$$s_m = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{L_{wc}\rho}{Rr}, \qquad (2.6.7)$$

$$\rho = \sqrt{\rho_w^2 + r^2 - \rho_w \frac{r^2 + L_{wc}^2 - L_{pc}^2}{L_{wc}}},$$
 (2.6.8)

$$\rho_{w} = \frac{R^2 - L_{wc}^2}{L_{vio}} \,. \tag{2.6.9}$$

Время наступления стационара $t \ge 0.5 \frac{R^2}{a}$.

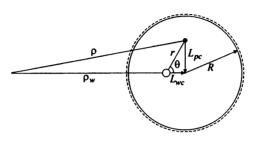


Рис. 2.34. Положение фиктивной скважины в круговом пласте (план).

Частные случаи для стационарного периода

1. Понижение в наблюдательной скважине при расположении опытной скважины в центре кругового пласта

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \,. \tag{2.6.10}$$

2. Понижение в опытной скважине, эксцентрично расположенной в круговом пласте,

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R^2 - L_{wc}^2}{r_w R} \,. \tag{2.6.11}$$

3. Понижение в опытной скважине при ее расположении в центре кругового пласта

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_w} \,. \tag{2.6.12}$$

Способы обработки откачки

Способ прямой линии

Таблица 2.6.1

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Водоотдача
Временное прослеживание	s – t	$S = \frac{Q - Q'}{C\pi R^2}$

Примечание. Если водоносный пласт имеет границу, близкую к круговой границе, то водоотдача определяется по формуле $S = \frac{Q-Q'}{CF}$, где F – площадь водоносного пласта.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{2.6.13}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы; f – выражения в квадратных скобках уравнения (2.6.2) для первой (f_1) и второй (f_2) наблюдательных скважин.

Точечные способы

- 1. Определение проводимости по понижению на период стационара:
 - при произвольном расположении опытной скважины

$$T = \frac{Q}{4\pi s_m} \ln \left[\left(\frac{L_{wc}}{rR} \right)^2 \left(\frac{R^4}{L_{wc}^2} + L_{pc}^2 - 2 \frac{L_{pc}R^2}{L_{wc}} \cos \theta \right) \right]$$
(2.6.14)

или

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{L_{wc}\rho}{Rr}; \qquad (2.6.15)$$

по понижению в опытной скважине

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{R^2 - L_{wc}^2}{r_w R}; \qquad (2.6.16)$$

 по понижению в наблюдательной скважине при расположении опытной скважины в центре кругового пласта

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{R}{r}; \qquad (2.6.17)$$

 по понижению в опытной скважине при ее расположении в центре кругового пласта

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{R}{r_w}.$$
 (2.6.18)

2. Способ разности понижений

Определение водоотдачи водоносного пласта по замерам в одной скважине на разные моменты времени:

$$S = \frac{(Q - Q')(t_1 - t_2)}{\pi R^2 (s_1 - s_2)} = \frac{(Q - Q')(t_1 - t_2)}{F(s_1 - s_2)}.$$
 (2.6.19)

Подбор параметров

Таблица 2.6.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.6.2	Т, а	$s - \lg t$
2.6.13	а	$s_1/s_2 - \lg t$

2.6.2. Непроницаемый коитур пласта: граница II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для кругового пласта (см. начало раздела 2.6);
- внешний контур: непроницаемая граница;
- типовая схема: рис. 2.35.

Литература: Бочевер, Веригин, 1961; Биндеман, 1963; Бочевер, 1968; Боревский и др., 1973.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение в наблюдательной скважине при любом расположении опытной скважины относительно центра кругового пласта: уравнение (2.6.20);
- определение понижения для практических расчетов: уравнение (2.6.21);
- понижение с учетом привлекаемых запасов: уравнение (2.6.22);
- понижение при нахождении опытной скважины в центре кругового пласта: уравнения (2.6.23) и (2.6.25);
- понижение на границе при нахождении опытной скважины в центре кругового пласта: уравнения (2.6.24) и (2.6.26).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \begin{bmatrix} 2\frac{at}{R^2} + \ln\frac{R}{r^*} - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(x_n \frac{L_{pc}}{R}\right) J_0\left(x_n \frac{L_{wc}}{R}\right) \exp\left(-x_n^2 \frac{at}{R^2}\right)}{\left(x_n^2 - m^2\right) J_0^2\left(x_n\right)} - \\ -4\sum_{m=1}^{\infty} \cos(m\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_m\left(x_{n,m} \frac{L_{pc}}{R}\right) J_m\left(x_{n,m} \frac{L_{wc}}{R}\right) \exp\left(-x_{n,m}^2 \frac{at}{R^2}\right)}{\left(x_{n,m}^2 - m^2\right) J_m^2\left(x_{n,m}\right)} \end{bmatrix}, (2.6.20)$$

где r^* – приведенное расстояние от центра пласта до точки, где измеряется напор: определяется уравнениями (2.6.4) и (2.6.5), м.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для практических расчетов уравнение (2.6.20) упрощается:

$$s \approx \frac{Q}{2\pi T} \left[2\frac{at}{R^2} + \ln\frac{R}{r^*} \right] = \frac{Q}{S\pi R^2} t + \frac{Q}{2\pi T} \ln\frac{R}{r^*}.$$
 (2.6.21)

2. Выражение (2.6.21) с учетом величины привлекаемых запасов (предполагается, что величина привлекаемых запасов не меняется со временем) записывается следующим образом:

$$s \approx \frac{Q - Q'}{S\pi R^2} t + \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r^*},$$
 (2.6.22)

где Q' – величина привлекаемых запасов, м³/сут.

130 Раздел 2.

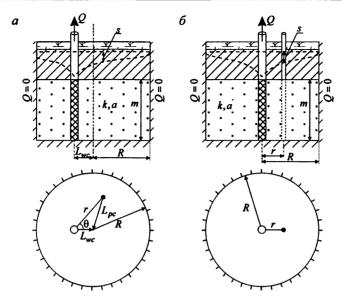


Рис. 2.35. Типовая схема напорного кругового пласта с непроницаемой внешней границей. a – разрез и план для опытной скважины, расположенной эксцентрично; b – разрез и план для опытной скважины, расположенной в центре кругового пласта.

3. Решения, полученные при расположении опытной скважины в центре кругового пласта:

общий случай

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[2\frac{at}{R^2} + \frac{r^2}{2R^2} + \ln\frac{R}{r} - 0.75 - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(x_{n,1}\frac{r}{R}\right) \exp\left(-x_{n,1}^2\frac{at}{R^2}\right)}{x_{n,1}^2 J_0^2\left(x_{n,1}\right)} \right]; \qquad (2.6.23)$$

понижение на контуре кругового пласта

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[2\frac{at}{R^2} - 0.25 - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-x_{n,1}^2 \frac{at}{R^2}\right)}{x_{n,1}^2 J_0(x_{n,1})} \right]; \tag{2.6.24}$$

понижение в наблюдательной скважине для времени t ≥ (0.05 ÷ 0.1) $\frac{R^2}{a}$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[\frac{at}{R^2} + \frac{r^2}{2R^2} + \ln\frac{R}{r} - 0.75 \right]; \tag{2.6.25}$$

— понижение на контуре кругового пласта для времени $t \ge (0.05 \div 0.1) \frac{R^2}{a}$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[2\frac{at}{R^2} - 0.25 \right]. \tag{2.6.26}$$

Замечание

Для безнапорного водоносного пласта при расположении опытной скважины в центре кругового пласта откачка может проводиться ограниченное время. Длительность откачки определяется равенством [Бочевер, Веригин, 1961]

$$t = \left(\frac{\pi k h_e^2}{2Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{0.47R}{r_w}\right) \frac{R^2}{a} \,. \tag{2.6.27}$$

Способы обработки откачки

Способ прямой линии

Таблица 2.6.3

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Водоотдача
Временное прослеживание	s – t	$S = \frac{Q}{C\pi R^2}$

Примечание. Если водоносный пласт имеет границу, близкую к круговой, то водоотдача определяется по формуле $S = \frac{Q}{CF}$, где F — площадь водоносного пласта. С учетом привлекаемых запасов значение водоотдачи рассчитывается как $S = \frac{Q-Q'}{CF}$.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{2.6.28}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы; f — выражения в квадратных скобках уравнений (2.6.20), (2.6.21), (2.6.23), (2.6.24), (2.6.25) или (2.6.26) для первой (f_1) и второй (f_2) наблюдательных скважин.

Точечные способы

Способ разности понижений

Определение водоотдачи водоносного пласта по замерам в одной скважине на разные моменты времени:

$$S = \frac{Q(t_1 - t_2)}{\pi R^2(s_1 - s_2)} = \frac{Q(t_1 - t_2)}{F(s_1 - s_2)}$$
(2.6.29)

или с учетом привлекаемых запасов:

$$S = \frac{(Q - Q')(t_1 - t_2)}{\pi R^2(s_1 - s_2)} = \frac{(Q - Q')(t_1 - t_2)}{F(s_1 - s_2)}.$$
 (2.6.30)

Подбор параметров

Таблииа 2.6.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.6.20	Т, а	$s-\lg t$
2.6.28	а	$s_1/s_2 - \lg t$

2.7. Планово-анизотропный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, планово-анизотропный, неограниченный в плане;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 2.36.

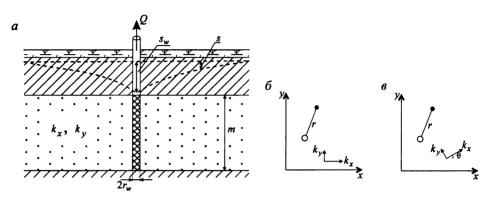


Рис. 2.36. Типовая схема неограниченного планово-анизотропного напорного пласта. a — разрез; δ , ϵ — план при совпадении (δ) и несовпадении (ϵ) координатных осей с направлением анизотропии.

<u>Литература:</u> Шестаков, 1955; Hantush, 1966a; Hantush, Thomas, 1966; Neuman et al., 1984; Kruseman, Ridder, 1994; Selected contributions..., 1994.

Условные обозначения:

- a пьезопроводность водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;
- a' отношение пьезопроводностей или проводимостей, определенных по первому и второму лучам: определяется уравнением (2.7.8);
- a'' отношение пьезопроводностей или проводимостей, определенных по первому и третьему лучам: определяется уравнением (2.7.19);
- a_e, b_e длины основных осей эллипса, построенного по линии равных понижений на момент времени t, м;
- $a_r = \frac{T_r}{S}$ пьезопроводность по направлению от опытной скважины до наблюдательной скважины, м²/сут;
- $a_{ri} = \frac{T_{ri}}{S}$ пьезопроводность по *i*-му лучу скважин, м²/сут;
- i = 1, 2, 3 номер луча;
- $k_e = \sqrt{k_x k_y} \, -$ эффективный коэффициент фильтрации, м/сут;
- k_x, k_y коэффициенты фильтрации в направлении координатных осей x и y, м/сут;
- т мощность водоносного пласта, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 – расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

 r_1', r_2' – приведенные расстояния до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r'_p — приведенное расстояние до наблюдательной скважины: определяется уравнением (2.7.37), м;

 r'_w – приведенный радиус опытной скважины: определяется уравнением (2.7.36), м;

S — водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 — понижение в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_w — понижение в опытной скважине, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

 $T_e = \sqrt{T_x T_y}$ – эффективная проводимость, м²/сут;

 T_{ei} – эффективная проводимость, определенная по *i*-му лучу, м²/сут;

 T_r — проводимость в направлении от опытной скважины до наблюдательной скважины: определяется уравнением (2.7.6), м²/сут;

 T_{ri} – проводимость по *i*-му лучу, м²/сут;

 T_x , T_y — проводимости в направлении координатных осей x и y, м²/сут;

t – время от начала откачки, сут;

и – аргумент функции: определяется уравнением (2.7.32);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

х, у - координаты наблюдательной скважины, м;

∆s – отношение разности понижений, определяется уравнением (2.7.44), м;

 θ – угол между координатной осью x и лучом, направленным от опытной скважины до наблюдательной скважины, градус;

 θ_1 – угол между координатной осью x и первым лучом, градус;

 θ_{2}^{-} – угол между координатной осью x и вторым лучом, градус;

 θ' – угол между первым лучом и вторым лучом, градус;

 θ'' – угол между первым лучом и третьим лучом, градус;

 χ_{XY} — коэффициент плановой анизотропии: определяется уравнением (2.7.18) или (2.7.38).

Список решений (для нестационарного периода):

- общее решение для понижения в наблюдательной скважине: уравнение (2.7.1);
- понижение при совпадении координатных осей с направлением анизотропии: уравнение (2.7.3);
- понижение при несовпадении координатных осей с направлением анизотропии: уравнение (2.7.4);
- понижение при известном значении проводимости по определяемому лучу: уравнение (2.7.5).

Откачка с постоянным расходом

***** Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T_e} W \left(\frac{r^2}{4a_r t}\right),\tag{2.7.1}$$

$$T_e = \sqrt{T_x T_y} \ . \tag{2.7.2}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Понижение при совпадении координатных осей с направлением анизотропии, когда ось x и луч опытная – наблюдательная скважины совпадают (см. рис. 2.36, δ):

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_x T_y}} W\left(\frac{r^2 S}{4T_x t}\right). \tag{2.7.3}$$

2. Понижение при несовпадении координатных осей с направлением анизотропии, когда ось x и луч опытная — наблюдательная скважины находятся под углом θ (см. рис. 2.36, θ):

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_x T_y}} W \left[\frac{r^2 \left(T_y \cos^2 \theta + T_x \sin^2 \theta \right) S}{4T_x T_y t} \right]. \tag{2.7.4}$$

3. Если проводимость в направлении от наблюдательной скважины до опытной скважины T_r известна, то уравнение (2.7.4) записывается в следующей форме:

$$s = \frac{Q}{4\pi T_e} W \left(\frac{r^2 S}{4T_r t} \right), \tag{2.7.5}$$

где

$$T_r = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta + T_x \sin^2 \theta} = r^2 \frac{T_x T_y}{T_y x^2 + T_x y^2}.$$
 (2.7.6)

Уравнение (2.7.5) аналогично уравнению (2.7.1), записанному в иной форме.

***** Способы обработки откачки

Алгоритм определения параметров Hantush [1966a]

Обработка основана на схожести уравнений (2.7.1) и (2.1.1) для схемы изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1), где вместо проводимости пласта определяется эффективная проводимость T_{ei} , а вместо пьезопроводности пласта — пьезопроводность по лучу a_{ri} .

Рассматривается два варианта: 1) направление анизотропии известно заранее и 2) направление анизотропии неизвестно.

Вариант 1. Направление анизотропии известно заранее, и имеются два луча наблюдательных скважин (рис. 2.37).

1. По схеме изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1) определяем эффективную

проводимость T_{ei} для каждого луча и вычисляем эффективную проводимость для водоносного пласта как среднее значение:

$$T_e = \frac{T_{e1} + T_{e2}}{2} \,. \tag{2.7.7}$$

- 2. По схеме изотропного водоносного пласта (раздел 2.1) определяем пьезопроводности a_{r1} и a_{r2} по скважинам, находящимся соответственно на первом луче и на втором.
- 3. Отношение пьезопроводностей a' по двум лучам равно отношению проводимостей по этим лучам T_{r1} и T_{r2} :

$$a' = \frac{a_{r1}}{a_{r2}} = \frac{T_{r1}}{T_{r2}},\tag{2.7.8}$$

отношение которых, в свою очередь, на основе уравнения (2.7.6) определяется как

$$\frac{T_{r1}}{T_{r2}} = \frac{T_y \cos^2 \theta_2 + T_x \sin^2 \theta_2}{T_y \cos^2 \theta_1 + T_x \sin^2 \theta_1},$$
 (2.7.9)

гле

 θ_1 – угол между координатной осью x и первым лучом, градус;

 θ_2 – угол между координатной осью x и вторым лучом, градус.

4. Используя (2.7.8) и (2.7.9), определяем проводимость по оси y:

$$T_{y} = T_{e} \sqrt{\frac{\sin^{2} \theta_{2} - a' \sin^{2} \theta_{1}}{a' \cos^{2} \theta_{1} - \cos^{2} \theta_{2}}}.$$
 (2.7.10)

5. Определяем проводимость по оси x на основе (2.7.2):

$$T_{x} = \frac{T_{e}^{2}}{T_{v}}. (2.7.11)$$

6. По уравнению (2.7.6) определяем проводимость для каждого луча:

$$T_{r1} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta_1 + T_x \sin^2 \theta_1},$$
 (2.7.12)

$$T_{r2} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta_2 + T_x \sin^2 \theta_2} \,. \tag{2.7.13}$$

7. Вычисляем водоотдачу как среднее значение параметров, определенных по двум лучам:

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{r1}}{a_{r1}} + \frac{T_{r2}}{a_{r2}} \right). \tag{2.7.14}$$

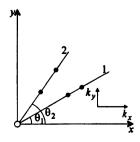


Рис. 2.37. Схема расположения наблюдательных скважин по двум лучам.

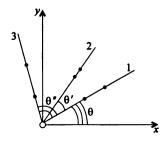


Рис. 2.38. Схема расположения наблюдательных скважин по трем лучам.

Вариант 2. Предполагается, что направление анизотропии неизвестно, и имеются три луча наблюдательных скважин (рис. 2.38).

1. По схеме изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1) определяется эффективная проводимость T_{ei} для каждого луча и вычисляется эффективная проводимость для водоносного пласта как среднее значение:

$$T_e = \frac{(T_e)_1 + (T_e)_2 + (T_e)_3}{3}.$$
 (2.7.15)

- 2. По схеме изотропного водоносного пласта (раздел 2.1) определяются пьезопроводности по скважинам, находящимся на первом a_{r1} , на втором a_{r2} и на третьем a_{r3} лучах.
- 3. Отношение пьезопроводностей a' по первому и второму лучам равно отношению проводимостей по этим лучам T_{r1} и T_{r2} :

$$a' = \frac{a_{r1}}{a_{r2}} = \frac{T_{r1}}{T_{r2}},\tag{2.7.16}$$

отношение которых на основе уравнения (2.7.6) определяется как

$$\frac{T_{r1}}{T_{r2}} = \frac{T_y \cos^2(\theta + \theta') + T_x \sin^2(\theta + \theta')}{T_y \cos^2\theta + T_x \sin^2\theta} = \frac{\cos^2(\theta + \theta') + \chi_{XY}^2 \sin^2(\theta + \theta')}{\cos^2\theta + \chi_{XY}^2 \sin^2\theta}, \quad (2.7.17)$$

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{T_x}{T_y}}, \qquad (2.7.18)$$

где

 θ — неизвестный угол между координатной осью x и первым лучом, градус;

heta' – известный угол между первым лучом и вторым лучом, градус.

4. Отношение пьезопроводностей a'' по первому и третьему лучам равно отношению проводимостей по этим лучам T_{r1} и T_{r3} :

$$a'' = \frac{a_{r1}}{a_{r3}} = \frac{T_{r1}}{T_{r3}},$$
 (2.7.19)

отношение которых на основе уравнения (2.7.19) определяется как

$$\frac{T_{r1}}{T_{r3}} = \frac{T_y \cos^2(\theta + \theta'') + T_x \sin^2(\theta + \theta'')}{T_y \cos^2\theta + T_x \sin^2\theta} = \frac{\cos^2(\theta + \theta'') + \chi_{XY}^2 \sin^2(\theta + \theta'')}{\cos^2\theta + \chi_{XY}^2 \sin^2\theta}, \quad (2.7.20)$$

где θ'' — известный угол между первым лучом и третьим, градус.

5. Решая уравнения (2.7.17) и (2.7.20) для параметров θ и χ_{XY} , получим выражения для определения неизвестного угла θ

$$\tan(2\theta) = -2\frac{(a''-1)\sin^2\theta' - (a'-1)\sin^2\theta''}{(a''-1)\sin(2\theta') - (a'-1)\sin(2\theta'')}$$
(2.7.21)

и коэффициента плановой анизотропии χ_{XY}

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{\cos^2(\theta + \theta'') - a'\cos^2\theta}{a'\sin^2\theta - \sin^2(\theta + \theta'')}}$$
 (2.7.22)

или

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{\cos^2(\theta + \theta'') - a''\cos^2\theta}{a''\sin^2\theta - \sin^2(\theta + \theta'')}}.$$
 (2.7.23)

6. На основе зависимостей (2.7.2) и (2.7.18) определяем проводимость по оси у:

$$T_{y} = \frac{T_{e}}{\chi_{XY}}. (2.7.24)$$

7. На основе зависимости (2.7.2) и уже известной величины T_y определяем проводимость по оси x:

$$T_x = \frac{T_e^2}{T_y} \,. {(2.7.25)}$$

- 8. По уравнению (2.7.6) и значениям T_x и T_y определяем T_{r1} .
- 9. На основе равенства (2.7.16) и значения T_{r1} определяем T_{r2} :

$$T_{r2} = \frac{T_{r1}}{a'}. (2.7.26)$$

10. На основе равенства (2.7.19) и значения T_{r1} определяем T_{r3} :

$$T_{r3} = \frac{T_{r1}}{a^r} \,. \tag{2.7.27}$$

11. Вычисляем водоотдачу как среднее значение этих параметров, определенных по трем лучам:

$$S = \frac{1}{3} \left(\frac{T_{r1}}{a_{r1}} + \frac{T_{r2}}{a_{r2}} + \frac{T_{r3}}{a_{r3}} \right). \tag{2.7.28}$$

Алгоритм определения параметров Hantush-Thomas [1966]

В планово-анизотропном пласте линии равных понижений вокруг опытной скважины имеют форму эллипсов с коэффициентом сжатия, равным b_e/a_e (рис. 2.39). Здесь a_e и b_e — длины основных осей эллипса, построенного по линии равных понижений на момент времени t.

Алгоритм определения параметров.

1. По схеме изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1) определяем эффективную проводимость T_e и пьезопроводность a_r .

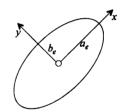


Рис. 2.39. Схема для определения параметров по способу Hantush-Thomas.

- 2. По уравнению (2.7.1) для заданного момента времени определяем расстояния на имеющихся лучах скважин с равными понижениями.
- 3. По точкам (наблюдаемым или расчетным) с равными значениями понижений строим эллипс и определяем длины основных осей эллипса a_e и b_e для выбранного момента времени.
- 4. Проводимость по линии большей проницаемости

$$T_x = \frac{a_e}{b_a} T_e \,. \tag{2.7.29}$$

5. Проводимость по линии меньшей проницаемости

$$T_y = \frac{b_e}{a_e} T_e \,. \tag{2.7.30}$$

6. Определяем значение функции W(u) на основе уравнения (2.7.1), где для значения понижения берем величину, рассчитанную ранее для построения эллипса:

$$W(u) = \frac{4\pi s T_e}{Q} , \qquad (2.7.31)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4T_r t} = \frac{a_e b_e S}{4T_e t} \,. \tag{2.7.32}$$

Последнее уравнение основано на том, что $T_r = \frac{r^2 T_e}{a_e b_e}$.

7. Решаем обратную задачу — по значению функции W(u) находим значение аргумента u. Отсюда определяем водоотдачу:

$$S = \frac{4T_e t}{a_e b_e} u \ . \tag{2.7.33}$$

Для уточнения водоотдачи желательно повторить процедуру ее определения для различных значений понижения.

Алгоритм определения параметров Шестакова [1955]

Данное решение получено на основе разности понижений в двух скважинах на период квазистационарного режима подземных вод.



Рис. 2.40. Схема для определения параметров по способу Шестакова.

Обработка откачки предполагает следующие условия проведения эксперимента (рис. 2.40):

- направление анизотропии известно;
- координатные оси совпадают с направлениями максимальной и минимальной проницаемости;
- имеется не менее двух наблюдательных скважин;
- имеются данные о понижении в опытной скважине:
- первый луч (опытная наблюдательная скважины) находится по оси x;
- второй луч (опытная наблюдательная скважины) находится по оси у.

Для определения параметров необходимы следующие зависимости.

 Разность понижений в опытной и наблюдательной скважинах в планово-анизотропном пласте на один момент времени периода квазистационарного или стационарного режима определяется уравнением

$$s_w - s = \frac{Q}{2\pi m k_a} \ln \frac{r_p'}{r_w'}, \qquad (2.7.34)$$

$$k_e = \sqrt{k_x k_y} \,, \tag{2.7.35}$$

$$r'_{w} = \frac{r_{w}}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{k_{y}}{k_{x}}} \right) = \frac{r_{w}}{2} \left(1 + \chi_{XY} \right),$$
 (2.7.36)

$$r'_p = \sqrt{y^2 + x^2 \frac{k_y}{k_x}} = \sqrt{y^2 + x^2 \chi_{XY}^2}$$
, (2.7.37)

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \,. \tag{2.7.38}$$

2. Приведенное расстояние до наблюдательной скважины (скважина №1), находящейся на оси x, исходя из равенства (2.7.37) и значений координат ($x = r_1$ и y = 0) записывается как

$$r_{1}' = r_{1} \sqrt{\frac{k_{y}}{k_{x}}} \,. \tag{2.7.39}$$

 Подставляя (2.7.39) в (2.7.34), получаем зависимость для эффективного коэффициента фильтрации, определенного по разности понижений в опытной скважине и скважине №1:

$$k_e = \frac{Q}{2\pi m(s_w - s_1)} \left(\ln \frac{r_1}{r_w} + \ln \frac{2\chi_{XY}}{1 + \chi_{XY}} \right). \tag{2.7.40}$$

4. Приведенное расстояние до наблюдательной скважины (скважина №2), находящейся на оси y, исходя из равенства (2.7.37) и значений координат (x = 0 и $y = r_2$) записывается как

$$r_2' = r_2. (2.7.41)$$

 Подставляя (2.7.41) в (2.7.34), получаем зависимость для эффективного коэффициента фильтрации, определенного по разности понижений в опытной скважине и скважине №2:

$$k_e = \frac{Q}{2\pi m(s_w - s_2)} \left(\ln \frac{r_2}{r_w} - \ln \frac{1 + \chi_{XY}}{2} \right). \tag{2.7.42}$$

6. Решая уравнения (2.7.40) и (2.7.42), получаем

$$\ln(1 + \chi_{XY}) = \ln \frac{2r_2}{r_w} - \Delta s \ln \frac{2r_1}{r_w} + \Delta s \ln(1 + \frac{1}{\chi_{XY}}), \qquad (2.7.43)$$

$$\Delta s = \frac{s_w - s_2}{s_w - s_1} \,. \tag{2.7.44}$$

7. При неравенстве $\chi^2 \le 500$ уравнение (2.7.43) записывается в упрощенном виде:

$$\ln \chi_{XY} = \frac{8}{3 + \Delta s} \left(\ln \frac{r_2}{r_w} - \Delta s \ln \frac{r_1}{r_w} \right). \tag{2.7.45}$$

8. При неравенстве $\chi^2 > 500$

$$\ln(1 + \chi_{XY}) = \ln \frac{2r_2}{r_w} - \Delta s \ln \frac{2r_1}{r_w}.$$
 (2.7.46)

Алгоритм определения параметров следующий:

- определяем Δs по формуле (2.7.44);
- в зависимости от предполагаемого соотношения коэффициентов фильтрации по формуле (2.7.45) или (2.7.46) определяем коэффициент плановой анизотропии χ_{XY} ;
- по формуле (2.7.40) или (2.7.42) вычисляем k_e ;
- умножив уравнения (2.7.35) и (2.7.38), определяем k_v :

$$k_{\nu} = k_e \chi_{XY}; \qquad (2.7.47)$$

- определяем k_* :

$$k_x = \frac{k_e^2}{k_y} \,. \tag{2.7.48}$$

Для расчета χ_{XY} возможно также применение обобщенной формулы (2.7.43), которая не зависит от соотношения коэффициентов фильтрации k_x и k_y . Но в этом случае определение χ_{XY} осуществляется подбором.

Способ Шестакова применяется также и к безнапорному потоку. В этом случае вместо величины Δs вводится величина Δh^2 :

$$\Delta h^2 = \frac{h_y^2 - h_w^2}{h_x^2 - h_w^2},\tag{2.7.49}$$

гле

 h_w, h_x, h_y — напоры в опытной скважине и наблюдательных скважинах №1 и №2, м.

Подбор параметров

Таблица 2.7.1 Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.7.1	T_e, a_r	$s - \lg t$
2.7.3, 2.7.4	T_x, T_y, S	

Замечание

По уравнению (2.7.1) определяются эффективная проводимость T_e и пьезопроводность a_r (для каждого луча скважин своя). Для расчета параметров можно воспользоваться всеми возможными способами обработки откачки в изотропном водоносном пласте (см. раздел 2.1), где $T_e = T$ и $a_r = a$.

2.8. Полузакрытый пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорно-безнапорный, изотропный, часть водоносного горизонта выходит на поверхность и имеет безнапорный режим;
- понижение определяется в напорной части водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 2.41.

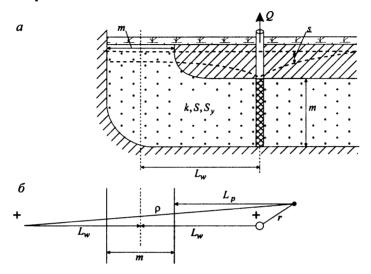


Рис. 2.41. Типовая схема полузакрытого пласта. a – разрез; b – план.

Литература: Бочевер, Веригин, 1961.

Условные обозначения:

a – пьезопроводность водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

k – коэффициет фильтрации водоносного пласта, м/сут;

 L_{p} – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 L_{w} – расстояние от опытной скважины до границы, м;

т – мощность водоносного пласта и ширина открытой (безнапорной) части, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 R_1 , R_2 — безразмерные гидравлические сопротивления;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

S – водоотдача водоносного пласта;

 S_y – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

t – время от начала откачки, сут;

u – аргумент функции;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 ρ — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, определяется равенством (2.8.1), м.

Определение расстояния до фиктивной скважины

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ . \tag{2.8.1}$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (2.8.2).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi km} (R_1 + R_2), \tag{2.8.2}$$

$$R_1 = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + W\left(\frac{\rho^2}{4at}\right),\tag{2.8.3}$$

$$R_2 \approx \frac{2S_y m}{S} \sqrt{\frac{\pi}{at}} \exp\left(\frac{r^2 - (L_w - L_p)^2}{4at}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{L_w + L_p}{2\sqrt{at}}\right). \tag{2.8.4}$$

Выражение (2.8.4) для гидравлического сопротивления R_2 справедливо для времени $t \ge \left(3 \div 5\right) \frac{S_y^2 m^2}{-S^2}$.

***** Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 2.8.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
2.8.2	k, S, S_y	$s - \lg t$

2.9. Плановая линейная граница ограниченной длины

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, однородный, изотропный;
- граница: плановая граница обеспеченного питания (І род) ограниченной длины;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, емкость скважины не учитывается;
- опытная и наблюдательная скважины располагаются в пределах длины границы.
- типовая схема: рис. 2.42.

<u>Литература:</u> Muskat, 1937; Theis, 1963; Walton, 1970.

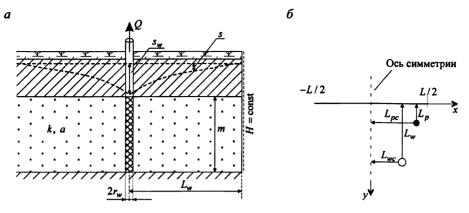


Рис. 2.42. Типовая схема напорного полуограниченного водоносного пласта с короткой границей обеспеченного питания. a – разрез; δ – план.

Условные обозначения:

 C_1 , C_2 – константы;

L – длина границы, м;

 L_{p} – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 $L_{pc}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до оси симметрии границы, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы, м;

 $L_{wc}\,$ – расстояние от опытной скважины до оси симметрии границы, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 s_{mw} – понижение в опытной скважине на период стационара, м;

T – проводимость водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

$$\zeta$$
, η — параметры определяются из системы уравнений
$$\begin{cases} C_1 = \cosh(\zeta)\cos(\eta) \\ C_2 = \sinh(\zeta)\sin(\eta) \end{cases}$$

(Приложение 37);

 ζ_w , η_w – параметры для опытной скважины: определяются из системы уравнений (2.9.2);

 ζ_p, η_p — параметры для наблюдательной скважины: определяются из системы уравнений (2.9.3).

Список решений:

- понижение в наблюдательной скважине для стационарного периода: уравнение (2.9.1);
- понижение в опытной скважине для стационарного периода: уравнения (2.9.4), (2.9.5) и (2.9.6).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left[\frac{\cosh(\zeta_{p} + \zeta_{w}) - \cos(\eta_{p} - \eta_{w})}{\cosh(\zeta_{p} - \zeta_{w}) - \cos(\eta_{p} - \eta_{w})} \times \frac{\cosh(\zeta_{p} + \zeta_{w}) - \cos(\eta_{p} + \eta_{w})}{\cosh(\zeta_{p} - \zeta_{w}) - \cos(\eta_{p} + \eta_{w})} \right], \quad (2.9.1)$$

где ζ_w , η_w определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} L_{wc} = \frac{L}{2} \cosh(\zeta_w) \cos(\eta_w) \\ L_w = \frac{L}{2} \sinh(\zeta_w) \sin(\eta_w); \end{cases}$$
 (2.9.2)

 ζ_p,η_p определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} L_{pc} = \frac{L}{2} \cosh(\zeta_p) \cos(\eta_p) \\ L_p = \frac{L}{2} \sinh(\zeta_p) \sin(\eta_p). \end{cases}$$
 (2.9.3)

Частные случаи для стационарного периода

 Для опытной скважины выражение для понижения записывается в следующем виде [Muskat, 1937]:

$$s_{mw} = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{L \sinh(\zeta_w) \left[\sinh^2(\zeta_w) + \sin^2(\eta_w)\right]}{r_w \sin(\eta_w)} = \\ = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{4L_w \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} - r_w^2\right)^2 + L_w^2 L^2}}{r_w \left[\frac{L^2}{4} - r_w^2 + \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} - r_w^2\right)^2 + L_w^2 L^2}} \right] \end{cases}$$
(2.9.4)

2. Понижение в опытной скважине, расположенной на оси симметрии границы ($L_{wc} = 0$) при условии, что $L_w/L << 1$ (рис. 2.43, a),

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left[\frac{2L_w}{r_w} \left(1 + 4\frac{L_w^2}{L^2} \right) \right]. \tag{2.9.5}$$

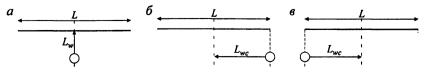


Рис. 2.43. Частные случаи расположения опытной скважины относительно границы (план). a — посередине границы; δ , s — на краю границы.

3. Понижение в опытной скважине, расположенной на краю границы ($L_{wc} = L/2$ или $L_{wc} = -L/2$) (рис. 2.43, δ , ϵ),

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{4L_w \sqrt{L^2 + L_w^2}}{r_w \left(\sqrt{L^2 + L_w^2} - L_w\right)}.$$
 (2.9.6)

Способы обработки откачки

Точечные способы

 Определение проводимости по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_m} \ln \left[\frac{\cosh(\zeta_p + \zeta_w) - \cos(\eta_p - \eta_w)}{\cosh(\zeta_p - \zeta_w) - \cos(\eta_p - \eta_w)} \times \frac{\cosh(\zeta_p + \zeta_w) - \cos(\eta_p + \eta_w)}{\cosh(\zeta_p - \zeta_w) - \cos(\eta_p + \eta_w)} \right]. \tag{2.9.7}$$

2. Определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln f \,, \tag{2.9.8}$$

где f – выражение под знаком логарифма в уравнениях (2.9.4) – (2.9.6).

РАЗДЕЛ 3. НЕСОВЕРШЕННАЯ СКВАЖИНА: ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК В НАПОРНОМ ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ

Опытная и наблюдательная скважины несовершенны по степени вскрытия. Длина фильтра опытной скважины значительно меньше мощности водоносного пласта. В разделе рассматривается влияние плановых и профильных границ на понижение уровня. Даны решения для следующих условий:

- 1) неограниченный в плане и в разрезе пласт;
- 2) полуограниченный пласт;
- 3) ограниченный пласт;
- 4) пласт-квадрант;
- 5) U-образный пласт;
- 6) угловой пласт.

<u>Литература:</u> Карслоу, Егер, 1964; Шестаков, 1973; Шестаков и др., 1975; Мироненко, Шестаков, 1978.

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

 $a = k/S_s$ – пьезопроводность изотропного пласта, м²/сут;

 $a_r = k_r / S_s$ — пьезопроводность анизотропного пласта по горизонтали, м²/сут;

 $a_z = k_z / S_s$ — пьезопроводность анизотропного пласта по вертикали, м²/сут;

 B_p — вспомогательный параметр: вертикальное расстояние от наблюдательной скважины до кровли или подошвы пласта ($B_p = L_{Tp}$ или $B_p = L_{Bp}$), м;

 B_{w} — вспомогательный параметр: вертикальное расстояние от центра фильтра опытной скважины до кровли или подошвы пласта ($B_{w} = L_{Tw}$ или $B_{w} = L_{Bw}$), м;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

 $D\,$ – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

 $d = \sqrt{r^2 + z^2}$ – расстояние для изотропного пласта между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин, м;

 $d_1 = \sqrt{r_1^2 + z_1^2}$, $d_2 = \sqrt{r_2^2 + z_2^2}$ – расстояния для изотропного пласта между центрами фильтров опытной скважины и первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $d_a = \sqrt{(\chi r)^2 + z^2}$ — приведенное расстояние для анизотропного пласта между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин, также может определяться по уравнению (3.1.32), м;

 $d_{a,1} = \sqrt{(\chi r_1)^2 + z_1^2}$, $d_{a,2} = \sqrt{(\chi r_2)^2 + z_2^2}$ – приведенные расстояния для анизотропного пласта между центрами фильтров опытной скважины и первой и второй наблюдательных скважин, м;

E — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых; erfc λ — дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4); erfc (λ) — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 f_P — вспомогательная функция для U-образного пласта, которая зависит от граничных условий: $f_P = f_P^{II-II}$ (параллельные границы II рода); $f_P = f_P^{I-II}$ (параллельные границы I рода); $f_P = f_P^{I-II}$ (параллельные границы I и II рода);

 $f_P^I(d,\rho,t,a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границы І рода полуограниченного пласта: определяется уравнениями (3.2.6) и (3.2.8);

 $f_P^{I-I}(d, \rho_i^J, t, a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ І рода ограниченного пласта: определяется уравнениями (3.3.10) и (3.3.12);

 $f_P^{I-II}(d, \rho_i^j, t, a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние смешанных границ I и II рода ограниченного пласта: определяется уравнениями (3.3.58) и (3.3.60);

 $f_P^{II}(d,\rho,t,a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границы II рода полуограниченного пласта: определяется уравнениями (3.2.30) и (3.2.32);

 $f_P^{II-II}\!\left(\!d,\rho_i^{\,j},t,a\!\right)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ II рода ограниченного пласта: определяется уравнениями (3.3.34) и (3.3.36);

 f_{PA} – вспомогательная функция; зависит от граничных условий: $f_{PA} = f_{PA}^{II-II}$ (плановые границы I рода); $f_{PA} = f_{PA}^{II-II}$ (плановые границы I и II рода); $f_{PA} = f_{PA}^{I-II}$ (плановые границы I и II рода); $f_{PA}^{I-I}(d,\rho_j,t,a)$ – вспомогательная функция, учитывающая влияние границ I рода углового пласта: определяется уравнением (3.6.12);

 $f_{PA}^{I-II}(d,\rho_j,t,a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние смешанных границ углового пласта: определяется уравнением (3.6.16);

 $f_{PA}^{II-II}(d,\rho_j,t,a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ II рода углового пласта: определяется уравнением (3.6.14);

 $f_{PQ}^{I-I}ig(d,
ho_j,t,aig)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ I рода пласта-квадранта: определяется уравнениями (3.4.20) и (3.4.22);

 $f_{PQ}^{I-II}ig(d,
ho_{j},t,aig)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние смешанных границ I и II рода пласта-квадранта: определяется уравнениями (3.4.74) и (3.4.76);

 $f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_j,t,a)$ — вспомогательная функция, учитывающая влияние границ II рода пластаквадранта: определяется уравнениями (3.4.44) и (3.4.46);

i = 1, 2 — индекс фиктивной скважины: i = 1 — фиктивная скважина отражена от кровли или от левой границы; i = 2 — фиктивная скважина отражена от подошвы или от правой границы;

j — номер фиктивной скважины для ограниченного и U-образного пласта; для пластаквадранта j=1,23; для углового пласта j=1,2...,n — номер отражения от плановой границы, нумерация идет от наблюдательной скважины против часовой стрелки;

j' – номер отражения от профильных границ для ограниченного в разрезе углового пласта;

 $j_0\,$ – номер суммы при определении расстояния до j-й фиктивной скважины;

k – коэффициент фильтрации изотропного пласта, м/сут;

 k_r – горизонтальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;

 k_z — вертикальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;

L – ширина водоносного пласта, м;

 $L_{\it Ap}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до вершины угла углового пласта, м;

 L_{Aw} — расстояние от опытной скважины до вершины угла углового пласта, м;

 $L_{\it Bp}\,-\,$ вертикальное расстояние от наблюдательной скважины до подошвы пласта, м;

 L_{Bw} — вертикальное расстояние от опытной скважины до подошвы пласта, м;

 L_p – горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до плановой границы, м;

 $L_{Tp}\,$ – вертикальное расстояние от наблюдательной скважины до кровли пласта, м;

 L_{Tw} — вертикальное расстояние от опытной скважины до кровли пласта, м;

 $L_{\rm w}$ – горизонтальное расстояние от опытной скважины до плановой границы, м;

 L_{Up} — горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до плановой (перпендикулярной) границы U-образного пласта, м;

 L_{Uw} – горизонтальное расстояние от опытной скважины до плановой (перпендикулярной) границы U-образного пласта, м;

 L_p' — горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до второй плановой границы (для планового пласта-квадранта), м;

 L_{w}^{\prime} — горизонтальное расстояние от опытной скважины до второй плановой границы (для планового пласта-квадранта); для ограниченного пласта и U-образного пласта $L_{w}^{\prime}=L-L_{w}$, м;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

m – мощность водоносного пласта, м;

n — количество отражений от одной границы (общее количество фиктивных скважин равно 2n для ограниченного пласта и 4n+1 для U-образного пласта); для углового пласта n — число фиктивных скважин, отраженных от плановых границ: определяется равенством (3.6.1);

n' – количество отражений от одной профильной границы в ограниченном в разрезе угловом пласте;

 n_j — знак для пласта-квадранта: $n_1=-1, n_2=-1, n_3=1$ для границ I рода и

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

R' - обобщенный параметр для построения графиков;

 $n_1 = -1$, $n_2 = 1$, $n_3 = -1$ для смешанных граничных условий;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_{w} – радиус опытной скважины, м;

$$\begin{split} r' &= \rho/d\;;\;\; r'_a = \rho_a/d_a\;;\;\; r'^{j}_{ai} = \rho^{j}_{ai}/d_a\;;\;\; r'^{j}_i = \rho^{j}_i/d\;;\;\; r'_{aj} = \rho_{aj}/d_a\;;\;\; r'_j = \rho_{j}/d\;;\;\; r'_U = \rho_U/d\;;\\ r'^{j}_{Ui} &= \rho^{j}_{Ui}/d\;;\; r'_{aU} = \rho_{aU}/d_a\;;\; r'^{j}_{aUi} = \rho^{j}_{aUi}/d_a\;;\; r'^{j}_{Uj} = \rho_{Uj}/d\;;\;\; r'_{aUj} = \rho_{aUj}/d_a\;; \end{split}$$

 r'_{w} — приведенный радиус реальной опытной скважины, имеющей длину фильтра: определяется уравнениями (3.1.9) и (3.1.11) в зависимости от наличия анизотропии водоносного пласта, м;

 S_s — удельная водоотдача пласта, 1/м;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_0 – понижение в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах на период стационара, м;

 s_{mr} — максимальное восстановление в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня в этой скважине на конец откачки, м;

 $s_{mr,1}$, $s_{mr,2}$ — максимальные восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 $s_r = (s_0 - s)$ – восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

 s_w – понижение в опытной скважине

 $s_{w,1}, s_{w,2}$ — понижения в опытной скважине на два момента времени, м;

t — время от начала откачки, сут;

$$t' = \frac{\sqrt{t_0 + t_r - \sqrt{t_r}}}{\sqrt{t_r(t_0 + t_r)}}$$
 — приведенное время для периода восстановления уровней: см.

уравнение (3.1.55), 1/сут^{0.5};

$$t'' = \frac{\sqrt{t_r t_0} - \sqrt{t_r (t_0 + t_r)} - \sqrt{t_0 (t_0 + t_r)}}{\sqrt{t_r t_0 (t_0 + t_r)}}$$
 — приведенное время для периода восстановления

уровней: см. уравнение (3.1.62), 1/сут^{0.5};

 t_0 – длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 t_r — время от начала восстановления, сут;

z — расстояние по вертикали между центрами фильтров опытной скважины и наблюдательной скважины, м;

 z_1, z_2 — расстояния по вертикали между центрами фильтров опытной скважины и первой и второй наблюдательных скважин, м;

heta – угол между двумя пересекающимися границами углового пласта, градус;

- θ_j угол, характеризующий положение *j*-й фиктивной скважины в угловом пласте: определяется равенством (3.6.3), градус;
- θ_p угол, характеризующий положение наблюдательной скважины в угловом пласте, градус;
- θ_{w} угол, характеризующий положение опытной скважины в угловом пласте, градус;
- λ аргумент функций;
- ρ расстояние от наблюдательной скважины в полуограниченном пласте до фиктивной скважины: определяется уравнением (3.2.1) или (3.2.3), м;
- $ho_0 = d$ введено для упрощения решений при смещанных граничных условиях;
- ρ_1, ρ_2 расстояния от первой и второй наблюдательных скважин в полуограниченном пласте до фиктивной скважины, м;
- ρ_a приведенное расстояние от наблюдательной скважины в полуограниченном пласте до фиктивной скважины для анизотропного пласта: определяется уравнением (3.2.2) или (3.2.4), м;
- $\rho_{a,1}, \rho_{a,2}$ приведенные расстояния от первой и второй наблюдательных скважин в полуограниченном пласте до фиктивной скважины в анизотропном пласте, м;
- $ho_{a0} = d_a$ введено для упрощения решений при смешанных граничных условиях;
- ρ_{ai}^{j} приведенное расстояние от наблюдательной скважины до j-й фиктивной скважины, отраженной от верхней или левой (i=1) и от нижней или правой (i=2) границы, для анизотропного ограниченного и U-образного пласта, м;
- $\rho_{ai,1}^{j}$, $\rho_{ai,2}^{j}$ приведенные расстояния до фиктивной скважины от первой и второй наблюдательных скважин: см. пояснение к ρ_{ai}^{j} , м;
- ρ_{aj} приведенное расстояние для анизотропного углового пласта от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от плановой границы: определяется равенством (3.6.3) с учетом коэффициента анизотропии, м; применяется также для пласта-квадранта (уравнения см. в соответствующем разделе);
- $ho_{aj,1},
 ho_{aj,2}$ приведенные расстояния до фиктивной скважины от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной скважины: см. пояснение к ho_{aj} , м;
- ho_{aU} приведенное расстояние для анизотропного пласта: см. пояснение к ho_U , м;
- $ho_{aU,1}$, $ho_{aU,2}$ приведенные расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_U , м;
- ho_{aUi}^{J} приведенное расстояние для анизотропного пласта, см. пояснение к ho_{Ui}^{J} , м;
- $ho_{aUi,1}^{j}$, $ho_{aUi,2}^{j}$ приведенные расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_{Ui}^{j} , м;
- ρ_{aUj} приведенное расстояние для анизотропного углового пласта: определяется уравнением (3.6.6) с учетом коэффициента анизотропии, м;
- $ho_{aUj,1},
 ho_{aUj,2}$ приведенные расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_{Uj} , м;
- ρ_i^j расстояние от наблюдательной скважины до j-й фиктивной скважины, отраженной от верхней или левой (i=1) и от нижней или правой (i=2) границы, для ограниченного и U-образного пласта, м;
- $ho_{i,1}^{j},
 ho_{i,2}^{j}$ расстояния до фиктивной скважины от первой и второй наблюдательных скважин: см. пояснение к ho_{i}^{j} , м;

- ρ_j расстояние от наблюдательной скважины в угловом пласте до j-й фиктивной скважины, отраженной от плановой границы: определяется равенством (3.6.4), м; применяется также для пласта-квадранта (уравнения см. в соответствующем разделе)
- $ho_{j,1},
 ho_{j,2}$ расстояния до фиктивной скважины от первой и второй наблюдательных скважин: см. пояснение к ho_j , м;
- ρ_{j0} расстояние от наблюдательной скважины углового пласта до отраженной скважины в случае расположения фильтров опытной и наблюдательной скважин на одном уровне: определяется уравнением (3.6.2), м;
- ho_U расстояние между центрами фильтров наблюдательной скважины и фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы U-образного пласта, м;
- ρ_U расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в полуограниченном в разрезе угловом пласте, до фиктивной скважины, отраженной от кровли или подошвы пласта: определяется уравнением (3.6.5), м;
- $ho_{U,1},
 ho_{U,2}$ расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_U , м;
- ho_{Ui}^{j} расстояние между центрами фильтров наблюдательной скважины U-образного пласта и фиктивной скважины второго ряда, отраженных от кровли (i=1) или подошвы (i=2), м; $ho_{Ui,1}^{j}$, $ho_{Ui,1}^{j}$ расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_{Ui}^{j} , м;
- ρ_{Uj} расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в полуограниченном в разрезе угловом пласте, до фиктивной скважины, отраженной от отражения плановых границ: определяется уравнением (3.6.6), м;
- $ho_{U_j,1},
 ho_{U_j,2}$ расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к ho_{U_j} , м;
- $ho_{a0,i}^{j'} =
 ho_{ai}^{j'}$ введено для упрощения решений при смешанных граничных условиях;
- $ho_{ai}^{J'}$ приведенное расстояние для анизотропного углового пласта: определяется уравнениями (3.6.7) и (3.6.9) с учетом коэффициента анизотропии, м;
- $\rho_{ai,1}^{j'}$, $\rho_{ai,2}^{j'}$ приведенные расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к $\rho_{ai}^{j'}$, м; $\rho_{aj,i}^{j'}$ приведенное расстояние для анизотропного углового пласта: определяется уравнениями (3.6.8) и (3.6.10) с учетом коэффициента анизотропии, м;
- $ho_{aj,i,1}^{j'},
 ho_{aj,i,2}^{j'}$ приведенные расстояния для двух наблюдательных скважин, см. пояснение к $ho_{aj,i}^{j'}$, м; $ho_{0,i}^{j'}=
 ho_{i}^{j'}$ введено для упрощения решений при смешанных граничных условиях;
- $\rho_i^{j'}$ расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в ограниченном в разрезе угловом пласте, до j-й фиктивной скважины, отраженной от профильной границы (i=1 от кровли или i=2 от подошвы): определяется уравнениями (3.6.7) и (3.6.9), м;
- $\rho_{j,i}^{j'}$ расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в ограниченном в разрезе угловом пласте, до j-й фиктивной скважины, отраженной от j'-го отражения плановых границ от кровли (i = 1) или от подошвы (i = 2): определяется уравнениями (3.6.8) и (3.6.10), м; $\chi = \sqrt{k_x/k_y}$ коэффициент профильной анизотропии;
- ± для U-образного пласта: знак «+» для перпендикулярной границы II рода, знак «–» для перпендикулярной границы I рода.

3.1. Неограниченный в плане и в разрезе пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане и в разрезе;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 3.1.

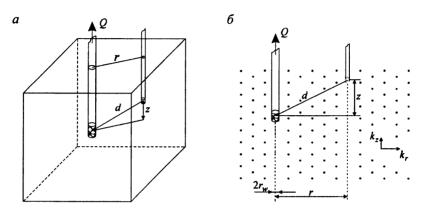


Рис. 3.1. Типовая схема точечного источника в неограниченном в плане и в разрезе напорном пласте. a – трехмерное представление; δ – разрез.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.1.1), (3.1.31) и (3.1.4);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнения (3.1.6) и (3.1.7);
- понижение в реальной опытной скважине для нестационарного периода: уравнения (3.1.8) и (3.1.10);
- понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одном уровне с опытной скважиной, для нестационарного периода: уравнения (3.1.12) и (3.1.13);
- понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной оси с опытной скважиной, для нестационарного периода: уравнения (3.1.14) и (3.1.15);
- понижение в наблюдательной скважине для квазистационарного периода: уравнения (3.1.16) и (3.1.17);
- три формы записи уравнения квазистационарного периода изотропного пласта: уравнения (3.1.18), (3.1.19) и (3.1.20);
- понижение в опытной скважине для квазистационарного периода: уравнения (3.1.21) и (3.1.22);
- понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одном уровне с опытной скважиной, для квазистационарного периода: уравнения (3.1.23) и (3.1.24);
- понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной оси с опытной скважиной, для квазистационарного периода: уравнения (3.1.25) и (3.1.26);
- понижение в наблюдательной скважине для стационарного периода: уравнения (3.1.27) и (3.1.28);
- понижение в опытной скважине для стационарного периода: уравнения (3.1.29) и (3.1.30);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.1.51), (3.1.52), (3.1.58) и (3.1.59);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнения (3.1.53), (3.1.54), (3.1.60) и (3.1.61).

Откачка с постоянным расходом

***** Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине в зависимости от наличия профильной анизотропии:

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}},$$
(3.1.1)

$$d_a = \sqrt{(\chi r)^2 + z^2} \,, \tag{3.1.2}$$

$$\chi = \sqrt{\frac{k_z}{k_r}} \; ; \tag{3.1.3}$$

- для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi kd} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}}, \qquad (3.1.4)$$

$$d = \sqrt{r^2 + z^2} \ . \tag{3.1.5}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Понижение в опытной скважине для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi r_{w} \sqrt{k_{r} k_{z}}} \operatorname{erfc} \frac{\chi r_{w}}{2\sqrt{a_{z} t}}; \qquad (3.1.6)$$

$$s_w = \frac{Q}{4\pi r_w k} \operatorname{erfc} \frac{r_w}{2\sqrt{at}}.$$
 (3.1.7)

- 2. Понижение в реальной опытной скважине с длиной фильтра l_w и радиусом фильтра r_w . В этом случае необходимо определить приведенный радиус скважины r_w' [Шестаков, 1973]. Понижение определяется:
 - для анизотропного пласта

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi r_{w}' \sqrt{k_{r}k_{z}}} \operatorname{erfc} \frac{\chi r_{w}'}{2\sqrt{a_{z}t}},$$
(3.1.8)

$$r'_{w} = \frac{l_{w}}{2\chi \ln \frac{0.74l_{w}}{\gamma r_{w}}};$$
(3.1.9)

для изотропного пласта

$$s_w = \frac{Q}{4\pi r_{\cdot}' k} \operatorname{erfc} \frac{r_w'}{2\sqrt{gt}}, \tag{3.1.10}$$

$$r'_{w} = \frac{l_{w}}{2\ln\frac{0.74l_{w}}{r}}.$$
(3.1.11)

3. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одном уровне с опытной скважиной (z = 0), для анизотропного и изотропного пласта (рис. 3.2, a):

$$s = \frac{Q}{4\pi r \sqrt{k_r k_z}} \operatorname{erfc} \frac{\chi r}{2\sqrt{a_z t}},$$
 (3.1.12)

$$s = \frac{Q}{4\pi kr} \operatorname{erfc} \frac{r}{2\sqrt{at}}.$$
 (3.1.13)

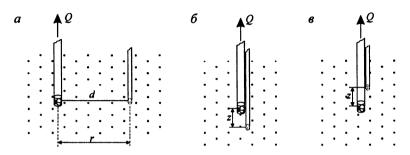


Рис. 3.2. Частные случаи расположения скважин.

a – фильтры опытной и наблюдательной скважин находятся на одном уровне; δ , ϵ – фильтры опытной и наблюдательной скважин находятся на одной оси.

4. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной оси с опытной скважиной (r = 0), для анизотропного и изотропного пласта (рис. 3.2, δ , ϵ):

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r z} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_z t}},\tag{3.1.14}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi kz} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at}} \,. \tag{3.1.15}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине для анизотропного и изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t}} \right),\tag{3.1.16}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right). \tag{3.1.17}$$

Время наступления квазистационарного режима $t > 1.2d^2/a$.

Формы записи уравнения (3.1.17) для временного, площадного и комбинированного прослеживания понижения уровня:

$$s = -\frac{Q}{4\pi k \sqrt{\pi a}} \frac{1}{\sqrt{t}} + \frac{Q}{4\pi k d}, \qquad (3.1.18)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \frac{1}{d} - \frac{Q}{4\pi k \sqrt{\pi at}},\tag{3.1.19}$$

$$sd = -\frac{Q}{4\pi k \sqrt{\pi a}} \frac{d}{\sqrt{t}} + \frac{Q}{4\pi k}.$$
 (3.1.20)

Частные случаи для квазистационарной фильтрации

1. Понижение в опытной скважине для анизотропного и изотропного пласта

$$s_w = \frac{Q}{4\pi\sqrt{k_r k_z}} \left(\frac{1}{\chi r_w} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t}} \right), \tag{3.1.21}$$

$$s_w = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right). \tag{3.1.22}$$

2. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одном уровне с опытной скважиной (z = 0) (рис. 3.2, a), для анизотропного и изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{k_r k_z}} \left(\frac{1}{\chi r} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t}} \right), \tag{3.1.23}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right). \tag{3.1.24}$$

3. Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на одной оси с опытной скважиной (r = 0) (рис. 3.2, б, θ), для анизотропного и изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t}} \right),\tag{3.1.25}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right). \tag{3.1.26}$$

Уравнения для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине для анизотропного и изотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r d_a},\tag{3.1.27}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi kd} \,. \tag{3.1.28}$$

Время наступления периода стационара $t > 150d^2/a$.

Частные случаи для стационарного периода

Понижение в опытной скважине для анизотропного и изотропного пласта

$$s_{mw} = \frac{Q}{4\pi r_w \sqrt{k_r k_z}},\tag{3.1.29}$$

$$s_{mw} = \frac{Q}{4\pi r_w k} \,. \tag{3.1.30}$$

Замечания

1. Основное уравнение нестационарной фильтрации для анизотропного водоносного пласта (3.1.1) можно записать в другой форме:

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{k_r k_z} d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_r t}},$$
 (3.1.31)

$$d_a = \sqrt{r^2 + (z/\chi)^2} \ . \tag{3.1.32}$$

Соответственно, если в последующих расчетах определять приведенное расстояние d_a по формуле (3.1.32), то вместо вертикальной пьезопроводности a_z при обработке будет получена горизонтальная пьезопроводность a_r , а вместо коэффициента фильтрации по горизонтали k_r – обобщенный параметр $\sqrt{k_r k_z}$.

2. В уравнениях (3.1.21), (3.1.22), (3.1.29) и (3.1.30) для учета длины фильтра опытной скважины реальный радиус скважины r_w необходимо заменить на приведенный радиус r'_w , используя уравнение (3.1.9) или (3.1.11).

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.1.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2} \ (1)$	1	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a=\frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$ (2)	$\lg \operatorname{erfc}(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

 Π р и м е ч а н и е . (1) — индикаторные графики ложатся на одну кривую (рис. 3.3, ϵ). (2) — определение параметров производится отдельно для каждой наблюдательной скважины.

 $Tаблица\ 3.1.2$ Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D} \ (1)$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4} \ (1)$
-5° -5'		$k_r = \frac{Q}{4\pi z \cdot 10^D} (2)$	$a_z = \frac{z^2 \cdot 10^E}{4} \ (2)$

П р и м е ч а н и е . (1) — параметры определяются при известном коэффициенте анизотропии (χ). (2) — параметры определяются для случая, когда наблюдательная скважина находится на одной оси с опытной скважиной (r=0) (рис. 3.2, δ , δ).

Способ прямой линии

Отсутствие логарифмической аппроксимации уравнения (3.1.1) не дает возможности использовать способ прямой линии в привычных полулогарифмических координатах. Преобразовывая уравнение (3.1.17) в зависимости от вида предполагаемого прослеживания уровня при откачке к уравнению прямой (3.1.18), (3.1.19) или (3.1.20),

получим возможность использовать способ прямой линии для нахождения фильтрационных параметров. Необходимые для этого графики и формулы приведены в табл. 3.1.3 (см. также рис. 3.3, a - e).

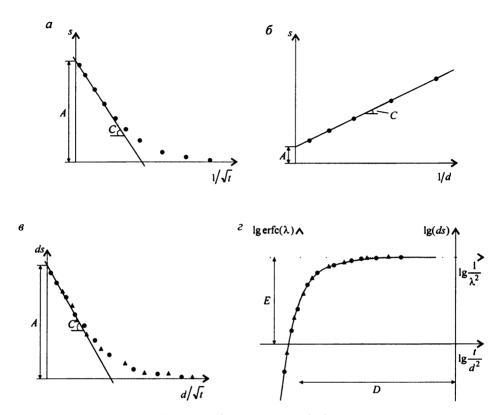


Рис. 3.3. Примеры графоаналитической обработки откачки в несовершенной по степени вскрытия скважине (точечный источник).

а, б, в – способ прямой линии на графике временного прослеживания (а), площадного прослеживания (б) и комбинированного прослеживания (в); г – способ эталонной кривой. Сплошная линия – прямая и эталонная кривая; треугольники и кружки – фактические замеры для двух наблюдательных скважин.

Таблица 3.1.3 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s-\frac{1}{\sqrt{t}}$	$k = \frac{Q}{4\pi dA}$	$a = \frac{\left(A/C\right)^2}{\pi}d^2$
Площадное прослеживание	$s-\frac{1}{d}$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a = \frac{\left(C/A\right)^2}{\pi t}$
Комбинированное прослеживание	$ds - \frac{d}{\sqrt{t}}$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a = \frac{\left(A/C\right)^2}{\pi}$

Таблица 3.1.4 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s-\frac{1}{\sqrt{t}}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi z A}$	$a_z = \frac{\left(A/C\right)^2}{\pi} z^2$
Площадное прослеживание	$s-\frac{1}{z}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi C}$	$a_z = \frac{\left(C/A\right)^2}{\pi t}$
Комбинированное прослеживание	$zs - \frac{z}{\sqrt{t}}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi A}$	$a_z = \frac{(A/C)^2}{\pi}$

Примечание. Табл. 3.1.4 можно воспользоваться при нахождении наблюдательной скважины на одной оси с опытной скважиной (r = 0) (см. рис. 3.2, δ , δ).

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_2 \operatorname{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{at}}}{d_1 \operatorname{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{at}}},$$
(3.1.33)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_{a,2} \operatorname{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z t}}}{d_{a,1} \operatorname{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z t}}},$$
(3.1.34)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{z_2 \operatorname{erfc} \frac{z_1}{2\sqrt{a_z t}}}{z_1 \operatorname{erfc} \frac{z_2}{2\sqrt{a_z t}}},$$
 (3.1.35)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) для уравнения (3.1.34) и при неизвестном для уравнения (3.1.35) осуществляется способом биссектрисы. Для уравнения (3.1.35) наблюдательные скважины должны находиться на одной оси с опытной скважиной (рис. 3.2, δ , e).

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi ds_{m}}. ag{3.1.36}$$

2. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в опытной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi r_w s_{mw}}. (3.1.37)$$

3. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a s_m} \,. \tag{3.1.38}$$

4. Определение обобщенного параметра ($\sqrt{k_r k_z}$) анизотропного пласта по понижению на период стационара в опытной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$\sqrt{k_r k_z} = \frac{Q}{4\pi r_{\text{tot}} s_{\text{man}}}.$$
(3.1.39)

 Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода)
 По замерам в двух скважинах на один момент времени на основе уравнения (3.1.17) получаем

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right).$$
 (3.1.40)

Отсюда определяем

 коэффициент фильтрации (k) изотропного пласта:

$$k = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right); \qquad (3.1.41)$$

- горизонтальный коэффициент фильтрации (k_r) анизотропного пласта при известном коэффициенте анизотропии (χ) :

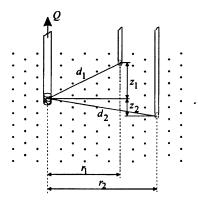


Рис. 3.4. Пример расположения двух наблюдательных скважин.

$$k_r = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \left(\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{d_{a,2}} \right). \tag{3.1.42}$$

6. Способ отношения понижений

Подбор пьезопроводности (а) для изотропного пласта:

- по двум наблюдательным скважинам на разные моменты времени (рис. 3.4)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_2 \operatorname{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{at_1}}}{d_1 \operatorname{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{at_2}}} \approx \frac{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{\sqrt{\pi at_1}}}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{\sqrt{\pi at_2}}};$$
(3.1.43)

- по одной наблюдательной скважине на разные моменты времени

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at_1}}}{\operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at_2}}} \approx \frac{1 - \frac{d}{\sqrt{\pi at_1}}}{1 - \frac{d}{\sqrt{\pi at_2}}};$$
(3.1.44)

- по опытной скважине на разные моменты времени

$$\frac{s_{w,1}}{s_{w,2}} = \frac{\text{erfc} \frac{r_w}{2\sqrt{at_1}}}{\text{erfc} \frac{r_w}{2\sqrt{at_2}}} \approx \frac{1 - \frac{r_w}{\sqrt{\pi at_1}}}{1 - \frac{r_w}{\sqrt{\pi at_2}}}.$$
 (3.1.45)

- 7. Подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) для анизотропного пласта при известном коэффициенте анизотропии (χ):
 - по двум наблюдательным скважинам на разные моменты времени

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_{a,2}\operatorname{erfc}}{d_{a,1}\operatorname{erfc}} \frac{\frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z t_1}}}{\frac{1}{2\sqrt{a_z t_2}}} \approx \frac{\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t_1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} - \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t_2}}};$$
(3.1.46)

по одной наблюдательной скважине на разные моменты времени

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\text{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t_1}}}{\text{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t_2}}} \approx \frac{1 - \frac{d_a}{\sqrt{\pi a_z t_1}}}{1 - \frac{d_a}{\sqrt{\pi a_z t_2}}};$$
(3.1.47)

по опытной скважине на разные моменты времени

$$\frac{s_{w,1}}{s_{w,2}} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{\chi r_w}{2\sqrt{a_z t_1}}}{\operatorname{erfc} \frac{\chi r_w}{2\sqrt{a_z t_2}}} \approx \frac{1 - \frac{\chi r_w}{\sqrt{\pi a_z t_1}}}{1 - \frac{\chi r_w}{\sqrt{\pi a_z t_2}}}.$$
(3.1.48)

8. Подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) для анизотропного пласта при r=0 (см. рис. 3.2, δ , s) и неизвестном коэффициенте анизотропии (χ):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{z_2 \operatorname{erfc} \frac{z_1}{2\sqrt{a_z t_1}}}{z_1 \operatorname{erfc} \frac{z_2}{2\sqrt{a_z t_2}}} \approx \frac{1 - \frac{z_1}{\sqrt{\pi a_z t_1}}}{1 - \frac{z_2}{\sqrt{\pi a_z t_2}}}.$$
 (3.1.49)

9. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \sqrt{\frac{(\chi r_2)^2 + z_2^2}{(\chi r_1)^2 + z_1^2}}.$$
 (3.1.50)

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Таблица 3.1.5

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
		3.1.1, 3.1.12	k_r, k_z, a_z или	
3.1.4, 3.1.13,	k, a	3.1.1, 3.1.12	k_r, a_z, χ	$s - \lg t$
3.1.15	3.1.15	3.1.31	k_r, k_z, a_r или	3 – 1 5 1
		3.1.31	k_r, k_z, a_r или k_z, a_r, χ	
3.1.7	k, a	3.1.6	k_r, k_z, a_z	$s_w - \lg t$
3.1.33	а	3.1.34	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$
		3.1.35	a_z	$3_1/3_2 - igi$

Замечания

- 1. Для правых частей уравнений (3.1.43) (3.1.49) необходимо брать такие замеры, которые относятся к периоду квазистационарного режима.
- 2. При обработке профильно-анизотропного водоносного пласта как изотропного во всех расчетах определяется обобщенный параметр $\sqrt{k_r k_z}$ вместо коэффициента фильтрации по горизонтали k_r . Не учет этого может привести к значительным искажениям определяемых параметров при удовлетворительном совпадении расчетных индикаторных кривых с фактическими данными.

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi kd} \left[\operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} - \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at_r}} \right], \tag{3.1.51}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r d_a} \left[\operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z(t_0 + t_r)}} - \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]. \tag{3.1.52}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Qt'}{4\pi k \sqrt{\pi a}},\tag{3.1.53}$$

$$s = \frac{Qt'}{4\pi k_{\perp}\sqrt{\pi a_{\perp}}},\tag{3.1.54}$$

$$t' = \frac{\sqrt{t_0 + t_r} - \sqrt{t_r}}{\sqrt{t_r(t_0 + t_r)}} = \frac{1}{\sqrt{t_r}} - \frac{1}{\sqrt{t_0 + t_r}}.$$
 (3.1.55)

❖ Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

По уравнениям (3.1.53) и (3.1.54) определяется обобщенный параметр – произведение коэффициента фильтрации на корень из пьезопроводности.

Расчетные формулы для определения параметров

Таблица 3.1.6

Способ обработки	График	Изотропный пласт	Анизотропный пласт
Временное прослеживание	s-t'	$k\sqrt{a} = \frac{Q}{4\pi C}$	$k_r \sqrt{a_z} = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\text{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} - \text{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{at_r}}}{\text{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} - \text{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{at_r}}},$$
(3.1.56)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_{a,2} \left[\text{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z(t_0 + t_r)}} - \text{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]}{d_{a,1} \left[\text{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z(t_0 + t_r)}} - \text{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]},$$
(3.1.57)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.1.7 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.1.51	k, a	3.1.52	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.1.56	а	3.1.57	a_{τ}, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

❖ Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi kd} \left[\operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at_r}} \right], \tag{3.1.58}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r d_a} \left[\operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z (t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]. \tag{3.1.59}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \frac{t''}{\sqrt{\pi a}} \right),\tag{3.1.60}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \frac{t''}{\sqrt{\pi a_r}} \right), \tag{3.1.61}$$

$$t'' = \frac{\sqrt{t_r t_0} - \sqrt{t_r (t_0 + t_r)} - \sqrt{t_0 (t_0 + t_r)}}{\sqrt{t_r t_0 (t_0 + t_r)}} = \frac{1}{\sqrt{t_0 + t_r}} - \frac{1}{\sqrt{t_0}} - \frac{1}{\sqrt{t_r}}.$$
 (3.1.62)

Уравнения для стационарного периода

Для изотропного и анизотропного пласта

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi kd},\tag{3.1.63}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r d_a} \,. \tag{3.1.64}$$

❖ Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

 Таблица 3.1.8

 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s_r - t''$	$k = \frac{Q}{4\pi dA}$	$a = \frac{(A/C)^2}{\pi} d^2$
Площадное прослеживание	$s_r - \frac{1}{d}$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a = \frac{\left(C/A\right)^2}{\pi} \left(t'''\right)^2$
Комбинированное прослеживание	$ds_r - dt''$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a = \frac{(A/C)^2}{\pi}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{d_2 \left[\operatorname{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{at_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d_1}{2\sqrt{at_r}} \right]}{d_1 \left[\operatorname{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{at_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{a(t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d_2}{2\sqrt{at_r}} \right]},$$
(3.1.65)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{d_{a,2} \left[\operatorname{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z t_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z (t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d_{a,1}}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]}{d_{a,1} \left[\operatorname{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z t_0}} - \operatorname{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z (t_0 + t_r)}} + \operatorname{erfc} \frac{d_{a,2}}{2\sqrt{a_z t_r}} \right]},$$
(3.1.66)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi ds_{mr}} \,. \tag{3.1.67}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a s_{mr}}. (3.1.68)$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\sqrt{(\chi r_2)^2 + z_2^2}}{\sqrt{(\chi r_1)^2 + z_1^2}}.$$
 (3.1.69)

Подбор параметров

Таблица 3.1.9 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропі	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.1.58	k, a	3.1.59	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.1.65	а	3.1.66	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

Замечание

обработки предложенных способов восстановления квазистационарного периода можно также использовать и те, которые даны для обработки понижения уровней. Для этого необходимо в графики и в расчетные формулы подставлять вместо $1/\sqrt{t}$. Это основано на идентичности уравнений (3.1.1) и (3.1.60) для анизотропного пласта и (3.1.17) и (3.1.61) для изотропного пласта.

3.2. Полуограниченный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, полуограниченный в разрезе или в плане:
- граница: прямолинейная бесконечная, профильная или плановая;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 3.5):

плановая граница обеспеченного питания (условие І рода); вариант 1:

профильная или плановая непроницаемая граница (условие II рода). вариант 2:

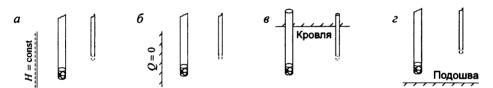


Рис. 3.5. Схематичные разрезы полуограниченного пласта.

a – плановая граница обеспеченного питания; b – плановая непроницаемая граница;

в – профильная граница – кровля пласта; г – профильная граница – подошва пласта.

Определение расстояния до фиктивной скважины

Расстояние от наблюдательной скважины до отраженной от границы (фиктивной) скважины рассчитывается в зависимости от положения границы. В анизотропном пласте рассчитывается приведенное расстояние.

Для профильной границы:

расстояние до отраженной скважины в изотропном пласте
$$\rho = \sqrt{r^2 + \left(L_{Tp} + L_{Tw}\right)^2} \quad \text{или} \quad \rho = \sqrt{r^2 + \left(L_{Bp} + L_{Bw}\right)^2} \; ; \tag{3.2.1}$$

приведенное расстояние в анизотропном пласте

$$\rho_a = \sqrt{(\chi r)^2 + (L_{Tp} + L_{Tw})^2} \text{ или } \rho_a = \sqrt{(\chi r)^2 + (L_{Bp} + L_{Bw})^2}.$$
 (3.2.2)

Для плановой границы:

расстояние до отраженной скважины в изотропном пласте

$$\rho = \sqrt{4L_w L_p + d^2} \; ; \tag{3.2.3}$$

приведенное расстояние в анизотропном пласте

$$\rho_a = \sqrt{4\chi^2 L_w L_p + d_a^2} \ . \tag{3.2.4}$$

3.2.1. Полуограниченный в плане пласт: граница І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.2);
- граница обеспеченного питания находится в плане: слева или справа от опытной и наблюдательной скважин;
- пласт неограничен в разрезе;
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины;
- типовая схема: рис. 3.6.

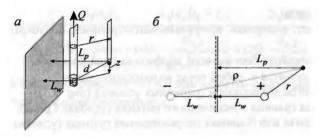


Рис. 3.6. Типовая схема точечного источника в напорном водоносном пласте с плановой граннцей обеспеченного питания. *а* – трехмерное представление: *б* – план (точками показана проекция линии).

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.2.5) и (3.2.7);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.2.9) и (3.2.10);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.2.16), (3.2.17), (3.2.20) и (3.2.21);
- восстановление для периода стационара: уравнения (3.2.22) и (3.2.23).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_P^I(d, \rho, t, a), \qquad (3.2.5)$$

$$f_P^I(d,\rho,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} - \frac{1}{\rho}\operatorname{erfc}\frac{\rho}{2\sqrt{at}};$$
 (3.2.6)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} f_P^I(d_a, \rho_a, t, a_z), \tag{3.2.7}$$

$$f_P^I(d_a, \rho_a, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} - \frac{1}{\rho_a} \operatorname{erfc} \frac{\rho_a}{2\sqrt{a_z t}}.$$
 (3.2.8)

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \frac{(\rho - d)}{d\rho},\tag{3.2.9}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \frac{(\rho_a - d_a)}{d_a \rho_a}. \tag{3.2.10}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.2.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м²/сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\frac{\operatorname{igenc}(\lambda) - \operatorname{ig} \frac{1}{\lambda^2}}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(λ) = erfc $\lambda - \frac{1}{r'}$ erfc($\lambda r'$), $r' = \rho / d$.

Таблица 3.2.2 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(λ) = erfc $\lambda - \frac{1}{r_a'}$ erfc($\lambda r_a'$), $r_a' = \rho_a / d_a$.

Способ прямой линии

Таблица 3.2.3 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	$s-\frac{\rho-d}{d\rho}$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

Таблица 3.2.4

Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном коэффициенте анизотропии (χ)

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут
Площадное прослеживание	$s - \frac{\rho_a - d_a}{d_a \rho_a}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^I(d_1, \rho_1, t, a)}{f_P^I(d_2, \rho_2, t, a)},$$
(3.2.11)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t, a_z)}{f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t, a_z)},$$
(3.2.12)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \frac{(\rho - d)}{d\rho}.$$
 (3.2.13)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \frac{\left(\rho_a - d_a\right)}{d_a \rho_a} \,. \tag{3.2.14}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{d_{a,2}\rho_{a,2}(d_{a,1} - \rho_{a,1})}{d_{a,1}\rho_{a,1}(d_{a,2} - \rho_{a,2})}.$$
(3.2.15)

Подбор параметров

Таблица 3.2.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропн	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.2.5	k, a	3.2.7	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.2.11	а	3.2.12	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^I(d, \rho, t_0 + t_r, a) - f_P^I(d, \rho, t_r, a) \right], \tag{3.2.16}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^I(d_a, \rho_a, t_0 + t_r, a_z) - f_P^I(d_a, \rho_a, t_r, a_z) \right]. \tag{3.2.17}$$

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^I(d_1, \rho_1, t_0 + t, a) - f_P^I(d_1, \rho_1, t, a)}{f_P^I(d_2, \rho_2, t_0 + t, a) - f_P^I(d_2, \rho_2, t, a)},$$
(3.2.18)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0 + t, a_z) - f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t, a_z)}{f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0 + t, a_z) - f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t, a_z)},$$
(3.2.19)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.2.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотрог	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График
3.2.16	k, a	3.2.17	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.2.18	а	3.2.19	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{P}^{I}(d, \rho, t_{0}, a) - f_{P}^{I}(d, \rho, t_{0} + t_{r}, a) + f_{P}^{I}(d, \rho, t_{r}, a) \right], \tag{3.2.20}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^I(d_a, \rho_a, t_0, a_z) - f_P^I(d_a, \rho_a, t_0 + t_r, a_z) + f_P^I(d_a, \rho_a, t_r, a_z) \right]. \tag{3.2.21}$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \frac{\left(\rho - d\right)}{d\rho},\tag{3.2.22}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_{\star}} \frac{\left(\rho_a - d_a\right)}{d_a \rho_a}.$$
 (3.2.23)

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 3.2.7
Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

The following Approximation of the following the fo					
Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут			
Площадное прослеживание	$s_r - \frac{\rho - d}{d\rho}$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$			

Таблица 3.2.8 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном коэффициенте анизотропии (χ)

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут
Площадное прослеживание	$s_r - \frac{\rho_a - d_a}{d_a \rho_a}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^I(d_1, \rho_1, t_0, a) - f_P^I(d_1, \rho_1, t_0 + t_r, a) + f_P^I(d_1, \rho_1, t_r, a)}{f_P^I(d_2, \rho_2, t_0, a) - f_P^I(d_2, \rho_2, t_0 + t_r, a) + f_P^I(d_2, \rho_2, t_r, a)},$$
(3.2.24)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0, a_z) - f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0 + t_r, a_z) + f_P^I(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_r, a_z)}{f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0, a_z) - f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0 + t_r, a_z) + f_P^I(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_r, a_z)},$$
(3.2.25)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \frac{(\rho - d)}{d\rho}.$$
 (3.2.26)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{\text{max}}} \frac{\left(\rho_a - d_a\right)}{d_a \rho_a}.$$
 (3.2.27)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{d_{a,2}\rho_{a,2}(d_{a,1} - \rho_{a,1})}{d_{a,1}\rho_{a,1}(d_{a,2} - \rho_{a,2})}.$$
(3.2.28)

Подбор параметров

Таблица 3.2.9 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	Изотропный пласт Анизотропный пласт		Анизотропный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.2.20	k, a	3.2.21	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.2.24	а	3.2.25	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t,$

3.2.2. Полуограниченный в плане или в разрезе пласт: граница II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.2);
- непроницаемая граница может находиться в разрезе (кровля или подошва водоносного пласта) или в плане (слева или справа от скважин);
- пласт полуограничен в разрезе для профильного расположения границы и неограничен в разрезе для плановой границы;
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен расходу опытной скважины;
- типовая схема: рис. 3.7.

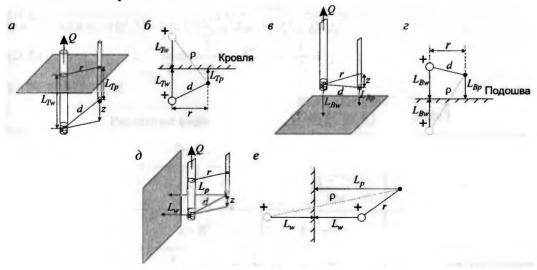


Рис. 3.7. Типовая схема точечного источника в напорном водоносном пласте с профильной или с плановой непроницаемой границей.

- а, б границей является кровля водоносного пласта: трехмерное представление и разрез;
- в, г границей является подошва водоносного пласта: трехмерное представление и разрез;
- д, е плановая граница: трехмерное представление и план (точками показана проекция линии).

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.2.29) и (3.2.31);
- понижение для квазистационарного периода: уравнения (3.2.33) и (3.2.34);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.2.35) и (3.2.36);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.2.45), (3.2.46), (3.2.51) и (3.2.52);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнения (3.2.47), (3.2.48), (3.2.53) и (3.2.54);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.2.55) и (3.2.56).

Замечание

Решения и обработка не зависят от положения границы. Изменяется только расчет расстояния до отраженной скважины.

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_P^{II}(d, \rho, t, a), \qquad (3.2.29)$$

$$f_P^{II}(d,\rho,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \frac{1}{\rho}\operatorname{erfc}\frac{\rho}{2\sqrt{at}};$$
 (3.2.30)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} f_P^{II}(d_a, \rho_a, t, a_z), \qquad (3.2.31)$$

$$f_P^{II}(d_a, \rho, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \frac{1}{\rho_a} \operatorname{erfc} \frac{\rho_a}{2\sqrt{a_z t}}.$$
 (3.2.32)

Уравнения для квазистационарного периода

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{d+\rho}{d\rho} - \frac{2}{\sqrt{\pi at}} \right), \tag{3.2.33}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{d_a + \rho_a}{d_a \rho_a} - \frac{2}{\sqrt{\pi a_z t}} \right). \tag{3.2.34}$$

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \frac{d+\rho}{d\rho} \,, \tag{3.2.35}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \frac{d_a + \rho_a}{d_a \rho_a}. \tag{3.2.36}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.2.10 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	lg erfo'(1) _ lg _ 1	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a=\frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. $\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \frac{1}{r'} \operatorname{erfc}(\lambda r'), r' = \rho / d$.

Таблица 3.2.11 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(λ) = erfc λ + $\frac{1}{r_a'}$ erfc($\lambda r_a'$), $r_a' = \rho_a / d_a$.

Способ прямой линии

Таблица 3.2.12 Расчетные формулы для определения параметров

1 40 .	Tae termie wopatytist and emperential mapatite pos				
Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут		
Временное прослеживание	$s-\frac{1}{\sqrt{t}}$	$k = \frac{QR'}{4\pi A}$	$a = \frac{4}{\pi} \left(\frac{A}{CR'} \right)^2$		
Площадное прослеживание	s-R'	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a=4\frac{\left(C/A\right)^2}{\pi t}$		
Комбинированное прослеживание	$\frac{s}{R'} - \frac{1}{R'\sqrt{t}}$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a=4\frac{\left(A/C\right)^2}{\pi}$		

Примечание.
$$R' = \frac{d+\rho}{d\rho}$$
.

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II}(d_1, \rho_1, t, a)}{f_P^{II}(d_2, \rho_2, t, a)},$$
(3.2.37)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t, a_z)}{f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t, a_z)},$$
(3.2.38)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \frac{d+\rho}{d\rho}.$$
 (3.2.39)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \frac{d_a + \rho_a}{d_a \rho_a} \,. \tag{3.2.40}$$

3. Способ разности понижений (используются понижения квазистационарного периода). По замерам в двух скважинах на один момент времени на основе уравнения (3.2.33) получаем

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{d_1 + \rho_1}{d_1 \rho_1} - \frac{d_2 + \rho_2}{d_2 \rho_2} \right). \tag{3.2.41}$$

Отсюда определяем:

коэффициент фильтрации (k) изотропного пласта

$$k = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \left(\frac{d_1 + \rho_1}{d_1 \rho_1} - \frac{d_2 + \rho_2}{d_2 \rho_2} \right); \tag{3.2.42}$$

— горизонтальный коэффициент фильтрации (k_r) анизотропного пласта при известном коэффициенте анизотропии (χ)

$$k_r = \frac{Q}{4\pi(s_1 - s_2)} \left(\frac{d_{a,1} + \rho_{a,1}}{d_{a,1}\rho_{a,1}} - \frac{d_{a,2} + \rho_{a,2}}{d_{a,2}\rho_{a,2}} \right). \tag{3.2.43}$$

4. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных понижений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{d_{a,2}\rho_{a,2}(d_{a,1} + \rho_{a,1})}{d_{a,1}\rho_{a,1}(d_{a,2} + \rho_{a,2})}.$$
(3.2.44)

Подбор параметров

Таблица 3.2.13

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	Изотропный пласт		Анизотропный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.2.29	k, a	3.2.31	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.2.37	а	3.2.38	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{II}(d, \rho, t_0 + t_r, a) - f_P^{II}(d, \rho, t_r, a) \right], \tag{3.2.45}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^{II} (d_a, \rho, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{II} (d_a, \rho, t_r, a_z) \right]. \tag{3.2.46}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Qt'}{2\pi k \sqrt{\pi a}},\tag{3.2.47}$$

$$s = \frac{Qt'}{2\pi k_r \sqrt{\pi a_z}},\tag{3.2.48}$$

где t' – см. уравнение (3.1.55).

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Таблица 3.2.14

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Изотропный пласт	Анизотропный пласт
Временное прослеживание	s-t'	$k\sqrt{a} = \frac{Q}{2\pi C}$	$k_r \sqrt{a_z} = \frac{Q}{2\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II}(d_1, \rho_1, t_0 + t_r, a) - f_P^{II}(d_1, \rho_1, t_r, a)}{f_P^{II}(d_2, \rho_2, t_0 + t_r, a) - f_P^{II}(d_2, \rho_2, t_r, a)},$$
(3.2.49)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_r, a_z)}{f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_r, a_z)},$$
(3.2.50)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.2.15 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		ласт Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер Подбираемые		График		
уравнения	параметры	уравнения	параметры			
3.2.45	k, a	3.2.46	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$		
3.2.49	а	3.2.50	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$		

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k} \Big[f_P^{II}(d, \rho, t_0, a) - f_P^{II}(d, \rho, t_0 + t_r, a) + f_P^{II}(d, \rho, t_r, a) \Big], \tag{3.2.51}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^{II}(d_a, \rho_a, t_0, a_z) - f_P^{II}(d_a, \rho_a, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{II}(d_a, \rho_a, t_r, a_z) \right].$$
(3.2.52)

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{d+\rho}{d\rho} + \frac{2t''}{\sqrt{\pi a}} \right), \tag{3.2.53}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{d_a + \rho_a}{d_a \rho_a} + \frac{2t''}{\sqrt{\pi a_z}} \right). \tag{3.2.54}$$

где t" - см. уравнение (3.1.62).

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \frac{d+\rho}{d\rho} \,, \tag{3.2.55}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_{-}} \frac{d_{a} + \rho_{a}}{d_{-}\rho_{a}}.$$
 (3.2.56)

« Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 3.2.16 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s_r - t''$	$k = \frac{QR'}{4\pi A}$	$a = \frac{4}{\pi} \left(\frac{A}{CR'} \right)^2$
Площадное прослеживание	$s_r - R'$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a=4\frac{(C/A)^2}{\pi}(t^*)^2$
Комбинированное прослеживание	$\frac{s_r}{R'} - \frac{t''}{R'}$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a=4\frac{(A/C)^2}{\pi}$

Примечание. $R' = \frac{d+\rho}{d\rho}$.

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{II}(d_1, \rho_1, t_0, a) - f_P^{II}(d_1, \rho_1, t_0 + t_r, a) + f_P^{II}(d_1, \rho_1, t_r, a)}{f_P^{II}(d_2, \rho_2, t_0, a) - f_P^{II}(d_2, \rho_2, t_0 + t_r, a) + f_P^{II}(d_2, \rho_2, t_r, a)},$$
(3.2.57)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0, a_z) - f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{II}(d_{a,1}, \rho_{a,1}, t_r, a_z)}{f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0, a_z) - f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_0 + t_r, a) + f_P^{II}(d_{a,2}, \rho_{a,2}, t_r, a_z)}, \quad (3.2.58)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \frac{d+\rho}{d\rho}.$$
 (3.2.59)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ) :

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \frac{d_a + \rho_a}{d_a \rho_a} \,. \tag{3.2.60}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{d_{a,2}\rho_{a,2}(d_{a,1} + \rho_{a,1})}{d_{a,1}\rho_{a,1}(d_{a,2} + \rho_{a,2})}.$$
(3.2.61)

Подбор параметров

Таблича 3.2.17

Полбираемые	параметры и	рекомендуемые	графики
IIUHUNPACMBIC	Hapamelph n	рскомсидусмые	ıpawnkn

Изотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.2.51	k, a	3.2.52	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.2.57	а	3.2.58	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.3. Ограниченный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, ограниченный в разрезе или в плане;
- границы: две прямолинейные параллельные бесконечные, профильные или плановые;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

Рассматривается четыре варианта граничных условий:

вариант 1: две профильные непроницаемые границы (рис. 3.8, а);

вариант 2: две плановые границы обеспеченного питания (условия І рода) (рис. 3.8, б);

вариант 3: две профильные или плановые непроницаемые границы (условия II рода) (рис. 3.8, 6);

вариант 4: две плановые границы со смешанными граничными условиями (условия I и II рода) (рис. 3.8, г).

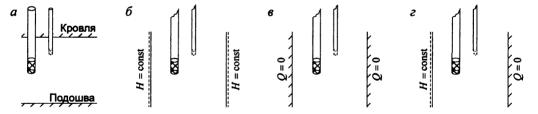


Рис. 3.8. Схематичные разрез (a) и план (δ , ϵ , ϵ) профильных и плановых границ. a – профильные непроницаемые границы; δ – плановые границы обеспеченного питания; ϵ – плановые непроницаемые границы; ϵ – плановые смешанные граничные условия.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин, отраженных от плановых или профильных границ, рассчитываются в зависимости от положения этих границ (рис. 3.9). В анизотропном пласте рассчитываются приведенные расстояния.

- 1. Для профильного расположения границ (см. рис. 3.9, а):
 - расстояния до фиктивных скважин, отраженных от верхней (ρ_1^j) и нижней (ρ_2^j) границ, в изотропном водоносном пласте

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{B_w} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{T_w}\right)^2 + r^2},$$
(3.3.1)

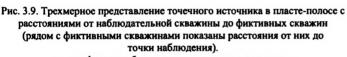
 $2L_{T_{\lambda}}$

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0 = 2,4,\dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0 = 3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + r^2}; (3.3.2)$$

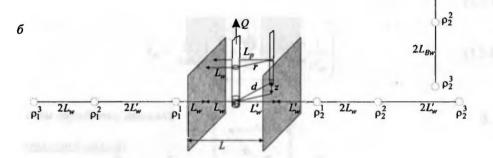
- приведенные расстояния до фиктивных скважин, отраженных от верхней (ρ_{a1}^{j}) и нижней (ρ_{a2}^{j}) границ, в анизотропном водоносном пласте

$$\rho_{a1}^{j} = \sqrt{\left(L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Tw}\right)^2 + (\chi r)^2}, (3.3.3)$$

$$\rho_{a2}^{j} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,...}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,...}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + (\chi r)^2} . (3.3.4)$$



a – профильное; δ – плановое расположение границ.



- 2. Для планового расположения границ (см. рис. 3.9, б):
 - расстояния до фиктивных скважин, отраженных от левой (ρ_1^j) и правой (ρ_2^j) границ, в изотропном водоносном пласте

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2(L - L_w) + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + d^2 - \left(L_w - L_p\right)^2} , \qquad (3.3.5)$$

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(2L - \left(L_p + L_w\right) + \sum_{j_0 = 2,4,\dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_w\right)\right)^2 + d^2 - \left(L_w - L_p\right)^2};$$
 (3.3.6)

– приведенные расстояния до фиктивных скважин, отраженных от левой (ρ_{a1}^{j}) и правой (ρ_{a2}^{j}) границ, в анизотропном водоносном пласте

$$\rho_{a1}^{j} = \sqrt{\chi^{2} \left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w} \right)^{2} + d_{a}^{2} - \chi^{2} \left(L_{w} - L_{p} \right)^{2}}, \quad (3.3.7)$$

$$\rho_{a2}^{j} = \sqrt{\chi^{2} \left(2L - \left(L_{p} + L_{w} \right) + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_{w} \right) \right)^{2} + d_{a}^{2} - \chi^{2} \left(L_{w} - L_{p} \right)^{2}} . \quad (3.3.8)$$

3.3.1. Ограниченный в плане водоносный пласт: границы І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.3);
- границы: две плановые обеспеченного питания (условия I рода);
- пласт неограничен в разрезе и ограничен в плане (пласт-полоса);
- фиктивные скважины: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 3.10, 6;
- типовая схема: рис. 3.10.

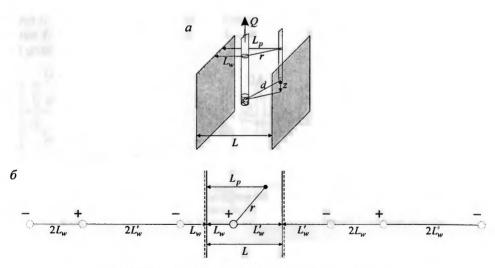


Рис. 3.10. Типовая схема точечного источника в пласте-полосе с параллельными границами обеспеченного питания. a – трехмерное представление; δ – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.3.9) и (3.3.11);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.3.13) и (3.3.14);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.3.20), (3.3.21), (3.3.24) и (3.3.25);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.3.26) и (3.3.27).

Откачка с постоянным расходом

\$ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_P^{I-I} \left(d, \rho_i^j, t, a \right), \tag{3.3.9}$$

$$f_P^{I-I}(d, \rho_i^j, t, a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \operatorname{erfc}\frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.3.10)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} f_P^{I-I} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z \right), \tag{3.3.11}$$

$$f_P^{I-I}(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{ai}^j}{2\sqrt{a_z t}}.$$
 (3.3.12)

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left| \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right|, \tag{3.3.13}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.14)

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.3.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	lg erfc'(2) _ lg _ 1	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{i=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j}), r_{i}^{\prime j} = \rho_{i}^{j} / d$.

Таблица 3.3.2 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (γ)

График фактической	График эталонной	Коэффициент	Вертикальная пьезопроводность,
кривой	кривой	фильтрации по	
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{i=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{ai}^{'j}}$ erfc $(\lambda r_{ai}^{'j})$, $r_{ai}^{'j} = \rho_{ai}^{j} / d_{a}$.

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t, a)}{f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t, a)},$$
(3.3.15)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t, a_z)}{f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t, a_z)},$$
(3.3.16)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right].$$
 (3.3.17)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.18)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.19)

Подбор параметров

Таблица 3.3.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые гр
--

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.3.9	k, a	3.3.11	k_r, k_z, a_z	$s-\lg t$
3.3.15	а	3.3.16	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{I-I} \left(d, \rho_i^J, t_0 + t_r, a \right) + f_P^{I-I} \left(d, \rho_i^J, t_r, a \right) \right], \tag{3.3.20}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{-}} \left[f_{P}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.3.21}$$

❖ Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r, a) - f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_r, a)}{f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r, a) - f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_r, a)},$$
(3.3.22)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z)}{f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z)},$$
(3.3.23)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.3.4 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропн	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.3.20	k, a	3.3.21	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.3.22	а	3.3.23	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{P}^{I-I} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0}, a \right) - f_{P}^{I-I} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}, a \right) + f_{P}^{I-I} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{r}, a \right) \right], \tag{3.3.24}$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left[f_{P}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{P}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.3.25}$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}} \right], \tag{3.3.26}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right]. \tag{3.3.27}$$

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0, a) - f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{I-I}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_r, a)}{f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0, a) - f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{I-I}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_r, a)},$$
(3.3.28)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0, a_z) - f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z)}{f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0, a_z) - f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z)}, (3.3.29)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d} + \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{i}} \right].$$
 (3.3.30)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.31)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.32)

Подбор параметров

Таблица 3.3.5

подопраемые параметры и рекомендуемые графики	Подбираемые параметры	и и рекомендуемые граф	ики
---	-----------------------	------------------------	-----

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт			
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
3.3.24	k, a	3.3.25	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$	
3.3.28	а	3.3.29	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2} - \lg t_r$	

3.3.2. Ограниченный в плане или в разрезе водоносный пласт: границы II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.3);
- границы: две профильные или плановые непроницаемые (условия II рода);
- если границы располагаются в разрезе, то принимается неограниченность пласта в плане и, наоборот, если имеются плановые границы, то пласт неограничен в разрезе;
- фиктивная скважина: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 3.11, 6; г;
- типовая схема: рис. 3.11.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.3.33) и (3.3.35);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.3.37) и (3.3.38);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.3.44), (3.3.45), (3.3.48) и (3.3.49);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.3.50) и (3.3.51).

Замечание

Решения и обработка не зависят от положения границ. Изменяется только расчет расстояний до отраженных скважин.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_P^{II-II} (d, \rho_i^j, t, a), \tag{3.3.33}$$

$$f_P^{II-II}(d, \rho_i^j, t, a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.3.34)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{r}} f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t, a_{z} \right), \tag{3.3.35}$$

$$f_P^{II-II}(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{ai}^j}{2\sqrt{a_z t}}.$$
 (3.3.36)

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right], \tag{3.3.37}$$

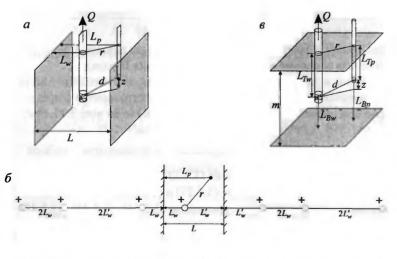
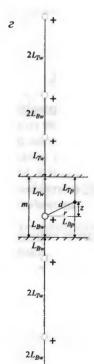


Рис. 3.11. Типовая схема точечного источника в пласте-полосе с параллельными непроницаемыми границами.

a, b — трехмерное представление и план для планового расположения-границ; b, c — трехмерное представление и разрез для профильного расположения границ.



$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right]. \tag{3.3.38}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.3.6 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	1g erfc'(2) _ 1g _ 1	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} \frac{1}{r_i^{ij}}$ erfc (λr_i^{ij}) , $r_i^{ij} = \rho_i^j / d$.

Таблица 3.3.7 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(λ) = erfc λ + $\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{ai}^{'j}}$ erfc $\left(\lambda r_{ai}^{'j}\right)$, $r_{ai}^{'j} = \rho_{ai}^{j} / d_{a}$.

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t, a)}{f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t, a)},$$
(3.3.39)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t, a_z)}{f_P^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t, a_z)},$$
(3.3.40)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (*k*) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right]. \tag{3.3.41}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.42)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.43)

Подбор параметров

Таблица 3.3.8

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотрог	пный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.3.33	k, a	3.3.35	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.3.39	а	3.3.40	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{II-II} \left(d, \rho_i^j, t_0 + t_r, a \right) - f_P^{II-II} \left(d, \rho_i^j, t_r, a \right) \right], \tag{3.3.44}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{+}} \left[f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) - f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.3.45}$$

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r, a) - f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_r, a)}{f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r, a) - f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_r, a)},$$
(3.3.46)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{II-II} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z \right) - f_P^{II-II} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z \right)}{f_P^{II-II} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z \right) - f_P^{II-II} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z \right)},$$
(3.3.47)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.3.9 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.3.44	k, a	3.3.45	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.3.46	а	3.3.47	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{P}^{II-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0}, a \right) - f_{P}^{II-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}, a \right) + f_{P}^{II-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{r}, a \right) \right], \quad (3.3.48)$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left[f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.3.49}$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_i^j} \right], \tag{3.3.50}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right]. \tag{3.3.51}$$

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0, a) - f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{II-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_r, a)}{f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0, a) - f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{II-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_r, a)}, \quad (3.3.52)$$

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{II-II} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0, a_z \right) - f_P^{II-II} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z \right) + f_P^{II-II} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z \right)}{f_P^{II-II} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0, a_z \right) - f_P^{II-II} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z \right) + f_P^{II-II} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z \right)}, (3.3.53)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}} \right].$$
 (3.3.54)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.55)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.56)

Подбор параметров

Таблица 3.3.10 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотрог	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.3.48	k, a	3.3.49	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.3.52	а	3.3.53	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.3.3. Ограниченный в плане водоносный пласт: границы I и II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.3);
- границы: две плановые со смешанными граничными условиями (условия I и II рода);
- пласт неограничен в разрезе и ограничен в плане (пласт-полоса);
- фиктивные скважины: ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 3.12, 6;

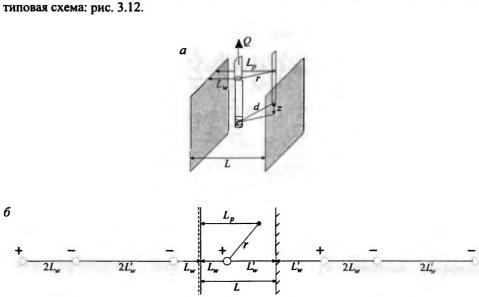


Рис. 3.12. Типовая схема точечного источника в пласте-полосе с двумя параллельными границами, одна из которых граница обеспеченного питания, а другая непроницаемая граница. a – трехмерное представление; δ – план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.3.57) и (3.3.59);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.3.61) и (3.3.62);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.3.68), (3.3.69), (3.3.72) и
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.3.74) и (3.3.75).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_P^{I-II} \left(d, \rho_i^j, t, a \right), \tag{3.3.57}$$

$$f_P^{I-II}(d, \rho_i^j, t, a) = \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}} + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}} \end{bmatrix}; \quad (3.3.58)$$

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} f_P^{I-II} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z \right), \tag{3.3.59}$$

$$f_P^{I-II}(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z) = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai}^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{ai}^j}{2\sqrt{a_z t}} + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_i^j}{2\sqrt{a_z t}} \end{bmatrix}. \quad (3.3.60)$$

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{\left(-1\right)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^n \left(-1\right)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right], \tag{3.3.61}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai}^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.62)

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.3.11 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

nabelier population of the case of t				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут	
$\frac{\lg(ds)-\lg\frac{t}{d^2}}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$	
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$	

Примечание.

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j}), \ r_{i}^{\prime j} = \frac{\rho_{i}^{j}}{d}.$$

Таблица 3.3.12 Расчетные формулы для определення параметров анизотропного пласта

при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м²/сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_{ai}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{ai}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{ai}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{a1}^{\prime j}), \ r_{ai}^{\prime j} = \frac{\rho_{ai}^{j}}{d_{a}}.$$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t, a)}{f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t, a)},$$
(3.3.63)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t, a_z)}{f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t, a_z)},$$
(3.3.64)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному понижению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_i^j} \right].$$
(3.3.65)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному понижению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai}^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
(3.3.66)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных понижений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,1}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,2}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.67)

Подбор параметров

Таблица 3.3.13

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.3.57	k, a	3.3.59	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.3.63	а	3.3.64	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{I-II} \left(d, \rho_i^J, t_0 + t_r, \alpha \right) + f_P^{I-II} \left(d, \rho_i^J, t_r, \alpha \right) \right], \tag{3.3.68}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^{I-II} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t_0 + t_r, a_z \right) + f_P^{I-II} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t_r, a_z \right) \right]. \tag{3.3.69}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^J, t_0 + t_r, a) - f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^J, t_r, a)}{f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^J, t_0 + t_r, a) - f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^J, t_r, a)},$$
(3.3.70)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z)}{f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z) - f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z)},$$
(3.3.71)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.3.14

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп н	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.3.68	k, a	3.3.69	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.3.70	а	3.3.71	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{P}^{I-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0}, a \right) - f_{P}^{I-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}, a \right) + f_{P}^{I-II} \left(d, \rho_{i}^{j}, t_{r}, a \right) \right], \quad (3.3.72)$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left[f_{P}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{P}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.3.73}$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left(\frac{(-1)^{(j+1)/2}}{\rho_1^j} + \frac{(-1)^{(j+3)/2}}{\rho_2^j} \right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right], \quad (3.3.74)$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left(\frac{(-1)^{(j+1)/2}}{\rho_{a1}^j} + \frac{(-1)^{(j+3)/2}}{\rho_{a2}^j} \right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right]. \quad (3.3.75)$$

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0, a) - f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{I-II}(d_1, \rho_{i,1}^j, t_r, a)}{f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0, a) - f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_0 + t_r, a) + f_P^{I-II}(d_2, \rho_{i,2}^j, t_r, a)},$$
(3.3.76)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0, a_z) - f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t_r, a_z)}{f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0, a_z) - f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_0 + t_r, a_z) + f_P^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t_r, a_z)}, (3.3.77)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_i^j} \right].$$
 (3.3.78)

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{i=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai}^j} + \sum_{i=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right].$$
 (3.3.79)

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,1}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,2}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}}.$$
(3.3.80)

Подбор параметров

Таблица 3.3.15 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотрог	пный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.3.72	k, a	3.3.73	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.3.76	а	3.3.77	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.4. Пласт-квадрант

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, полуограничен в разрезе и в плане или ограничен в плане и неограничен в разрезе;
- границы: две пересекающиеся под прямым углом прямолинейные полуограниченные, профильные и/или плановые;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

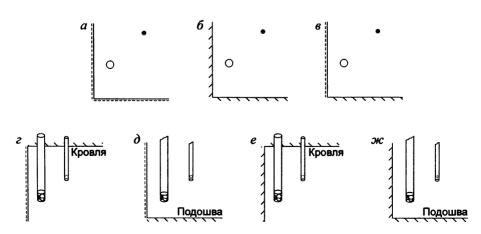


Рис. 3.13. Схематичные планы (a - b) и разрезы $(z - \infty)$.

a, 6, s — плановые границы: обеспеченного питания (a), непроницаемые (b) и смешанные (b); c, d — разрезы с плановой границей обеспеченного питания; e, ∞ — разрезы с плановой непроницаемая границей.

вариант 2: две плановые граница обеспеченного питания (условия гр

вариант 3: две плановые границы со смещанными граничными условиями (условия I и II рода;

вариант 4: плановая граница обеспеченного питания (условие І рода) и профильная непроницаемая граница (условие ІІ рода);

вариант 5: плановая и профильная границы непроницаемые (условия ІІ рода).

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин, отраженных от плановых или профильных границ, рассчитываются в зависимости от положения границ. В анизотропном пласте рассчитывается приведенное расстояние.

- 1. Плановое расположение пласта-квадранта
 - расстояния до фиктивных скважин (используются при расчетах параметров изотропного водоносного пласта)

$$\rho_1 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' - L_p')^2 + z^2},$$
(3.4.1)

$$\rho_2 = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2 + z^2} , \qquad (3.4.2)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2 + z^2}; \qquad (3.4.3)$$

приведенные расстояния до фиктивных скважин (используются при расчетах параметров анизотропного водоносного пласта)

$$\rho_{a1} = \sqrt{\chi^2 (L_w + L_p)^2 + \chi^2 (L_w' - L_p')^2 + z^2},$$
(3.4.4)

$$\rho_{a2} = \sqrt{\chi^2 (L_w - L_p)^2 + \chi^2 (L_w' + L_p')^2 + z^2} , \qquad (3.4.5)$$

$$\rho_{a3} = \sqrt{\chi^2 (L_w + L_p)^2 + \chi^2 (L_w' + L_p')^2 + z^2} . \tag{3.4.6}$$

- 2. Профильное расположение пласта-квадранта (расстояния используются при расчетах параметров изотропного водоносного пласта):
 - расстояние до фиктивной скважины, отраженной от плановой границы, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_1 = \sqrt{4L_w L_p + (L_{Tw} - L_{Tp})^2 + r^2} , \qquad (3.4.7)$$

$$\rho_1 = \sqrt{4L_w L_p + (L_{Bw} - L_{Bp})^2 + r^2} ; (3.4.8)$$

 расстояние до фиктивной скважины, отраженной соответственно от кровли или от подошвы водоносного пласта

$$\rho_2 = \sqrt{\left(L_{Bw} + L_{Bp}\right)^2 + r^2} \; ; \tag{3.4.10}$$

 расстояние до фиктивной скважины, отраженной от фиктивных скважин, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_3 = \sqrt{4L_w L_p + (L_{Tw} + L_{Tp})^2 + r^2} , \qquad (3.4.11)$$

$$\rho_3 = \sqrt{4L_w L_p + (L_{Bw} + L_{Bp})^2 + r^2} . \tag{3.4.12}$$

- 3. Профильное расположение пласта-квадранта (расстояния используются при расчетах параметров анизотропного водоносного пласта):
 - приведенное расстояние до фиктивной скважины, отраженной от плановой границы, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_{a1} = \sqrt{4\chi^2 L_w L_p + (L_{Tw} - L_{Tp})^2 + \chi^2 r^2},$$
(3.4.13)

$$\rho_{a1} = \sqrt{4\chi^2 L_w L_p + (L_{Bw} - L_{Bp})^2 + \chi^2 r^2}; \qquad (3.4.14)$$

 приведенное расстояние до фиктивной скважины, отраженной соответственно от кровли или от подошвы водоносного пласта

$$\rho_{a2} = \sqrt{\left(L_{Tw} + L_{Tp}\right)^2 + \chi^2 r^2} , \qquad (3.4.15)$$

$$\rho_{a2} = \sqrt{(L_{Bw} + L_{Bp})^2 + \chi^2 r^2} ; {(3.4.16)}$$

 приведенное расстояние до фиктивной скважины, отраженной от фиктивных скважин, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_{a3} = \sqrt{4\chi^2 L_w L_p + (L_{Tw} + L_{Tp})^2 + \chi^2 r^2},$$
(3.4.17)

$$\rho_{a3} = \sqrt{4\chi^2 L_w L_p + (L_{Bw} + L_{Bp})^2 + \chi^2 r^2} . \tag{3.4.18}$$

Замечание

Решения и обработка для пласта-квадранта не зависят от положения границ. Изменяется только расчет расстояний до отраженных скважин.

3.4.1. Плановый пласт-квадрант: границы І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.4);
- границы: две пересекающиеся в плане прямолинейные границы обеспеченного питания (условия I рода);
- пласт неограничен в разрезе;
- фиктивные скважины: три, знаки расходов см. на рис. 3.14, δ ;
- типовая схема: рис. 3.14.

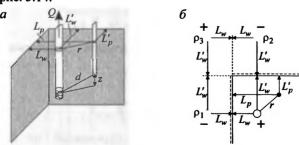


Рис. 3.14. Типовая схема точечного источника в плановом пласте-квадранте с границами обеспеченного питания. a – трехмерное представление; b – план.

Список решений:

понижение для нестационарного периода: уравнения (3.4.19) и (3.4.21);

- понижение для стационарного периода: уравнения (3.4.23) и (3.4.24);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.4.30), (3.4.31), (3.4.34) и (3.4.35);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.4.36) и (3.4.37).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_j, t, a), \qquad (3.4.19)$$

$$f_{PQ}^{I-I}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{n_j}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.4.20)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{r}} f_{PQ}^{I-I} (d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z}), \tag{3.4.21}$$

$$f_{PQ}^{I-I}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1}^3 \frac{n_j}{\rho_{aj}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}},$$
 (3.4.22)

где $n_1 = -1$, $n_2 = -1$, $n_3 = 1$.

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right), \tag{3.4.23}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} - \frac{1}{\rho_{a2}} + \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.24}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.4.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\operatorname{igene}(\lambda) - \operatorname{ig}\frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{i=1}^{3} \frac{n_{j}}{r'_{i}}$ erfc($\lambda r'_{j}$), $r'_{j} = \rho_{j} / d$.

Таблица 3.4.2 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (γ)

График фактической	График эталонной	Коэффициент	Вертикальная
кривой	т рафик эталонной кривой	фильтрации по горизонтали, м/сут	пьезопроводность, м²/сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{i=1}^{3} \frac{n_{j}}{r'_{aj}}$ erfc($\lambda r'_{aj}$), $r'_{aj} = \rho_{aj} / d_{a}$.

Способ прямой линии

Таблица 3.4.3 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	$s_m - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3}\right)$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t, a)}{f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t, a)},$$
(3.4.25)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t, a_z)}{f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t, a_z)},$$
(3.4.26)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right). \tag{3.4.27}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} - \frac{1}{\rho_{a2}} + \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.28}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{\rho_{a1,1}} - \frac{1}{\rho_{a2,1}} + \frac{1}{\rho_{a3,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} - \frac{1}{\rho_{a1,2}} - \frac{1}{\rho_{a2,2}} + \frac{1}{\rho_{a3,2}}}.$$
(3.4.29)

Подбор параметров

Таблица 3.4.4 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.4.19	k, a	3.4.21	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.4.25	а	3.4.26	a_z, χ	$s_1/s_2-\lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_j, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_j, t_r, a) \right], \tag{3.4.30}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_{PQ}^{I-I} \left(d_a, \rho_j, t_0 + t_r, a_z \right) - f_{PQ}^{I-I} \left(d_a, \rho_j, t_r, a_z \right) \right]. \tag{3.4.31}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.4.32)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)},$$
(3.4.33)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.4.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.4.30	k, a	3.4.31	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.4.32	a	3.4.33	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_{j}, t_{0}, a) - f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_{j}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PQ}^{I-I}(d, \rho_{j}, t_{r}, a) \right], \tag{3.4.34}$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{PQ}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{PQ}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.4.35}$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right), \tag{3.4.36}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} - \frac{1}{\rho_{a2}} + \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.37}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблииа 3.4.6

Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3}\right)$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t_0, a) - f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{I-I}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t_0, a) - f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{I-I}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.4.38)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\begin{bmatrix} f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0, a_z) - f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) + \\ + f_{PQ}^{I-I}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0, a_z) - f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) + \\ + f_{PQ}^{I-I}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z) \end{bmatrix}},$$
(3.4.39)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному понижению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right). \tag{3.4.40}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному понижению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} - \frac{1}{\rho_{a2}} + \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.41}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{\rho_{a1,1}} - \frac{1}{\rho_{a2,1}} + \frac{1}{\rho_{a3,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} - \frac{1}{\rho_{a1,2}} - \frac{1}{\rho_{a2,2}} + \frac{1}{\rho_{a3,2}}}.$$
 (3.4.42)

Подбор параметров

Таблица 3.4.7 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.4.34	k, a	3.4.35	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.4.38	а	3.4.39	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.4.2. Плановый или профильный пласт-квадрант: границы II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.4);
- границы: две пересекающиеся в плане или в профиле прямолинейные непроницаемые (условия II рода);
- пласт полуограничен в разрезе и в плане или неограничен в разрезе и ограничен в плане (в зависимости от расположения границ);
- фиктивные скважины: три, знаки расходов см. на рис. 3.15, δ , ϵ , e;
- типовая схема: рис. 3.15.

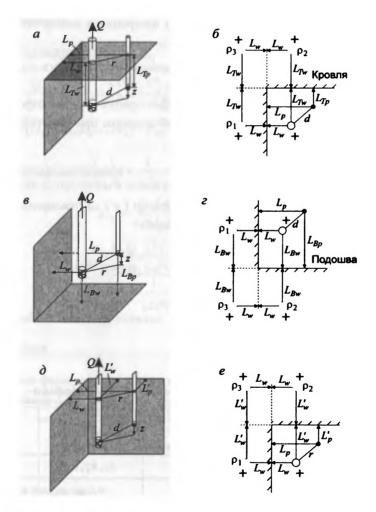


Рис. 3.15. Типовая схема точечного источника в пласте-квадранте с непроницаемыми границами (рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения).

а, 6 — трехмерное представление и разрез (граница — кровля пласта) для профильного расположения пласта-квадранта; в, г — трехмерное представление и разрез (граница — подошва пласта) для профильного расположения пласта-квадранта; д, е — трехмерное представление и план для планового расположения пласта-квадранта.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.4.43) и (3.4.45);
- понижение для квазистационарного периода: уравнения (3.4.47) и (3.4.48);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.4.49) и (3.4.50);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.4.56), (3.4.57), (3.4.62) и (3.4.63);
- восстановление для квазистационарного периода: уравнения (3.4.58), (3.4.59), (3.4.64) и (3.4.65);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.4.66) и (3.4.67).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PQ}^{II-II}(d, \rho_j, t, a), \tag{3.4.43}$$

$$f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.4.44)

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{-}} f_{PQ}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z} \right), \tag{3.4.45}$$

$$f_{PQ}^{II-II}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_{aj}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}}.$$
 (3.4.46)

Уравнения для квазистационарного периода

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_{j}} - \frac{4}{\sqrt{\pi at}} \right), \tag{3.4.47}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_{aj}} - \frac{4}{\sqrt{\pi a_z t}} \right). \tag{3.4.48}$$

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\rho_i} \right), \tag{3.4.49}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\rho_{ai}} \right). \tag{3.4.50}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.4.8 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\operatorname{igene}(\lambda) - \operatorname{ig} \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc λ + $\sum_{j=1}^{3} \frac{1}{r'_{j}}$ erfc $(\lambda r'_{j})$, $r'_{j} = \rho_{j} / d$.

Таблица 3.4.9 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}), \ r'_{aj} = \rho_{aj} / d_a$$
.

Способ прямой линии

Таблица 3.4.10 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

The second of th				
Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м²/сут	
Временное прослеживание	$s - \frac{1}{\sqrt{t}}$	$k = \frac{QR'}{4\pi A}$	$a = \left(\frac{4A}{CR'\sqrt{\pi}}\right)^2$	
Площадное прослеживание	s – R'	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a = \frac{(4C/A)^2}{\pi t}$	
Комбинированное прослеживание	$\frac{s}{R'} - \frac{1}{R'\sqrt{t}}$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a = \frac{\left(4A/C\right)^2}{\pi}$	

Примечание.
$$R' = \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_j}$$
.

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t, a)}{f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t, a)},$$
(3.4.51)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t, a_z)}{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t, a_z)},$$
(3.4.52)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_j} \right). \tag{3.4.53}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_{aj}} \right). \tag{3.4.54}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_{aj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_{aj,2}}}.$$
 (3.4.55)

Подбор параметров

Таблица 3.4.11 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.4.43	k, a	3.4.45	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.4.51	а	3.4.52	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{II-II} \left(d, \rho_j, t_0 + t_r, a \right) - f_{PQ}^{II-II} \left(d, \rho_j, t_r, a \right) \right], \tag{3.4.56}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_{PQ}^{II-II} \left(d_a, \rho_{aj}, t_0 + t_r, a_z \right) - f_{PQ}^{II-II} \left(d_a, \rho_{aj}, t_r, a_z \right) \right]. \tag{3.4.57}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Qt'}{\sqrt{\pi^3} k \sqrt{a}},\tag{3.4.58}$$

$$s = \frac{Qt'}{\sqrt{\pi^3}k_r\sqrt{a_r}}. (3.4.59)$$

Таблииа 3.4.12

где t' – см. уравнение (3.1.55).

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Временное

Определяется обобщенный параметр - произведение коэффициента фильтрации на корень из пьезопроводности ($k\sqrt{a}$ или $k_r\sqrt{a_r}$).

Расчетные формулы для определения параметров

 График
 Изотропный пласт
 Анизотропный пласт

 s-t' $k\sqrt{a} = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3}C}$ $k_r\sqrt{a_z} = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3}C}$ Способ обработки Анизотропный пласт График прослеживание

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.4.60)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласт

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)},$$
(3.4.61)

вертикальной пьезопроводности (а,) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.4.13 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотрог	Изотропный пласт Анизотро		Анизотропный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.4.56	k, a	3.4.57	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.4.60	а	3.4.61	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_{j},t_{0},a) - f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_{j},t_{0}+t_{r},a) + f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_{j},t_{r},a) \right], \quad (3.4.62)$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{PQ}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{PQ}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.4.63}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_j} + \frac{4t''}{\sqrt{\pi a}} \right), \tag{3.4.64}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{4t''}{\sqrt{\pi a_z t}} \right). \tag{3.4.65}$$

где t'' – см. уравнение (3.1.62).

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_j} \right), \tag{3.4.66}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\rho_{aj}} \right). \tag{3..4.67}$$

Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 3.4.14 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

		• • •	
Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м²/сут
Временное прослеживание	$s_r - \frac{1}{\sqrt{t''}}$	$k = \frac{QR'}{4\pi A}$	$a = \left(\frac{4A}{CR'\sqrt{\pi}}\right)^2$
Площадное прослеживание	$s_r - R'$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$	$a = \frac{\left(4C/A\right)^2}{\pi t''}$
Комбинированное прослеживание	$\frac{s_r}{R'} - \frac{1}{R'\sqrt{t''}}$	$k = \frac{Q}{4\pi A}$	$a = \frac{(4A/C)^2}{\pi}$

Примечание.
$$R' = \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_j}$$
.

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_{r1}}{s_{r2}} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0, a) - f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{II-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0, a) - f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{II-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)}, \quad (3.4.68)$$

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0, a_z) - f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PQ}^{II-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0, a_z) - f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PQ}^{II-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)}, (3.4.69)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_j} \right). \tag{3.4.70}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{\rho_{ai}} \right). \tag{3.4.71}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_{aj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{\rho_{aj,2}}}.$$
(3.4.72)

Подбор параметров

Таблица 3.4.15 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
3.4.62	k, a	3.4.63	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$		
3.4.68	а	3.4.69	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$		

3.4.3. Плановый или профильный пласт-квадрант: границы I и II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 3.4);
- границы: две пересекающиеся в плане или в профиле прямолинейные непроницаемые (условия II рода);
- пласт полуограничен в разрезе и в плане;
- фиктивные скважины: три, знаки расходов см. на рис. 3.16, δ , ε , e;
- типовая схема: рис. 3.16.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.4.73) и (3.4.75);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.4.77) и (3.4.78);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.4.84), (3.4.85), (3.4.88) и (3.4.89);
- восстановление для стационарного периода: уравнения (3.4.90) и (3.4.91).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение:

для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PQ}^{I-II}(d, \rho_j, t, a), \tag{3.4.73}$$

$$f_{PQ}^{I-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{n_j}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.4.74)

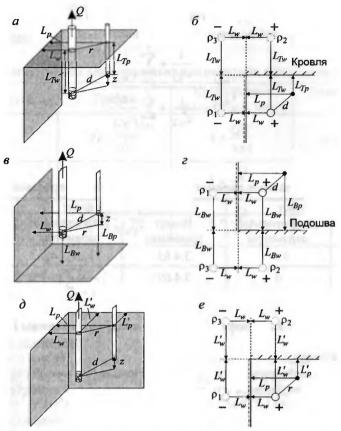


Рис. 3.16. Типовая схема точечного источника в пласте-квадранте со смешанными граничными условиями (рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения).

а, б – трехмерное представление и разрез (граница – кровля пласта) для профильного расположения пласта-квадранта; в, г – трехмерное представление и разрез (граница – подошва пласта) для профильного расположения пласта-квадранта; д, е – трехмерное представление и план для планового расположения пласта-квадранта.

для анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{x}} f_{PQ}^{I-II} (d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z}), \tag{3.4.75}$$

$$f_{PQ}^{I-II}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{i=1}^3 \frac{n_j}{\rho_{ai}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}},$$
 (3.4.76)

где $n_1 = -1$, $n_2 = 1$, $n_3 = -1$.

Уравнения для периода стационара

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3} \right), \tag{3.4.77}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_0} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{Q_{12}} + \frac{1}{Q_{22}} - \frac{1}{Q_{23}} \right). \tag{3.4.78}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.4.16 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	la orfo/(1) la 1	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. erfc'(λ) = erfc λ + $\sum_{j=1}^{3} \frac{n_j}{r'_j}$ erfc($\lambda r'_j$), $r'_j = \rho_j / d$.

Таблица 3.4.17 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропни (γ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. $\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{3} \frac{n_{j}}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}), \ r'_{aj} = \rho_{aj} / d_{a}$.

Способ прямой линии

Таблица 3.4.18 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	$s_m - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3}\right)$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t, a)}{f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t, a)},$$
(3.4.79)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t, a_z)}{f_{PQ}^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t, a_z)},$$
(3.4.80)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3} \right). \tag{3.4.81}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} + \frac{1}{\rho_{a2}} - \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.82}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{\rho_{a1,1}} + \frac{1}{\rho_{a2,1}} - \frac{1}{\rho_{a3,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} - \frac{1}{\rho_{a1,2}} + \frac{1}{\rho_{a2,2}} - \frac{1}{\rho_{a3,2}}}.$$
 (3.4.83)

Подбор параметров

Таблица 3.4.19

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропн	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.4.73	k, a	3.4.75	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.4.79	а	3.4.80	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-II} \left(d, \rho_j, t_0 + t_r, a \right) - f_{PQ}^{I-II} \left(d, \rho_j, t_r, a \right) \right], \tag{3.4.84}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_{PQ}^{I-II} \left(d_a, \rho_j, t_0 + t_r, a_z \right) - f_{PQ}^{I-II} \left(d_a, \rho_j, t_r, a_z \right) \right]. \tag{3.4.85}$$

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) - f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.4.86)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PQ}^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{I-II}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PQ}^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PQ}^{I-II}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)},$$
(3.4.87)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.4.20 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотрог	ный пласт	Анизотро	пный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.4.84	k, a	3.4.85	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.4.86	а	3.4.87	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t,$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-II}(d, \rho_{j}, t_{0}, a) - f_{PQ}^{I-II}(d, \rho_{j}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PQ}^{I-II}(d, \rho_{j}, t_{r}, a) \right], \quad (3.4.88)$$

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PQ}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0}, a_{z} \right) - f_{PQ}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{PQ}^{I-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. (3.4.89)$$

Уравнения для периода стационара

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3} \right), \tag{3.4.90}$$

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} + \frac{1}{\rho_{a2}} - \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.91}$$

***** Способы обработки восстановления

Способ прямой линии

Таблица 3.4.21 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	$s_{mr} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3}\right)$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0, a) - f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{I-II}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0, a) - f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) + f_{PQ}^{I-II}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)}, \quad (3.4.92)$$

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PQ}^{I-II}\left(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0, a_z\right) - f_{PQ}^{I-II}\left(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z\right) + f_{PQ}^{I-II}\left(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z\right)}{f_{PQ}^{I-II}\left(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0, a_z\right) - f_{PQ}^{I-II}\left(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z\right) + f_{PQ}^{I-II}\left(d_2, \rho_{aj,2}, t_r, a_z\right)}, (3.4.93)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3} \right). \tag{3.4.94}$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по максимальному восстановлению в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_{mr}} \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{\rho_{a1}} + \frac{1}{\rho_{a2}} - \frac{1}{\rho_{a3}} \right). \tag{3.4.95}$$

3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению максимальных восстановлений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{mr,1}}{s_{mr,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} - \frac{1}{\rho_{a1,1}} - \frac{1}{\rho_{a2,1}} + \frac{1}{\rho_{a3,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} - \frac{1}{\rho_{a1,2}} - \frac{1}{\rho_{a2,2}} + \frac{1}{\rho_{a3,2}}}.$$
(3.4.96)

Подбор параметров

Таблица 3.4.22 Полбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	Изотропный пласт		Анизотропный пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График
3.4.88	k, a	3.4.89	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.4.92	а	3.4.93	a_z, χ^i	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.5. U-образный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, ограничен в разрезе или в плане и соответственно полуограничен в плане или в разрезе;
- границы: две параллельные полуограниченные прямолинейные границы и одна ограниченная прямолинейная, перпендикулярная к параллельным границам; если параллельные границы располагаются в разрезе, то пласт полуограничен в плане и, наоборот, если параллельные границы расположены в плане, то пласт полуограничен в разрезе;
- фиктивные скважины: два ряда бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 3.20;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- типовые схемы: рис. 3.18.

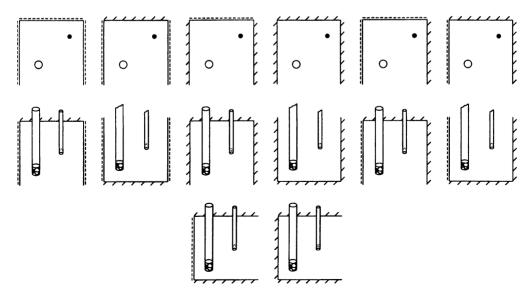


Рис. 3.17. Схемы возможных положений и граничных условий U-образного пласта. Верхний ряд: плановые схематичные рисунки для U-образных горизонтов, неограниченных в разрезе; средний ряд: схематичные разрезы для полуограниченных в разрезе и ограниченных в плане U-образных пластов; нижний ряд: схематичные разрезы для ограниченных в разрезе и полуограниченных в плане U-образных пластов.

Рассматривается четырнадцать вариантов расположения границ и граничных условий:

- шесть вариантов планового расположения граничных условий (пласт неограничен в разрезе) (рис. 3.17, верхний ряд):
 - вариант 1: параллельные границы І рода, перпендикулярная граница І рода,
 - вариант 2: параллельные границы I рода, перпендикулярная граница II рода,
 - вариант 3: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница I рода,
 - вариант 4: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница II рода,
 - вариант 5: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница I рода,
- вариант 6: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница II рода;
- шесть вариантов ограниченного в плане пласта (непроницаемая профильная граница расположена в кровле или подошве пласта – пласт полуограничен в разрезе) (рис. 3.17, средний ряд):
 - вариант 7: плановые границы І рода, пласт ограничен кровлей,
 - вариант 8: плановые границы І рода, пласт ограничен подошвой,
 - вариант 9: плановые границы II рода, пласт ограничен кровлей,
 - вариант 10: плановые границы II рода, пласт ограничен подошвой,
 - вариант 11: плановые границы I и II рода, пласт ограничен кровлей,
 - вариант 12: плановые границы I и II рода, пласт ограничен подошвой;
- два варианта полуограниченного в плане пласта (непроницаемые профильные границы

 пласт ограничен в разрезе) (рис. 3.17, нижний ряд):
 - вариант 13: плановая граница І рода,
 - вариант 14: плановая граница II рода.

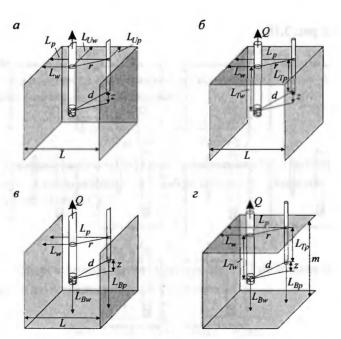


Рис. 3.18. Трехмерное представление точечного источника в U-образном водоносном пласте. a – пласт неограничен в разрезе и ограничен в плане; b – пласт полуограничен в разрезе (граница – кровля) и ограничен в плане; b – пласт полуограничен в разрезе (граница – подошва) и ограничен в плане; b – пласт ограничен в разрезе и полуограничен в плане.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин, отраженных от плановых или профильных границ, рассчитываются в зависимости от положения границ (рис. 3.19). В анизотропном пласте рассчитываются приведенные расстояния.

- 1. Ограниченный в разрезе водоносный пласт
 - а) расстояния до фиктивных скважин:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_1^{j} = \sqrt{\left(L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{B_w} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{T_w}\right)^2 + r^2},$$
(3.5.1)

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + r^2};$$
 (3.5.2)

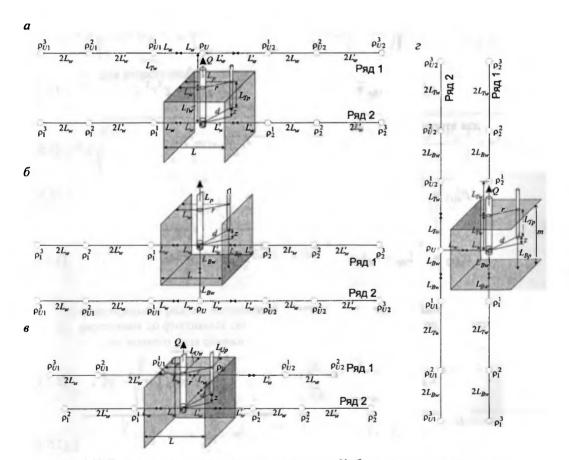


Рис. 3.19. Трехмерное представление точечного источника в U-образном пласте с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин

(рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения). a — мощность ограничена кровлей пласта; b — мощность ограничена подошвой пласта; b — неограниченный в разрезе пласт; b — полуограниченный в плане и неограниченный в разрезе пласт.

для второго ряда скважин

$$\rho_U = \sqrt{4L_w L_p + 2r^2 - (L_w - L_p)^2} , \qquad (3.5.3)$$

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{Tw}\right)^2 + 4L_w L_p + r^2},$$
 (3.5.4)

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + 4L_w L_p + r^2};$$
 (3.5.5)

- б) приведенные расстояния до фиктивных скважин при определении параметров в анизотропном водоносном пласте:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_{a1}^{j} = \sqrt{\left(L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0 = 2,4,\dots}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_0 = 3,5,\dots}^{j} 2L_{Tw}\right)^2 + \chi^2 r^2},$$
 (3.5.6)

$$\rho_{a2}^{j} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + \chi^2 r^2};$$
 (3.5.7)

для второго ряда скважин

$$\rho_{aU} = \chi \sqrt{4L_w L_p + 2r^2 - (L_w - L_p)^2} , \qquad (3.5.8)$$

$$\rho_{aU1}^{j} = \sqrt{\left(L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_{Tw}\right)^2 + \chi^2 \left(4L_w L_p + r^2\right)},$$
 (3.5.9)

$$\rho_{aU2}^{j} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw}\right)^2 + \chi^2 \left(4L_w L_p + r^2\right)}.$$
 (3.5.10)

- 2. Полуограниченный в разрезе водоносный пласт
 - а) расстояния до фиктивных скважин:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2(L - L_w) + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2 + z^2} , \qquad (3.5.11)$$

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(2L - \left(L_p + L_w\right) + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2\left(L - L_w\right)\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2 + z^2}; \quad (3.5.12)$$

для второго ряда скважин

$$\rho_U = \sqrt{(B_w + B_p)^2 + r^2} \,, \tag{3.5.13}$$

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + \left(B_{w} + B_{p}\right)^{2} + r^{2}}, (3.5.14)$$

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + \left(B_{w} + B_{p}\right)^{2} + r^{2}}; (3.5.15)$$

- б) приведенные расстояния до фиктивных скважин при определении параметров в анизотропном водоносном пласте:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_{a1}^{j} = \chi \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2} + \left(\frac{z}{\chi}\right)^{2}}, \quad (3.5.16)$$

$$\rho_{a2}^{j} = \chi \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2} + \left(\frac{z}{\chi}\right)^{2}}; (3.5.17)$$

- для второго ряда скважин

$$\rho_{aU} = \sqrt{(B_w + B_p)^2 + \chi^2 r^2} , \qquad (3.5.18)$$

$$\rho_{aU1}^{j} = \chi \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + \left(\frac{B_{w} + B_{p}}{\chi}\right)^{2} + r^{2}}, (3.5.19)$$

$$\rho_{aU2}^{j} = \chi \sqrt{\frac{2L - (L_p + L_w) + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2(L - L_w)}{-(L_w - L_p)^2 + \left(\frac{B_w + B_p}{\chi}\right)^2 + r^2}}.$$
(3.5.20)

- 3. Неограниченный в разрезе водоносный пласт
 - а) расстояния до фиктивных скважин:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2(L - L_w) + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2 + z^2}, \quad (3.5.21)$$

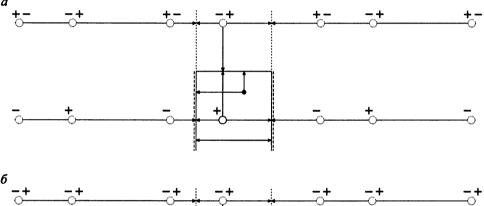
$$\rho_2^j = \sqrt{\left(2L - \left(L_p + L_w\right) + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2\left(L - L_w\right)\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2 + z^2}; \quad (3.5.22)$$

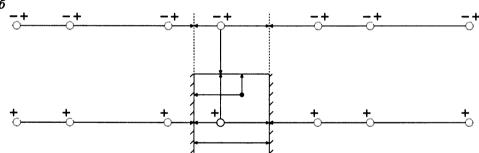
- для второго ряда скважин

$$\rho_U = \sqrt{4L_{Uw}L_{Up} + 2r^2 - (L_{Uw} - L_{Up})^2} , \qquad (3.5.23)$$

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^{2} + r^{2}},$$
 (3.5.24)

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^{2} + r^{2}}; \quad (3.5.25)$$





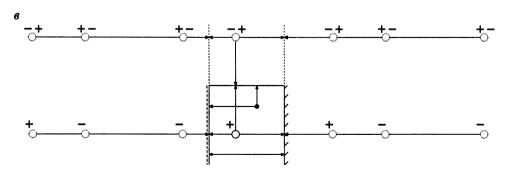


Рис. 3.20. Схемы со знаками расходов отраженных скважин.

а – для параллельных границ обеспеченного питания;
 б – для параллельных границ со смешанными условиями. Для второго ряда фиктивных скважин знак расхода дается вначале для перпендикулярной границы обеспеченного питания, а затем для перпендикулярной непроницаемой границы.

- б) приведенные расстояния до фиктивных скважин при определении параметров в анизотропном водоносном пласте:
 - для первого ряда скважин

$$\rho_{a1}^{j} = \chi \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2} + \left(\frac{z}{\chi}\right)^{2}}, \quad (3.5.26)$$

$$\rho_{a2}^{j} = \chi \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2} + \left(\frac{z}{\chi}\right)^{2}}; (3.5.27)$$

- для второго ряда скважин

$$\rho_{aU} = \chi \sqrt{4L_{Uw}L_{Up} + 2r^2 - (L_{Uw} - L_{Up})^2} , \qquad (3.5.28)$$

$$\rho_{aU1}^{j} = \chi \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^{2} + r^{2}}, \quad (3.5.29)$$

$$\rho_{aU2}^{j} = \chi \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^{2} + r^{2}} . (3.5.30)$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.5.31) (3.5.36);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.5.37) (3.5.42);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.5.54), (3.5.55), (3.5.58) и (3.5.59).

Замечание

Решения даются в зависимости от типа граничных условий на параллельных границах. Тип граничного условия на перпендикулярной границе определяется знаком между специальными функциями: «+» для граничного условия II рода и «-» для граничного условия I рода. Расстояния до фиктивных скважин и приведенные расстояния рассчитываются в зависимости от профильного или планового расположения этих границ по формулам (3.5.1) – (3.5.30).

Решения и обработка не зависят от положения границ. Изменяется только расчет расстояний до отраженных скважин (см. рис. 3.19).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение

- 1) для изотропного пласта:
 - для параллельных границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{I-I} \left(d, \rho_i^j, t, a \right) \pm f_P^{I-I} \left(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t, a \right) \right], \tag{3.5.31}$$

- для параллельных границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{II-II} \left(d, \rho_i^j, t, a \right) \pm f_P^{II-II} \left(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t, a \right) \right], \tag{3.5.32}$$

для параллельных границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{I-II} \left(d, \rho_i^j, t, a \right) \pm f_P^{I-II} \left(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t, a \right) \right]; \tag{3.5.33}$$

- 2) для анизотропного пласта:
 - для параллельных границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_P^{I-I} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z \right) \pm f_P^{I-I} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^j, t, a_z \right) \right], \tag{3.5.34}$$

для параллельных границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left[f_{P}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t, a_{z} \right) \pm f_{P}^{II-II} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^{j}, t, a_{z} \right) \right], \tag{3.5.35}$$

для параллельных границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_P^{I-II} \left(d_a, \rho_{ai}^j, t, a_z \right) \pm f_P^{I-II} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^j, t, a_z \right) \right]. \tag{3.5.36}$$

Уравнения для периода стационара

- 1. Понижение для изотропного пласта:
 - для параллельных границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{Ui}^j} \right) \right], \tag{3.5.37}$$

для параллельных границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{Ui}^j} \right) \right], \tag{3.5.38}$$

для параллельных границ I и II рода

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{i}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}}\right) \pm \\ \pm \left(\frac{1}{\rho_{U}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{Ui}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{Ui}^{j}}\right) \end{bmatrix}.$$
(3.5.39)

- 2. Понижение для анизотропного пласта:
 - для параллельных границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{aUi}^j} \right) \right], \quad (3.5.40)$$

- для параллельных границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{aUi}^j} \right) \right], \tag{3.5.41}$$

для параллельных границ I и II рода

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left[\frac{1}{d_{a}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai}^{j}} \right] \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{aUi}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi}^{j}} \right) \right].$$
(3.5.42)

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.5.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	λ^2	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.

Для параллельных границ I рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \left[\operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j})\right] \pm \left[\frac{1}{r_{U}^{\prime}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{Ui}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{Ui}^{\prime j})\right],$$

для параллельных границ II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \left[\operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j})\right] \pm \left[\frac{1}{r_{U}^{\prime}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{Ui}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{Ui}^{\prime j})\right],$$

для параллельных границ I и II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \left\{ \begin{bmatrix} \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{i}^{\prime j}) \end{bmatrix} \pm \left\{ \frac{1}{r_{U}^{\prime}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_{Ui}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{Ui}^{\prime j}) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{Ui}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{Ui}^{\prime j}) \right\},$$

$$r_i^{\prime j} = \rho_i^{\ j} / d$$
; $r_U^{\prime} = \rho_U / d$; $r_{Ui}^{\prime j} = \rho_{Ui}^{\ j} / d$.

Таблица 3.5.2

Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (γ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.

Для параллельных границ I рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \left[\operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{ai}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{ai}^{\prime j})\right] \pm \left[\frac{1}{r_{aU}^{\prime}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{aU}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{aUi}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{aUi}^{\prime j})\right],$$

для параллельных границ II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \left[\operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{ai}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{ai}^{\prime j})\right] \pm \left[\frac{1}{r_{aU}^{\prime}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{aU}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{aUi}^{\prime j}} \operatorname{erfc}(\lambda r_{aUi}^{\prime j})\right],$$

для параллельных границ I и II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \begin{cases} \left[\operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r'_{ai}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{ai}^{j} \right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r'_{ai}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{a1}^{j} \right) \right] \pm \\ \pm \left[\frac{1}{r'_{aU}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU} \right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r'_{aUi}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) \right] \right] + \left[\frac{1}{r'_{aU}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) + \frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) \right] + \left[\frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) + \frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) + \frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) \right] + \left[\frac{1}{r'_{aU_{i}}^{j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{aU_{i}}^{j} \right) + \frac{1}{r'$$

$$r_{ai}^{j} = \rho_{ai}^{j}/d_{a}; r_{aU}^{i} = \rho_{aU}/d_{a}; r_{aUi}^{j} = \rho_{aUi}^{j}/d_{a}.$$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P(d_1, \rho_{i,1}^j, t, a) \pm f_P(\rho_{U,1}, \rho_{U,1}^j, t, a)}{f_P(d_2, \rho_{i,2}^j, t, a) \pm f_P(\rho_{U,2}, \rho_{U,2}^j, t, a)},$$
(3.5.43)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_P(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^j, t, a_z) \pm f_P(\rho_{aU,1}, \rho_{aUi,1}^j, t, a_z)}{f_P(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^j, t, a_z) \pm f_P(\rho_{aU,2}, \rho_{aUi,2}^j, t, a_z)},$$
(3.5.44)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

- 1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:
 - для плановых границ I рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{Ui}^j} \right) \right], \tag{3.5.45}$$

- для плановых границ II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{Ui}^j} \right) \right], \tag{3.5.46}$$

для плановых границ I и II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_i^j} \right] \pm \left[\pm \left(\frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{Ui}^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{Ui}^j} \right) \right].$$
(3.5.47)

- Определение горизонтального коэффициента фильтрации анизотропного пласта по понижению
 на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии:
 - для плановых границ І рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{aUi}^j} \right) \right], \quad (3.5.48)$$

для плановых границ II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{ai}^j} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_{aUi}^j} \right) \right], \tag{3.5.49}$$

для плановых границ I и II рода

$$k_{r} = \frac{Q}{4\pi S_{m}} \left[\frac{1}{d_{a}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{al}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{al}^{j}} \right] \pm \left[\pm \left(\frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{aUi}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi}^{j}} \right] \right].$$
(3.5.50)

- 3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:
 - для плановых границ І рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\left(\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}\right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi,1}^{j}}\right)}{\left(\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}\right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi,2}^{j}}\right)},$$
(3.5.51)

- для плановых границ II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\left(\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}}\right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU,1}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi,1}^{j}}\right)}{\left(\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}}\right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{aU,2}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi,2}^{j}}\right)},$$
(3.5.52)

для плановых границ I и II рода

$$\frac{S_{m,1}}{S_{m,2}} = \frac{\left[\left(\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,1}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,1}^{j}} \right) \pm \left[\frac{1}{\rho_{aU,1}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{aUi,1}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aUi,1}^{j}} \right] + \left[\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{ai,2}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{ai,2}^{j}} \right] \pm \left[\frac{1}{\rho_{aU,2}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{aUi,2}^{j}} + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{aU,2}^{j}} \right] \right]$$
(3.5.53)

Подбор параметров

Таблица 3.5.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропи	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График
3.5.31 – 3.5.33	k, a	3.5.34 – 3.5.36	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.5.43	а	3.5.44	a_z, χ	$\frac{s_1/s_2 - \lg t}{}$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

вя изотропного и анизотропного інаста:
$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \begin{bmatrix} f_P(d, \rho_i^j, t_0 + t_r, a) \pm f_P(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_0 + t_r, a) \end{bmatrix} - \\ - \left[f_P(d, \rho_i^j, t_r, a) \pm f_P(\rho_U, \rho_{Ui}^j, t_r, a) \right] \right\}, \tag{3.5.54}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \left[f_P(d_a, \rho_{ii}^j, t_r, a) \pm f_P(\rho_U, \rho_{Ui}, t_r, a) \right] \\ -\left[f_P(d_a, \rho_{ai}^j, t_0 + t_r, a_z) \pm f_P(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^j, t_0 + t_r, a_z) \right] - \left[f_P(d_a, \rho_{ai}^j, t_r, a_z) \pm f_P(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^j, t_r, a_z) \right] \end{cases}$$
(3.5.55)

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\begin{cases} \left[f_{P}(d_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \right] - \\ - \left[f_{P}(d_{1}, \rho_{i,1}^{j}, t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U,1}, \rho_{Ui,1}^{j}, t_{r}, a) \right] \end{cases}}{\begin{cases} \left[f_{P}(d_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \right] - \\ - \left[f_{P}(d_{2}, \rho_{i,2}^{j}, t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U,2}, \rho_{Ui,2}^{j}, t_{r}, a) \right] \end{cases}}$$
(3.5.56)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\begin{cases} \left[f_{P} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P} \left(\rho_{aU,1}, \rho_{aUi,1}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \right] - \left[-\left[f_{P} \left(d_{a,1}, \rho_{ai,1}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) + f_{P} \left(\rho_{aU,1}, \rho_{aUi,1}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right] \right]}{\left[\left[f_{P} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{P} \left(\rho_{aU,2}, \rho_{aUi,2}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \right] - \left[-\left[f_{P} \left(d_{a,2}, \rho_{ai,2}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) + f_{P} \left(\rho_{aU,2}, \rho_{aUi,2}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right] \right] \end{cases}} (3.5.57)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.5.4

Подби	раемые па	раметры	и рек	омендуемые	графики
		P			- P T

Изотрог	іный пласт	Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График
3.5.54	k, a	3.5.55	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.5.56	а	3.5.57	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \left[f_{P}(d, \rho_{i}^{j}, t_{0}, a) \pm f_{P}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0}, a) \right] - \left[f_{P}(d, \rho_{i}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{0} + t_{r}, a) \right] + \\ + \left[f_{P}(d, \rho_{i}^{j}, t_{r}, a) \pm f_{P}(\rho_{U}, \rho_{Ui}^{j}, t_{r}, a) \right] \end{cases}$$
(3.5.58)

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \begin{cases} \left[f_{P} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0}, a_{z} \right) \pm f_{P} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^{j}, t_{0}, a_{z} \right) \right] - \\ - \left[f_{P} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \pm f_{P} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^{j}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \right] + \\ + \left[f_{P} \left(d_{a}, \rho_{ai}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \pm f_{P} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUi}^{j}, t_{r}, a_{z} \right) \right] \end{cases}$$
(3.5.59)

Уравнения для периода стационара

Уравнения аналогичны уравнениям стационарного периода при откачке с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.5.37) - (3.5.39), а для анизотропного уравнения (3.5.40) - (3.5.42).

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

HOTO ILLIACTA
$$\frac{\left[f_{P}\left(d_{1},\rho_{i,1}^{j},t_{0},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,1},\rho_{Ui,1}^{j},t_{0},a\right)\right]-}{\left\{-\left[f_{P}\left(d_{1},\rho_{i,1}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,1},\rho_{Ui,1}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\right]+\right\}}{\left\{+\left[f_{P}\left(d_{1},\rho_{i,1}^{j},t_{r},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,1},\rho_{Ui,1}^{j},t_{r},a\right)\right]\right\}},$$

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\left\{-\left[f_{P}\left(d_{2},\rho_{i,2}^{j},t_{0},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,2},\rho_{Ui,2}^{j},t_{0},a\right)\right]-\right\}}{\left\{-\left[f_{P}\left(d_{2},\rho_{i,2}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,2},\rho_{Ui,2}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\right]+\right\}},$$

$$+\left[f_{P}\left(d_{2},\rho_{i,2}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,2},\rho_{Ui,2}^{j},t_{0}+t_{r},a\right)\right]+\right\}}$$

$$+\left[f_{P}\left(d_{2},\rho_{i,2}^{j},t_{r},a\right)\pm f_{P}\left(\rho_{U,2},\rho_{Ui,2}^{j},t_{r},a\right)\right]$$
(3.5.60)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

отропного пласта
$$\frac{\left[f_{P}(d_{a,1},\rho_{ai,1}^{j},t_{0},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,1},\rho_{aUi,1}^{j},t_{0},a_{z})\right]-}{\left\{-\left[f_{P}(d_{a,1},\rho_{ai,1}^{j},t_{0}+t_{r},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,1},\rho_{aUi,1}^{j},t_{0}+t_{r},a_{z})\right]+}\right\}+} \\
\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\left\{+\left[f_{P}(d_{a,1},\rho_{ai,1}^{j},t_{r},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,1},\rho_{aUi,1}^{j},t_{r},a_{z})\right]\right\}-}{\left[\left[f_{P}(d_{a,2},\rho_{ai,2}^{j},t_{0},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,2},\rho_{aUi,2}^{j},t_{0},a_{z})\right]-}\right\}-} \\
\left\{-\left[f_{P}(d_{a,2},\rho_{ai,2}^{j},t_{0}+t_{r},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,2},\rho_{aUi,2}^{j},t_{0}+t_{r},a_{z})\right]+}\right\}+} \\
\left\{+\left[f_{P}(d_{a,2},\rho_{ai,2}^{j},t_{r},a_{z})\pm f_{P}(\rho_{aU,2},\rho_{aUi,2}^{j},t_{r},a_{z})\right]+}\right\}$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Решения для определения коэффициента фильтрации (k) и коэффициента анизотропии (χ) по восстановлению уровня аналогичны точечным решениям при обработке откачки с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.5.45) - (3.5.47), а для анизотропного уравнения (3.5.48) - (3.5.53).

Подбор параметров

Таблица 3.5.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотроп	ный пласт	Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.5.58	k, a	3.5.59	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.5.60	а	3.5.61	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.6. Угловой пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, ограниченный в плане;
- границы: две пересекающиеся в плане полуограниченные прямолинейные; в разрезе пласт неограничен, полуограничен или ограничен;
- фиктивные скважины: количество определяется величиной угла между двумя пересекающимися границами (см. табл. 2.5.1) и наличием профильных границ, знаки расходов для фиктивных скважин, отраженных от плановых границ, см. на соответствующих граничным условиям рисунках в разделе 2.5;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

Рассматривается три варианта:

вариант 1: неограниченный в разрезе пласт;

вариант 2: полуограниченный в разрезе пласт;

вариант 3: ограниченный в разрезе пласт.

Для каждого варианта даны решения для плановых границ (рис. 3.21): границ обеспеченного питания (условия I рода), непроницаемых границ (условия II рода) и смешанных границ (условия I и II рода).

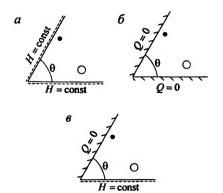


Рис. 3.21. Схематичный план углового пласта. a — две границы обеспеченного питания; b — две непроницаемые границы;

смещанные граничные условия.

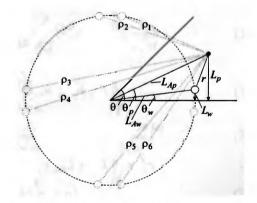


Рис. 3.22. Схематичный план углового пласта с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин, отраженных от плановых границ (на схеме показаны горизонтальные проекции расстояний до фиктивных скважин).

Определение расстояний до фиктивных скважин и количества отражений

Общее правило для определения числа отражений выражается следующим образом [Ferris at al., 1962]:

$$n = 360/\theta - 1. (3.6.1)$$

Расстояние от наблюдательной скважины до отраженных от плановых границ фиктивных скважин (рис. 3.22) в случае расположения фильтров опытной и наблюдательной скважин на одном уровне (z=0) равно:

$$\rho_{j0} = \sqrt{\left(L_w \cos \theta_j - L_p \cos \theta_p\right)^2 + \left(L_w \sin \theta_j - L_p \sin \theta_p\right)^2} , \qquad (3.6.2)$$

$$\theta_j = \theta_w + 2 \sum_{j_0=1,3,...}^{j} (\theta - \theta_w) + 2 \sum_{j_0=2,4,...}^{j} \theta_w$$
 (3.6.3)

Более подробно определение расстояний до фиктивных скважин рассмотрено в разделе 2.5.

При произвольном положении фильтра наблюдательной скважины относительно фильтра опытной скважины ($z \neq 0$) расстояния до фиктивных скважин, отраженных от плановых границ,

$$\rho_j = \sqrt{\rho_{j0}^2 + z^2} \ . \tag{3.6.4}$$

Уравнение (3.6.4) используется для определения расстояний до фиктивных скважин в неограниченном в разрезе пласте. При наличии кровли и/или подошвы водоносного пласта добавляются фиктивные скважины, отраженные от профильных границ. Расстояния до этих фиктивных скважин определяются следующим образом:

 для полуограниченного в разрезе пласта расстояния до фиктивных скважин, отраженных от профильной границы,

$$\rho_U = \sqrt{(B_w + B_p)^2 + r^2} \,, \tag{3.6.5}$$

$$\rho_{Ui} = \sqrt{(B_w + B_p)^2 + \rho_{i0}^2} \; ; \tag{3.6.6}$$

 для ограниченного в разрезе пласта расстояния для скважин, отраженных от кровли водоносного пласта

$$\rho_{1}^{j'} = \sqrt{\left(L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j'} 2L_{Bw} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j'} 2L_{Tw}\right)^{2} + r^{2}},$$
 (3.6.7)

$$\rho_{j,1}^{j'} = \sqrt{\left(L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j'} 2L_{B_w} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j'} 2L_{T_w}\right)^2 + \rho_{j0}^2}$$
(3.6.8)

и от подошвы водоносного пласта,

$$\rho_2^{j'} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j'} 2L_{Tw} + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j'} 2L_{Bw}\right)^2 + r^2},$$
(3.6.9)

$$\rho_{j,2}^{j'} = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j'} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j'} 2L_{Bw}\right)^2 + \rho_{j0}^2} . \tag{3.6.10}$$

3.6.1. Угловой пласт неограничен в разрезе

Схема проведения опыта:

- общие условия для углового водоносного пласта (см. начало раздела 3.6);
- пласт неограничен в разрезе;
- фиктивные скважины: расположены по кругу на уровне фильтра опытной скважины;
- типовая схема: рис. 3.23.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.6.11), (3.6.13), (3.6.15), (3.6.17), (3.6.19) и (3.6.21);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.6.23) – (3.6.28);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.6.40) – (3.6.43).

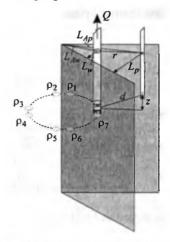


Рис. 3.23. Типовая схема (трехмерное представление) точечного источника в угловом пласте, неограниченном в разрезе. Рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения.

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение

- 1) для изотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PA}^{I-I} (d, \rho_j, t, a) , \qquad (3.6.11)$$

$$f_{PA}^{I-I}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^{n} (-1)^i \frac{1}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.6.12)

для границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PA}^{II-II}(d, \rho_j, t, a), \qquad (3.6.13)$$

$$f_{PA}^{II-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$
 (3.6.14)

для границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k} f_{PA}^{I-II} (d, \rho_j, t, a) , \qquad (3.6.15)$$

$$f_{PA}^{I-II}(d,\rho_j,t,a) = \sum_{j=0,2,4}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_j}{2\sqrt{at}} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{j+1}}{2\sqrt{at}} \right); \tag{3.6.16}$$

2) для анизотропного пласта:

для границ І рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{-}} f_{PA}^{I-I} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z} \right), \qquad (3.6.17)$$

$$f_{PA}^{I-I}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}};$$
 (3.6.18)

для границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{x}} f_{PA}^{II-II} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z} \right), \qquad (3.6.19)$$

$$f_{PA}^{II-II}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \frac{1}{d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}};$$
 (3.6.20)

для границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{\perp}} f_{PA}^{I-II} \left(d_a, \rho_{aj}, t, a_z \right), \tag{3.6.21}$$

$$f_{PA}^{I-II}(d_a, \rho_{aj}, t, a_z) = \sum_{j=0, 2, 4, \dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj}}{2\sqrt{a_z t}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{aj+1}}{2\sqrt{a_z t}} \right). \quad (3.6.22)$$

Уравнения для периода стационара

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение

- для изотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} \right), \tag{3.6.23}$$

для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} \right), \tag{3.6.24}$$

для границ I и II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \right); \tag{3.6.25}$$

- 2) для анизотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} \right), \tag{3.6.26}$$

для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_{ai}} \right), \tag{3.6.27}$$

для границ I и II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} \right). \tag{3.6.28}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.6.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{2^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\frac{\operatorname{igenc}(\lambda) - \operatorname{ig} \frac{1}{\lambda^2}}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Для границ І рода $\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{j}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j});$

для границ II рода erfc'(
$$\lambda$$
) = erfc $\lambda + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{r'_{i}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{i});$

для границ I и II рода
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{r'_{j}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j}) + \frac{1}{r'_{j+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j+1}) \right).$$

Таблица 3.6.2 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

 Π р и м е ч а н и е . Для границ I рода $\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj});$

для границ II рода
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj});$$

для границ I и II рода
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}) + \frac{1}{r'_{aj+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj+1}) \right);$$
 $r'_{i}^{j} = \rho_{i}^{j} / d$; $r'_{ai} = \rho_{ai} / d_{a}$.

Способ отношения понижений

- для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t, a)}{f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t, a)},$$
(3.6.29)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t, a_z)}{f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t, a_z)},$$
(3.6.30)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

- 1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:
 - для плановых границ I рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} \right), \tag{3.6.31}$$

для плановых границ II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} \right), \tag{3.6.32}$$

для плановых границ I и II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \right).$$
 (3.6.33)

- 2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):
 - для плановых границ I рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} \right), \tag{3.6.34}$$

для плановых границ II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} \right), \tag{3.6.35}$$

для плановых границ I и II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} \right). \tag{3.6.36}$$

- 3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:
 - для плановых границ І рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,2}}},$$
(3.6.37)

для плановых границ II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,2}}},$$
(3.6.38)

для плановых границ I и II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,1}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,1}}\right)}{\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,2}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,2}}\right)}.$$
(3.6.39)

Подбор параметров

Таблица 3.6.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропный	і пласт	Анизотропны	й пласт	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.6.11, 3.6.13, 3.6.15	k, a	3.6.17, 3.6.19, 3.6.21	k_r, k_z, a_z	s – lg t
3.6.29	а	3.6.30	a_z , χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PA}(d, \rho_j, t_0 + t_r, a) - f_{PA}(d, \rho_j, t_r, a) \right], \tag{3.6.40}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{-}} \left[f_{PA} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) - f_{PA} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t_{r}, a_{z} \right) \right]. \tag{3.6.41}$$

Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) - f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) - f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.6.42)

подбор пьезопроводности (a) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) - f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)},$$
(3.6.43)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.6.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотрог	ный пласт	Анизотропный пласт			
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График	
3.6.40	k, a	3.6.41	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$	
3.6.42	а	3.6.43	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$	

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{0}, a) - f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{r}, a) \right], \tag{3.6.44}$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k_x} \left[f_{PA} \left(d_a, \rho_{aj}, t_0, a_z \right) - f_{PA} \left(d_a, \rho_{aj}, t_0 + t_r, a_z \right) + f_{PA} \left(d_a, \rho_j, t_r, a_z \right) \right]. \quad (3.6.45)$$

Уравнения для периода стационара

Уравнения аналогичны уравнениям стационарного периода при откачке с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.6.23) - (3.6.25), а для анизотропного -(3.6.26) - (3.6.28).

***** Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_0, a) - f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) + f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a)}{f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_0, a) - f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) + f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a)},$$
(3.6.46)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0, a_z) - f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z)}{f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0, a_z) - f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z)}, (3.6.47)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Решения для определения коэффициента фильтрации (k) и коэффициента анизотропии (χ) по восстановлению уровня аналогичны точечным решениям при обработке откачки с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.6.31) - (3.6.33), а для анизотропного - (3.6.34) - (3.6.39).

Подбор параметров

Таблица 3.6.5 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения 3.6.44	параметры <i>k</i> , <i>a</i>	уравнения 3.6.45	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.6.46	а	3.6.47	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.6.2. Угловой пласт полуограничен в разрезе

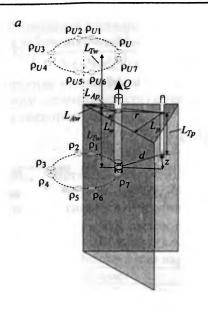
Схема проведения опыта:

- общие условия для углового водоносного пласта (см. начало раздела 3.6);
- пласт полуограничен в разрезе, на понижение оказывает влияние непроницаемая кровля или непроницаемая подошва водоносного пласта;
- фиктивные скважины: расположены по кругу на уровне фильтра опытной скважины и по второму кругу на уровне отражения опытной скважины относительно границы; знаки расходов фиктивных скважин второго круга соответствуют знакам расхода основного круга;
- типовая схема: рис.3.24.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.6.48) и (3.6.49);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.6.50) (3.6.55);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (3.6.67), (3.6.68), (3.6.71) и (3.6.72);
- восстановление для стационарного периода: уравнения аналогичны уравнениям (3.6.50).
 (3.6.55).

Раздел 3.



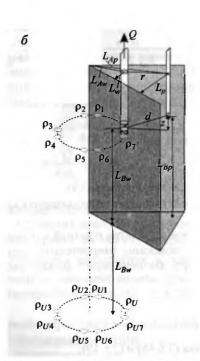


Рис. 3.24. Типовая схема (трехмерное представление) точечного источника в угловом пласте, полуограниченном в разрезе.
а – профильная граница – кровля; б – профильная граница – подошва. Рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения.

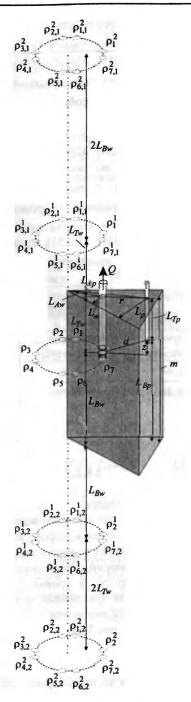


Рис. 3.25. Типовая схема (трехмерное представление) точечного источника в угловом пласте, ограниченном в разрезе.

Рядом с фиктивными скважинами показаны расстояния от них до точки наблюдения.

Откачка с постоянным расходом

& Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение для изотропного и анизотропного пласта:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \Big[f_{PA} \Big(d, \rho_j, t, a \Big) + f_{PA} \Big(\rho_U, \rho_{Uj}, t, a \Big) \Big], \tag{3.6.48}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{z}} \left[f_{PA} \left(d_{a}, \rho_{aj}, t, a_{z} \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t, a_{z} \right) \right]. \tag{3.6.49}$$

Уравнения для периода стационара

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение

- 1) для изотропного пласта:
 - для границ І рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{Uj}} \right), \tag{3.6.50}$$

для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{Uj}} \right), \tag{3.6.51}$$

для границ I и II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_{j+1}} + \frac{1}{\rho_{Uj}} + \frac{1}{\rho_{Uj+1}} \right); \tag{3.6.52}$$

- 2) для анизотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aUj}} \right), \tag{3.6.53}$$

- для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aUj}} \right), \tag{3.6.54}$$

для границ I и II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} + \frac{1}{\rho_{aUj}} + \frac{1}{\rho_{aUj+1}} \right). \tag{3.6.55}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 3.6.6 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg(ds) - \lg\frac{t}{d^2}$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$		$k = \frac{Q}{4\pi d \cdot 10^D}$	$a = \frac{d^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Для границ І рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{j}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j}) + \frac{1}{r'_{U}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{U}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{Uj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{Uj});$$

для границ II рода
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^n \frac{1}{r'_j} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_j\right) + \frac{1}{r'_U} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_U\right) + \sum_{j=1}^n \frac{1}{r'_{U_j}} \operatorname{erfc} \left(\lambda r'_{U_j}\right);$$

для границ I и II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{r'_{j}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j}) + \frac{1}{r'_{j+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{j+1}) + \frac{1}{r'_{U}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{U}) + \frac{1}{r'_{Uj+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{Uj+1}) \right);$$

$$r'_{i} = \rho_{i}^{j} / d; \ r'_{Uj} = \rho_{Uj} / d.$$

Таблица 3.6.7 Расчетные формулы для определения параметров анизотропного пласта при известном параметре анизотропии (χ)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/сут	Вертикальная пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg \operatorname{erfc}'(\lambda) - \lg \frac{1}{\lambda^2}$	$k_r = \frac{Q}{4\pi d_a \cdot 10^D}$	$a_z = \frac{d_a^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Для границ І рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}) + \frac{1}{r'_{aU}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aU}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{r'_{aUj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aUj});$$

для границ II рода
$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \operatorname{erfc} \lambda + \sum_{i=1}^n \frac{1}{r'_{ai}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}) + \frac{1}{r'_{aU}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aU}) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{r'_{aUj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aUj});$$

для границ I и II рода

$$\operatorname{erfc}'(\lambda) = \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{r'_{aj}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj}) + \frac{1}{r'_{aj+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aj+1}) + \frac{1}{r'_{aU}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aU}) + \frac{1}{r'_{aUj+1}} \operatorname{erfc}(\lambda r'_{aUj+1}) \right);$$

$$r'_{ai} = \rho_{ai}/d_a; \ r'_{aU} = \rho_{aU}/d_a; \ r'_{aU} = \rho_{aU}/d_a; \ r'_{aU} = \rho_{aU}/d_a.$$

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t, a)}{f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t, a)},$$
(3.6.56)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

- для анизотропного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t, a_z)}{f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t, a_z)},$$
(3.6.57)

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

- 1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:
 - для плановых границ I рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{Uj}} \right), \tag{3.6.58}$$

для плановых границ II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_U} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{Uj}} \right), \tag{3.6.59}$$

для плановых границ I и II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_{j+1}} + \frac{1}{\rho_{Uj}} + \frac{1}{\rho_{Uj+1}} \right). \tag{3.6.60}$$

- 2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):
 - для плановых границ I рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aUj}} \right), \tag{3.6.61}$$

для плановых границ II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left(\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aU}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aUj}} \right), \tag{3.6.62}$$

для плановых границ I и II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} + \frac{1}{\rho_{aUj}} + \frac{1}{\rho_{aUj+1}} \right). \tag{3.6.63}$$

- Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:
 - для плановых границ I рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,1}} + \frac{1}{\rho_{aU,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aUj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,2}} + \frac{1}{\rho_{aU,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aUj,2}}},$$
(3.6.64)

для плановых границ II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,1}} + \frac{1}{\rho_{aU,1}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aUj,1}}}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,2}} + \frac{1}{\rho_{aU,2}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aUj,2}}},$$
(3.6.65)

для плановых границ I и II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,1}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,1}} + \frac{1}{\rho_{aUj,1}} + \frac{1}{\rho_{aUj+1,1}} \right)}{\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,2}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,2}} + \frac{1}{\rho_{aUj,2}} + \frac{1}{\rho_{aUj+1,2}} \right)}$$
(3.6.66)

Подбор параметров

Таблица 3.6.8

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3.6.48	k, a	3.6.49	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t$
3.6.56	а	3.6.57	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:
$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \begin{bmatrix} f_{PA}(d, \rho_j, t_0 + t_r, a) + f_{PA}(\rho_U, \rho_{Uj}, t_0 + t_r, a) \end{bmatrix} - \\ - \left[f_{PA}(d, \rho_j, t_r, a) + f_{PA}(\rho_U, \rho_{Uj}, t_r, a) \right] \right\}, \quad (3.6.67)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \left[f_{PA} \left(d_a, \rho_{aj}, t_0 + t_r, a_z \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t_0 + t_r, a_z \right) \right] - \\ - \left[f_{PA} \left(d_a, \rho_{aj}, t_r, a_z \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t_r, a_z \right) \right] \end{cases}$$
(3.6.68)

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\begin{cases} \left[f_{PA}(d_{1}, \rho_{j,1}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t_{0} + t_{r}, a) \right] - \\ - \left[f_{PA}(d_{1}, \rho_{j,1}, t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t_{r}, a) \right] \\ \left[\left[f_{PA}(d_{2}, \rho_{j,2}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t_{0} + t_{r}, a) \right] - \\ - \left[f_{PA}(d_{2}, \rho_{j,2}, t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t_{r}, a) \right] \end{cases}$$
(3.6.69)

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{\left\{ \left[f_{PA} \left(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \right] - \left\{ - \left[f_{PA} \left(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_{r}, a_{z} \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t_{r}, a_{z} \right) \right] \right\}}{\left\{ \left[f_{PA} \left(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t_{0} + t_{r}, a_{z} \right) \right] - \left\{ - \left[f_{PA} \left(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_{r}, a_{z} \right) + f_{PA} \left(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t_{r}, a_{z} \right) \right] \right\}} \right\} (3.6.70)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 3.6.9 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер уравнения	Подбираемые параметры	Номер Подбираемые уравнения параметры		График
3.6.67	k, a	3.6.68	k_r, k_z, a_z	$s - \lg t_r$
3.6.69	а	3.6.70	a_z, χ	$s_1/s_2 - \lg t_r$

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление для изотропного и анизотропного пласта:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \left[f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{0}, a) + f_{PA}(\rho_{U}, \rho_{Uj}, t_{0}, a) \right] - \\ - \left[f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{0} + t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U}, \rho_{Uj}, t_{0} + t_{r}, a) \right] + \\ + \left[f_{PA}(d, \rho_{j}, t_{r}, a) + f_{PA}(\rho_{U}, \rho_{Uj}, t_{r}, a) \right] \end{cases}$$
(3.6.71)

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \left[f_{PA}(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0}, a_{z}) + f_{PA}(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t_{0}, a_{z}) \right] - \\ - \left[f_{PA}(d_{a}, \rho_{aj}, t_{0} + t_{r}, a_{z}) + f_{PA}(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t_{0} + t_{r}, a_{z}) \right] + \\ + \left[f_{PA}(d_{a}, \rho_{aj}, t_{r}, a_{z}) + f_{PA}(\rho_{aU}, \rho_{aUj}, t_{r}, a_{z}) \right] \end{cases}$$
(3.6.72)

Уравнения для периода стационара

Уравнения аналогичны уравнениям стационарного периода при откачке с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.6.50) - (3.6.52), а для анизотропного -(3.6.53) - (3.6.55).

Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

для изотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_0, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t_0, a)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_0 + t_r, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t_0 + t_r, a)\right] + \\
+\left[f_{PA}(d_1, \rho_{j,1}, t_r, a) + f_{PA}(\rho_{U,1}, \rho_{Uj,1}, t_r, a)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_0, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t_0, a)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_0 + t_r, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t_0 + t_r, a)\right] + \\
+\left[f_{PA}(d_2, \rho_{j,2}, t_r, a) + f_{PA}(\rho_{U,2}, \rho_{Uj,2}, t_r, a)\right]
\end{cases} (3.6.73)$$

подбор пьезопроводности (а) осуществляется способом биссектрисы;

для анизотропного пласта

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\begin{cases}
\left[f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t_0, a_z)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t_0 + t_r, a_z)\right] + \\
+\left[f_{PA}(d_{a,1}, \rho_{aj,1}, t_r, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,1}, \rho_{aUj,1}, t_r, a_z)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t_0, a_z)\right] - \\
-\left[f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_0 + t_r, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t_0 + t_r, a_z)\right] + \\
+\left[f_{PA}(d_{a,2}, \rho_{aj,2}, t_r, a_z) + f_{PA}(\rho_{aU,2}, \rho_{aUj,2}, t_r, a_z)\right]
\end{cases} (3.6.74)$$

подбор вертикальной пьезопроводности (a_z) при известном коэффициенте анизотропии (χ) осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Решения для определения коэффициента фильтрации (k) и коэффициента анизотропии (χ) по восстановлению уровня аналогичны точечным решениям при обработке откачки с заменой понижения уровня на период стационара (s_m) на максимальное восстановление уровня (s_{mr}) . Уравнения выбираются в зависимости от типа граничных условий и наличия анизотропии водоносного пласта. Для изотропного пласта это уравнения (3.6.58) - (3.6.60), а для анизотропного - (3.6.61) - (3.6.66).

Подбор параметров

Таблица 3.6.10

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Изотропный пласт		Анизотропный пласт		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.6.71	k, a	3.6.72	k_r, k_z, a_z	$s_r - \lg t_r$
3.6.73	а	3.6.74	a_z, χ	$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

3.6.3. Угловой пласт ограничен в разрезе

Схема проведения опыта:

- общие условия для углового водоносного пласта (см. начало раздела 3.6);
- пласт ограничен в разрезе, на понижение оказывают влияние непроницаемые кровля и подошва водоносного пласта;
- фиктивные скважины: расположены по кругу на уровне фильтра опытной скважины и по кругам, бесконечно отраженным от кровли и подошвы пласта; знаки расходов фиктивных скважин отраженных кругов соответствуют знакам расхода основного круга;
- типовая схема: рис. 3.25.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (3.6.75) и (3.6.76);
- понижение для стационарного периода: уравнения (3.6.77) (3.6.82).

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{PA}(d, \rho_j, t, a) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{n} f_{PA}(\rho_i^{j'}, \rho_{j,i}^{j'}, t, a) \right], \tag{3.6.75}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[f_{PA} \left(d_a, \rho_{aj}, t, a_z \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{n} f_{PA} \left(\rho_{ai}^{j'}, \rho_{aj,i}^{j'}, t, a_z \right) \right]. \tag{3.6.76}$$

Уравнения для периода стационара

В зависимости от наличия профильной анизотропии понижение

- 1) для изотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_i^{j'}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.77}$$

для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_i^{j'}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.78}$$

- для границ I и II рода

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{j}} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{j+1,i}^{j'}} \right) \right] \right\}; (3.6.79)$$

- 2) для анизотропного пласта:
 - для границ I рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_{ai}^{j'}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.80}$$

для границ II рода

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_{ai}^{j'}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.81}$$

для границ I и II рода

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r}} \left\{ \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,i}^{j'}} \right) \right] \right\} . (3.6.82)$$

Способы обработки откачки

Точечные способы

- 1. Определение коэффициента фильтрации (k) изотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:
 - для границ I рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_j} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_i^{j'}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.83}$$

для границ II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_j} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_i^{j'}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.84}$$

для границ I и II рода

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m} \left\{ \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{j,i}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{j+1,i}^{j'}} \right) \right] \right\} . (3.6.85)$$

2. Определение горизонтального коэффициента фильтрации (k_r) анизотропного пласта по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном коэффициенте анизотропии (χ):

для границ I рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_{ai}^{j'}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} \right) \right], \quad (3.6.86)$$

- для границ II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[\frac{1}{d_a} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\rho_{ai}^{j'}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} \right) \right], \tag{3.6.87}$$

- для плановых границ I и II рода

$$k_r = \frac{Q}{4\pi s_m} \left\{ \sum_{j=0,2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj}} + \frac{1}{\rho_{aj+1}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,i}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,i}^{j'}} \right) \right] \right\} . (3.6.88)$$

- 3. Определение подбором коэффициента анизотропии (χ) по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах:
 - для границ I рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,1}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left(\frac{1}{\rho_{ai,1}^{j'}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,i,1}^{j'}} \right)}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,2}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left(\frac{1}{\rho_{ai,2}^{j'}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \frac{1}{\rho_{aj,i,2}^{j'}} \right)},$$
(3.6.89)

для границ II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\frac{1}{d_{a,1}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,1}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left(\frac{1}{\rho_{ai,1}^{j'}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,i,1}^{j'}} \right)}{\frac{1}{d_{a,2}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,2}} + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left(\frac{1}{\rho_{ai,2}^{j'}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\rho_{aj,i,2}^{j'}} \right)},$$
(3.6.90)

– для границ I и II рода

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\sum_{j=0,2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,1}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,1}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,i,1}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,i,1}^{j'}} \right) \right]}{\sum_{j=0,2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,2}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,2}} \right) + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[\sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_{aj,i,2}^{j'}} + \frac{1}{\rho_{aj+1,i,2}^{j'}} \right) \right]} . (3.6.91)$$

Подбор параметров

Таблица 3.6.11

Подбираемые	параметры	и ре	екомендуемый	график
-------------	-----------	------	--------------	--------

Изотропный пласт		Анизотрог		
Номер	Подбираемые	Номер	Подбираемые	График
уравнения	параметры	уравнения	параметры	
3.6.75	k, a	3.6.76	k_r, k_z, a_z	$s-\lg t$

РАЗДЕЛ 4. НЕСОВЕРШЕННАЯ СКВАЖИНА: ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК В НАПОРНОМ ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ

Опытная скважина и наблюдательная скважина несовершенны по степени вскрытия. Длина фильтра опытной скважины меньше мощности водоносного пласта. Рассматриваются понижения в наблюдательной скважине и в пьезометре (трубка малого диаметра, вода в которую поступает через дно).

Все решения для нестационарной фильтрации, данные в этом разделе, записаны для изотропного водоносного пласта. Для учета профильной анизотропии водоносного пласта необходимо сделать следующее:

- коэффициент фильтрации k заменить на коэффициент фильтрации по горизонтали k, ;
- пьезопроводность a заменить на вертикальную пьезопроводность a_{r} ;
- расстояние до опытной скважины r на приведенное расстояние $r\chi$; такую же замену необходимо сделать для всех горизонтальных расстояний, характеризующих положение скважин относительно плановых границ в полуограниченных и ограниченных водоносных пластах.

Не учет этого может привести к значительным искажениям определяемых параметров при удовлетворительном совпадении расчетных индикаторных кривых с фактическими данными.

При обработке профильно-анизотропного водоносного пласта как изотропного будет определяться обобщенный параметр $\sqrt{k_r k_z}$ вместо коэффициента фильтрации по горизонтали k_r .

В разделе рассматривается влияние плановых и профильных границ на понижение уровня. Даны решения для следующих условий:

- 1) неограниченный в плане и в разрезе пласт;
- 2) полуограниченный пласт;
- 3) ограниченный пласт;
- 4) пласт-квадрант;
- 5) U-образный пласт;
- 6) угловой пласт.

Отдельно рассмотрен наклонный линейный источник.

<u>Литература:</u> Гиринский, 1950; Бабушкин, 1954a; Hantush, 1961a, b; Don Kirkham, 1964; Weeks, 1969; Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород, 1977; Мироненко, Шестаков, 1978; Шестаков, Невечеря, 1998.

Условные обозначения:

- $a = k/S_s$ пьезопроводность изотропного пласта, м²/сут;
- $a_z = k_z / S_s$ пьезопроводность анизотропного пласта по вертикали, м²/сут;
- B_p вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной скважины или от открытой части пьезометра до кровли или подошвы пласта, м;
- $B_{p,1}, B_{p,2}$ вертикальные расстояния от середины фильтра первой и второй наблюдательных скважин или от открытой части первого и второго пьезометров до кровли или подошвы пласта, м;
- B_{w} вертикальное расстояние от центра фильтра опытной скважины до кровли или подошвы пласта, м;
- $B_{w,1}$, $B_{w,2}$ вертикальные расстояния от центра фильтра первой и второй опытных скважин до кровли или подошвы пласта, м;
- С угол наклона прямой (для способа прямой линии);
- D расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;
- Е расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;
- $erfc \beta$ дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);
- $F(u, \beta_1, \beta_2)$ вспомогательная функция: определяется уравнением (4.1.3);
- f вспомогательная функция для способа отношения понижений;
- f(r), f(r,z) вспомогательные функции для обработки данных способом прямой линии;
- $f'(\beta)$ вспомогательная функция: определяется уравнением (4.3.6);
- $f_{line}(u, \beta_1, \beta_2) = M(u, \beta_1) + M(u, \beta_2)$ вспомогательная функция для понижения в пьезометре: определяется уравнением (4.1.7); аналогом функции $f_{line}(u, \beta_1, \beta_2)$ является функция, данная в уравнении (4.1.5);
- f'_{line} вспомогательная функция для среднего понижения в наблюдательной скважине, зависит от 9 аргументов: определяется уравнением (4.1.2);
- i=1,2 индекс фиктивной скважины: i=1 фиктивная скважина отражена от кровли или от левой границы; i=2 фиктивная скважина отражена от подошвы или от правой границы;
- j номер фиктивной скважины; для пласта квадранта j=1,2,3 номер фиктивной скважины; для углового пласта j=1,2,...,n номер фиктивной скважины, отраженной от плановых границ (нумерация идет от опытной скважины против часовой стрелки);
- j'=1,2,...,n' номер фиктивной скважины, отраженной от профильных границ углового пласта;
- j_0 номер суммы при определении расстояния до j-й фиктивной скважины;
- $K_0(\beta)$ функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка;
- k коэффициент фильтрации изотропного пласта, м/сут;
- k_r горизонтальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;
- k_z вертикальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;
- L ширина полосы ограниченного в плане пласта или расстояние между плановыми параллельными границами U-образного пласта, м;
- L_{Ap} горизонтальное расстояние от пьезометра до вершины угла углового пласта, м;

 L_{Aw} — горизонтальное расстояние от опытной скважины до вершины угла углового пласта, м;

 L_{Bp} — вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной скважины или от открытой части пьезометра до подошвы пласта, м;

 L_{Bw} — вертикальное расстояние от центра фильтра опытной скважины до подошвы пласта, м:

 L_p — горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины или пьезометра до плановой границы, м;

 L_p' – горизонтальное расстояние от пьезометра до второй границы в пласте-квадранте, м;

 L_{Tp} — расстояние от кровли водоносного пласта до середины фильтра наблюдательной скважины или до открытой части пьезометра, м;

 $L_{Tp,1}, L_{Tp,2}$ — расстояния от кровли водоносного пласта до середины фильтра первой и второй наблюдательных скважин, м;

 L_{Tw} — расстояние от кровли водоносного пласта до середины фильтра опытной скважины, м:

 L_{Up} — расстояние от пьезометра до перпендикулярной границы в U-образном пласте, неограниченном в разрезе, м;

 L_{Uw} — расстояние от опытной скважины до перпендикулярной границы в U-образном пласте, неограниченном в разрезе, м;

 $L_{\rm w}\,$ – горизонтальное расстояние от опытной скважины до плановой границы, м;

 L_{w}' — горизонтальное расстояние от опытной скважины до второй границы в пластеквадранте, м;

 $l_1, l_2\,$ – длина нижней и верхней части фильтра наклонной скважины, м;

 l_1', l_2' – длина нижней и верхней части фильтра фиктивной наклонной скважины, м;

 l_d — вертикальное расстояние между центрами двух интервалов при дуплетном опробовании, м;

 $l_{p}\,$ – длина фильтра наблюдательной скважины, м;

 l_w – длина фильтра опытной скважины, м;

 $M(u, \beta)$ – специальная функция (Приложение 24);

 $M'(u, \beta)$ – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $M_1(u,\beta)$ — вспомогательная функция для дуплетного опробования: определяется уравнением (4.1.31);

т - мощность водоносного пласта, м;

n — номер суммы или количество отражений от одной границы; для углового пласта n — число фиктивных скважин, отраженных от плановых границ;

n' – количество отраженных скважин от кровли или подошвы в ограниченном в разрезе угловом пласте;

 n_j — знак перед функцией в плановом пласте-квадранте: $n_1 = n_2 = n_3 = 1$ — для границ II рода; $n_1 = -1$, $n_2 = -1$, $n_3 = 1$ — для границ I и II рода; $n_1 = -1$, $n_2 = 1$, $n_3 = -1$ — для границ I и II рода;

Q – расход опытной скважины, м 3 /сут;

r — горизонтальное расстояние между опытной скважиной и наблюдательной скважиной или пьезометром, м;

 r_1 , r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первого и второго пьезометров или до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_{w} — радиус опытной скважины, м;

$$r' = (\rho/r)^2$$
; $r_i'^j = \rho_i^j/r$; $r_U' = \rho_U/r$, $r_{Ui}'^j = \rho_{Ui}^j/r$; $r_I' = \rho_i/r$; $r_0' = \rho_0/r = r/r = 1$;

 S_s — удельная водоотдача, 1/м;

s – понижение в наблюдательной скважине или пьезометре, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в первом и втором пьезометрах, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине или пьезометре на период стационара, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах на период стационара, м;

 $s_{\it mw}$ — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

t — время от начала откачки, сут;

$$u = \frac{r^2 S_s}{4kt} = \frac{r^2}{4at} - \text{аргумент функций;}$$

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

z — вертикальное расстояние между центром фильтра опытной скважины и центром фильтра наблюдательной скважины или открытой частью пьезометра, м;

z' — вертикальное расстояние от пьезометра до фиктивной скважины, отраженной от профильной границы, в полуограниченном пласте, м;

 z_1, z_2 — вертикальные расстояния между центром фильтра опытной скважины и первым и вторым пьезометром или центрами фильтров первой и второй наблюдательных скважин; при дуплетном опробовании — вертикальные расстояния между точкой наблюдения и центрами первого и второго интервалов фильтра опытной скважины м;

центрами первого и второго интервалов фильтра опытной скважины м; $z_{p1} = \left(L_{Tp} + l_p / 2\right) - \text{глубина вскрытия наблюдательной скважины (расстояние от кровли водоносного пласта до низа фильтра наблюдательной скважины или до открытой части пьезометра), м;$

 $z_{p1,1}, z_{p1,2}$ — вертикальные расстояния от кровли до открытой части первого и второго пьезометров или до низа фильтра первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $z_{p2} = (L_{Tp} - l_p / 2)$ — вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта до верха фильтра наблюдательной скважины или до открытой части пьезометра, м;

 $z_{p2,1}, z_{p2,2}$ — вертикальные расстояния от кровли пласта до открытой части первого и второго пьезометров или до верха фильтра первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $z_{wl} = (L_{Tw} + l_w / 2)$ — глубина вскрытия опытной скважины (расстояние от кровли водоносного пласта до низа фильтра опытной скважины или до открытой части пьезометра), м;

 $z_{w2} = (L_{Tw} - l_w / 2)$ — вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта до верха фильтра опытной скважины или до открытой части пьезометра, м;

- z_i^j вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной скважины или открытой части пьезометра до j-й фиктивной скважины, отраженной от верхней (i=1) или от нижней (i=2) границы, в ограниченном в разрезе пласте, м;
- $z_{i,1}^{j}, z_{i,2}^{j}$ вертикальные расстояния для первого и второго пьезометра, см. определение для z_{i}^{j} , м;
- z_{Ui}^{j} вертикальное расстояние между пьезометром и j-й фиктивной скважиной второго ряда, отраженной от кровли (i=1) или подошвы (i=2), м;
- $z_i^{f'}$ вертикальное расстояние от открытой части пьезометра до j-й фиктивной скважины, отраженной от верхней (i=1) или нижней (i=2) границы, в ограниченном в разрезе угловом пласте: определяется уравнениями (4.6.3) и (4.6.4), м;
- β , β_1 , β_2 аргументы функций;
- θ угол между двумя пересекающимися границами углового пласта, градус;
- θ_{j} угол, характеризующий положение j-ой фиктивной скважины, отраженной от плановой границы, в угловом пласте, градус;
- $\theta_{p}\,$ угол, характеризующий положение пьезометра в угловом пласте, градус;
- θ_{w} угол, характеризующий положение опытной скважины в угловом пласте, градус;
- ρ горизонтальное расстояние от пьезометра до фиктивной скважины в полуограниченном в плане пласте: определяется уравнением (4.2.2); также перпендикулярное расстояние от точки наблюдения до наклонной скважины; м;
- $ho_0 = r$ введено для упрощения решений при смещанных граничных условиях;
- ρ_1 , ρ_2 горизонтальные расстояния от первого и второго пьезометра в полуограниченном в плане пласте до фиктивной скважины; также расстояния от точки наблюдения до нижней и верхней части фильтра наклонной скважины, м;
- ρ_1', ρ_2' расстояния от точки наблюдения до фиктивной наклонной скважины, м;
- ρ_i^j горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины или пьезометра до j-й фиктивной скважины, отраженной от левой (i=1) или от правой (i=2) границы, в ограниченном в плане пласте или в U-образном пласте, м;
- ρ_j горизонтальное расстояние от пьезометра до фиктивной скважины в пласте-квадранте (уравнения (4.4.1) (4.4.8)) или в угловом пласте (уравнение (4.6.1)), м:
- ho_U горизонтальное расстояние между пьезометром и фиктивной скважиной, отраженной от плановой перпендикулярной границы, в ограниченном или неограниченном в плане U-образном пласте, м;
- ho_{Ui}^{J} горизонтальное расстояние между пьезометром и фиктивной скважиной второго ряда, отраженной от левой (i=1) или правой (i=2) границы, м;
- $\chi = \sqrt{k_z/k_r}$ коэффициент профильной анизотропии;
- ± знак в зависимости от условия на границе в полуограниченном в плане пласте или в пласте-квадранте: знак «+» для границы II рода, знак «—» для границы I рода; в U-образном пласте это относится к условию на перпендикулярной границе.

4.1. Неограниченный в плане и в разрезе пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане и в разрезе;
- понижение: определяется в наблюдательной скважине или в пьезометре в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 4.1.

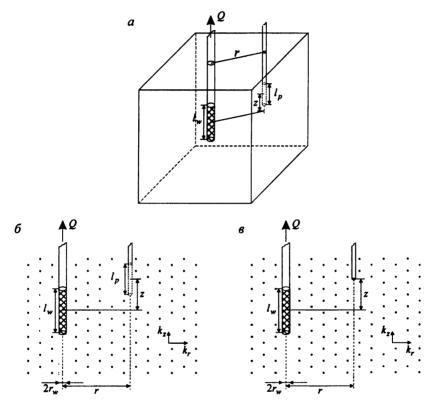


Рис. 4.1. Типовая схема линейного источника в неограниченном в плане и в разрезе напорном пласте. a – трехмерное представление; b – разрез с наблюдательной скважиной; b – разрез с пьезометром.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода (среднее понижение) в наблюдательной скважине: уравнение (4.1.1);
- понижение для нестационарного периода, решение для пьезометра: уравнения (4.1.4) и (4.1.6);
- понижение для стационарного периода: уравнения (4.1.8) (4.1.11);
- понижение для стационарного периода, упрощенное решение: уравнения (4.1.12) и (4.1.13);
- понижение для стационарного периода, частные случаи расположения скважин: уравнения (4.1.14) (4.1.17);
- понижение для стационарного периода в опытной скважине: уравнение (4.1.18);
- нестационарное понижение при дуплетном опробовании: уравнения (4.1.29) и (4.1.30);
- стационарное понижение при дуплетном опробовании: уравнения (4.1.32) (4.1.36).

Откачка с постоянным расходом

& Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение для среднего понижения в наблюдательной скважине (рис. 4.1, 6):

$$s = \frac{Qr}{8\pi k l_w l_p} f'_{line} \left(\frac{r^2}{4at}, z_{w1}, z_{w2}, z_{p1}, z_{p2} \right), \tag{4.1.1}$$

$$f'_{line}\left(\frac{r^{2}}{4at}, z_{w1}, z_{w2}, z_{p1}, z_{p2}\right) = \begin{bmatrix} F\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p1}}{r}\right) - \\ -F\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p1}}{r}\right) + \\ +F\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p2}}{r}\right) - \\ -F\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p2}}{r}\right) \end{bmatrix}, \tag{4.1.2}$$

$$F(u, \beta_{1}, \beta_{2}) = \begin{cases} \beta M(u, \beta_{1}) - \beta_{2} M(u, \beta_{2}) + \\ \sqrt{1 + \beta_{2}^{2}} \operatorname{erfc} \sqrt{(1 + \beta_{2}^{2})u} - \sqrt{1 + \beta_{1}^{2}} \operatorname{erfc} \sqrt{(1 + \beta_{1}^{2})u} + \\ + \frac{\exp[-(1 + \beta_{1}^{2})u] - \exp[-(1 + \beta_{2}^{2})u]}{\sqrt{\pi u}} \end{cases}, (4.1.3)$$

где для условия $\beta_1=\beta_2=\beta$ следует $F(u,\beta,\beta)=F(u,-\beta,\beta)=F(u,\beta,-\beta)=0$.

2. Решение для пьезометра (рис. 4.1, *в*):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_w} f_{line} \left(\frac{r^2}{4at}, z_{w1}, z_{w2}, L_{Tp} \right), \tag{4.1.4}$$

$$f_{line}\left(\frac{r^{2}}{4at}, z_{w1}, z_{w2}, L_{Tp}\right) = \begin{pmatrix} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} + L_{Tp}}{r}\right) - M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} + L_{Tp}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} - L_{Tp}}{r}\right) - M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} - L_{Tp}}{r}\right) \end{pmatrix}. \tag{4.1.5}$$

3. Решение для пьезометра (рис. 4.1, в) (аналогично уравнению (4.1.4) для системы координат, перенесенной от кровли водоносного пласта к центру фильтра опытной скважины) [Мироненко, Шестаков, 1978]:

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} f_{line}(l_{w}, r, z, t), \qquad (4.1.6)$$

$$f_{line}(l_w, r, z, t) = M\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{0.5l_w - z}{r}\right). \tag{4.1.7}$$

Уравнения для периода стационара

Уравнения понижений соответственно для изотропного и анизотропного водоносного пласта [Гиринский, 1950; Бабушкин, 1954а]:

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r} \right], \tag{4.1.8}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r\chi} \right]$$
(4.1.9)

или иная форма уравнений (4.1.8) и (4.1.9):

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \ln \frac{\sqrt{(z+0.5l_{w})^{2} + r^{2} + (z+0.5l_{w})}}{\sqrt{(z-0.5l_{w})^{2} + r^{2} + (z-0.5l_{w})}},$$
(4.1.10)

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r} l_{w}} \ln \frac{\sqrt{(z+0.5l_{w})^{2} + (r\chi)^{2}} + (z+0.5l_{w})}{\sqrt{(z-0.5l_{w})^{2} + (r\chi)^{2}} + (z-0.5l_{w})}.$$
 (4.1.11)

Уравнения (4.1.10) и (4.1.11) основаны на следующем равенстве: $\arcsin \lambda = \ln \left(\sqrt{\lambda^2 + 1} + \lambda \right)$, где λ – аргумент функции.

Частные случаи для стационарного периода

1. Упрощенное стационарное решение для изотропного и анизотропного водоносных пластов (пренебрегаем длиной фильтра опытной скважины):

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k \sqrt{r^2 + z^2}} \,, \tag{4.1.12}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r \sqrt{(r\chi)^2 + z^2}} \,. \tag{4.1.13}$$

Решения (4.1.12) и (4.1.13) аналогичны уравнениям понижений для точечного источника (см. раздел 3.1).

2. Опытная и наблюдательная скважины находятся на одном уровне (z=0), соответственно для изотропного и анизотропного пласта (рис. 4.2, a)

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r}, \qquad (4.1.14)$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k_r l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r\chi}.$$
 (4.1.15)

3. Пьезометр расположен по оси опытной скважины (r=0), соответственно для изотропного и анизотропного пласта (рис. 4.2, δ , δ)

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k l_w} \ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l_w},$$
(4.1.16)

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l}.$$
 (4.1.17)

4. Решение для опытной скважины:

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_{m}} \operatorname{arcsinh} \frac{0.74 l_{w}}{r_{m}}$$
 (4.1.18)

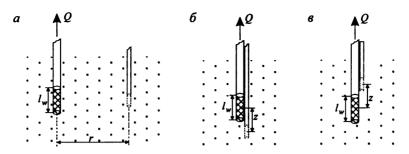


Рис. 4.2. Частные случаи расположения скважин. a — фильтры опытной и наблюдательной скважин находятся на одном уровне; b, b — фильтры опытной и наблюдательной скважин находятся на одной оси.

Замечания

- 1. Уравнения (4.1.1) и (4.1.4) основаны на зависимостях для относительно малых величин времени в наблюдательной скважине и в пьезометре, расположенных в профильноограниченном пласте (см. раздел 4.3), когда профильные границы не оказывают заметного влияния на понижение уровня [Hantush, 1961b]. Для решения этих уравнений необходимо знать расстояния до кровли пласта, которые отвечают за расположение скважин (см. рис. 4.11): z_{w1} , z_{w2} , z_{p1} , z_{p2} , L_{Tw} , L_{Tp} .
- 2. Более удобным для практических расчетов по данным о понижении уровня в пьезометре является решение (4.1.6). Оно получается при перемещении системы координат от кровли пласта до середины фильтра опытной скважины [Мироненко, Шестаков, 1978]. Для его решения достаточно знать расстояние по вертикали z между центром фильтра опытной скважины и пьезометром (рис. 4.1, в).

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.1.1
Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

1 40 101	i ac iclibic wopmytibi gim onpegetenim napamerpob itorponitoro intacta				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопро- водность, м ² /сут		
	$\lg f'_{line}(u, r, z_{w1}, z_{w2}, z_{p1}, z_{p2}) - \lg \frac{1}{u} (1)$	$k = \frac{Qr}{8\pi l_w l_p \cdot 10^D}$			
$\lg s - \lg t$	$\lg f_{line}(u, r, z_{w1}, z_{w2}, L_{Tp}) - \lg \frac{1}{u} $ (2)	$k = \frac{Q}{8\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$		
	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} (2)$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$			

Примечание.
$$M'(u,\beta) = M\left(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\right);$$

^{(1) –} для определения параметров по понижению в наблюдательной скважине; (2) – для определения параметров по понижению в пьезометре.

Способ прямой линии

Таблица 4.1.2 Расчетные формулы для определения параметров способом площадного прослеживания

Условие	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Произвольное расположение скважин	s-f(r,z)	$k = \frac{Q}{4\pi l_w C}$
Скважины находятся на одном уровне (z = 0)	s-f(r)	$k = \frac{Q}{2\pi l_w C}$
Пренебрегаем длиной фильтра	$s - \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}}$	$k = \frac{Q}{4\pi C}$

 Π римечание. $f(r) = \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r}$;

$$f(r,z) = \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r} \right] \text{ или } f(r,z) = \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_w)^2 + r^2 + (z + 0.5l_w)}}{\sqrt{(z - 0.5l_w)^2 + r^2 + (z - 0.5l_w)}};$$

Способ отношения понижений

1. По средним понижениям в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f'_{line}(t, r_1, z_{w1}, z_{w2}, z_{p1,1}, z_{p2,1})}{f'_{line}(t, r_2, z_{w1}, z_{w2}, z_{p1,2}, z_{p2,2})}.$$
(4.1.19)

2. По понижениям в двух пьезометрах:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{line}(t, r_1, z_{w1}, z_{w2}, L_{Tp,1})}{f_{line}(t, r_2, z_{w1}, z_{w2}, L_{Tp,2})}$$
(4.1.20)

или более удобное решение

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{line}(l_w, r_1, z_1, t)}{f_{line}(l_w, r_2, z_2, t)}.$$
 (4.1.21)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

- 1. Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара для различных случаев расположения опытной и наблюдательной скважин (для случая анизотропного водоносного пласта вместо коэффициента фильтрации k определяется коэффициент фильтрации по горизонтали k_r , при этом необходимо расстояние до опытной скважины r заменить приведенным расстоянием $r\chi$):
 - произвольное расположение опытной и наблюдательной скважин:

$$k = \begin{bmatrix} \frac{Q}{4\pi s_{m}l_{w}} \left(\arcsin \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \arcsin \frac{0.5l_{w} + z}{r} \right) = \\ = \frac{Q}{4\pi s_{m}l_{w}} \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z + 0.5l_{w})}{\sqrt{(z - 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z - 0.5l_{w})} \end{bmatrix};$$
(4.1.22)

- опытная и наблюдательная скважины находятся на одном уровне (z=0) (рис. 4.2, a):

$$k = \frac{Q}{2\pi s_m l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r}; \qquad (4.1.23)$$

– наблюдательная скважина находится над или под опытной скважиной (r=0) (рис. 4.2, δ , ϵ):

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l_w}; (4.1.24)$$

- по понижению в опытной скважине на период стационара:

$$k = \frac{Q}{2\pi k s_{mw} l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{0.74 l_w}{r_w}; \qquad (4.1.25)$$

 на основе упрощенного решения (4.1.12), пренебрегаем длиной фильтра опытной скважины:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m \sqrt{r^2 + z^2}} \,. \tag{4.1.26}$$

2. Определение подбором коэффициента анизотропии χ по отношению максимальных понижений в двух наблюдательных скважинах:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\sqrt{(\chi r_2)^2 + z_2^2}}{\sqrt{(\chi r_1)^2 + z_1^2}}$$
(4.1.27)

или для наблюдательных скважин, находящихся на одном уровне (рис. 4.2, а):

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r_1 \chi}}{\operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r_2 \chi}}.$$
 (4.1.28)

Подбор параметров

Таблица 4.1.3 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.1.1, 4.1.4, 4.1.6	k, a	$s - \lg t$
4.1.19, 4.1.20, 4.1.21	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Дуплетное опробование

Схема проведения опыта:

- общие условия для линейного источника в неограниченном пласте (см. начало раздела 4.1);
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия, в которой с помощью пакеров выделяются два интервала. Из верхнего (первого) интервала откачивается вода с постоянным расходом, а в нижний (второй) интервал с таким же расходом закачивается вода [Zlotnik, Ledder, 1996];
- типовая схема: рис. 4.3.

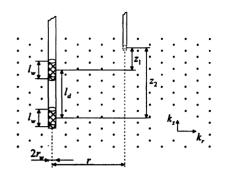


Рис. 4.3. Типовая схема (разрез) линейного источника в профильно-анизотропном водоносном пласте при дуплетном опробовании.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в любой точке наблюдения

$$s = \frac{Q}{8\pi k_r l_w} \left\{ M \left[\frac{(\chi r)^2 S_s}{4k_z t}, \frac{z_1 + 0.5l_w}{\chi r} \right] - M \left[\frac{(\chi r)^2 S_s}{4k_z t}, \frac{z_1 - 0.5l_w}{\chi r} \right] + M \left[\frac{(\chi r)^2 S_s}{4k_z t}, \frac{z_2 - 0.5l_w}{\chi r} \right] - M \left[\frac{(\chi r)^2 S_s}{4k_z t}, \frac{z_2 + 0.5l_w}{\chi r} \right] \right\}.$$
(4.1.29)

Частный случай для нестационарной фильтрации

Понижение в верхнем интервале фильтра опытной скважины

$$s_{w} = \frac{Q}{8\pi k_{r} l_{w}^{2}} \chi r_{w} \begin{cases} 2M_{1} \left[\frac{(\chi r_{w})^{2} S_{s}}{4k_{z} t}, \frac{l_{w}}{\chi r_{w}} \right] - M_{1} \left[\frac{(\chi r_{w})^{2} S_{s}}{4k_{z} t}, \frac{l_{d} - l_{w}}{\chi r_{w}} \right] + \\ + 2M_{1} \left[\frac{(\chi r_{w})^{2} S_{s}}{4k_{z} t}, \frac{l_{d}}{\chi r_{w}} \right] - M \left[\frac{(\chi r_{w})^{2} S_{s}}{4k_{z} t}, \frac{l_{d} + l_{w}}{\chi r_{w}} \right] \end{cases}, \tag{4.1.30}$$

где

$$M_{1}(u,\beta) = \begin{cases} \beta M(u,\beta) + 2 \frac{\exp\left[-u\left(1+\beta^{2}\right)\right] - \exp\left(-u\right)}{\sqrt{\pi u}} + \\ + 2\left[\operatorname{erfc}\sqrt{u} - \sqrt{1+\beta^{2}}\operatorname{erfc}\sqrt{u\left(1+\beta^{2}\right)}\right] \end{cases}$$
(4.1.31)

Уравнения для периода стационара

Понижение в любой точке наблюдения

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r} l_{f}} \begin{cases} \operatorname{arcsinh}\left(\frac{z_{1} + 0.5 l_{f}}{\chi r}\right) - \operatorname{arcsinh}\left(\frac{z_{1} - 0.5 l_{f}}{\chi r}\right) + \\ + \operatorname{arcsinh}\left(\frac{z_{2} - 0.5 l_{f}}{\chi r}\right) - \operatorname{arcsinh}\left(\frac{z_{2} + 0.5 l_{f}}{\chi r}\right) \end{cases}$$
(4.1.32)

Частные случаи для стационарного периода

1. Понижение в любой точке наблюдения для условия, когда вертикальное расстояние между двумя фильтрами больше длины самого фильтра ($l_w/l_d << 1$),

$$s_m \approx \frac{Q}{2\pi k_r l_d} \left| \frac{l_d}{\sqrt{(\chi r)^2 + z_1^2}} - \frac{l_d}{\sqrt{(\chi r)^2 + z_2^2}} \right|.$$
 (4.1.33)

Уравнение (4.1.33) можно использовать для условия, когда длиной фильтра можно пренебречь, а линейный источник рассматривать как точечный (см. раздел 3.1).

2. Понижение в верхнем интервале фильтра опытной скважины

$$s_{mw} = \frac{Q}{4\pi k_r l_w} \left\{ \frac{l_w}{\chi r_w} + \frac{\chi r_w}{l_w} \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{l_w}{\chi r_w}\right)^2} \right) \right\} + \frac{2l_d}{l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{l_d}{\chi r_w}\right) - \frac{\chi r_w}{l_d} \sqrt{1 + \left(\frac{l_d}{\chi r_w}\right)^2} \right] - \frac{l_d - l_w}{l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{l_d - l_w}{\chi r_w}\right) - \frac{\chi r_w}{l_d - l_w} \sqrt{1 + \left(\frac{l_d - l_w}{\chi r_w}\right)^2} \right] - \frac{l_d + l_w}{l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{l_d + l_w}{\chi r_w}\right) - \frac{\chi r_w}{l_d + l_w} \sqrt{1 + \left(\frac{l_d + l_w}{\chi r_w}\right)^2} \right] \right\}$$

$$(4.1.34)$$

3. Понижение в верхнем интервале фильтра опытной скважины для условия $2\frac{\chi r_w}{l_d-l_w} << 1$

$$s_{mw} \approx \frac{Q}{2\pi k_{r} l_{w}} \left[\ln \frac{\sqrt{l_{w}^{2} + (\chi r_{w})^{2} + l_{w}}}{\chi r_{w}} - \frac{\sqrt{l_{w}^{2} + (\chi r_{w})^{2}}}{l_{w}} + \frac{\chi r_{w}}{l_{w}} - \frac{l_{d} - l_{w}}{l_{w}} - \frac{l_{d} - l_{w}}{l_{w}} \ln \left(\frac{l_{d} - l_{w}}{l_{w}} \right) - \frac{l_{d} + l_{w}}{0.5 l_{w}} \ln \left(\frac{l_{d} + l_{w}}{l_{w}} \right) \right].$$

$$(4.1.35)$$

Уравнение (4.1.35) упрощается, если радиус фильтра значительно меньше длины интервала фильтра опытной скважины $2\frac{\chi r_w}{l} << 1$:

$$s_{mw} \approx \frac{Q}{2\pi k_r l_w} \left[\ln \frac{2l_w}{\chi r_w} - 1 - \frac{l_d - l_w}{2l_w} \ln \frac{l_d - l_w}{l_d} - \frac{l_d + l_w}{2l_w} \ln \frac{l_d + l_w}{l_d} \right]. \tag{4.1.36}$$

Замечание

Для полуограниченных и ограниченных пластов используется принцип суперпозиции, где необходимо учитывать фиктивные скважины, полученные от верхнего и нижнего интервала фильтра опытной скважины. Для этого надо знать расстояния от каждого интервала до границы.

Способы обработки откачки

Точечные способы

По аналогии с точечными решениями (4.1.22) – (4.1.28) для откачки с постоянным расходом на основе уравнений (4.1.32) – (4.1.36) используются прямые способы определения горизонтального коэффициента фильтрации при известном коэффициенте анизотропии. Или на основе уравнений (4.1.32) и (4.1.33) по способу отношения понижений в двух скважинах определяется коэффициент анизотропии.

Подбор параметров

Таблица 4.1.4 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
4.1.29	k_r, k_z, S_s	$s - \lg t$	
4.1.30	k_r, k_z, S_s	$s_w - \lg t$	

4.2. Полуограниченный пласт для линейного источника

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, полуограниченный в разрезе или в плане;
- граница: прямолинейная бесконечная, профильная или плановая;
- понижение определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 4.4):

вариант 1: полуограниченный в разрезе пласт — профильная непроницаемая граница (условие II рода);

вариант 2: полуограниченный в плане пласт – плановая граница обеспеченного питания (условие І рода) или непроницаемая граница (условие ІІ рода).

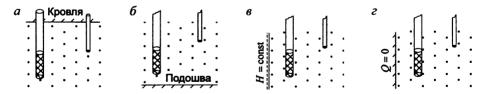


Рис. 4.4. Схематичные разрезы полуограниченного пласта.

- a профильная граница кровля пласта; δ профильная граница подошва пласта;
- в плановая граница обеспеченного питания; г плановая непроницаемая граница.

Определение расстояния до фиктивной скважины

Вертикальное расстояние до фиктивной скважины, отраженной от профильной границы,

$$z' = B_w + B_p . (4.2.1)$$

Горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, отраженной от плановой границы,

$$\rho = \sqrt{r^2 + (L_p + L_w)^2 - (L_p - L_w)^2} = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} . \tag{4.2.2}$$

4.2.1. Полуограниченный в разрезе пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного пласта (см. начало раздела 4.2);
- граница: профильная непроницаемая (кровля или подошва пласта);
- пласт полуограничен в разрезе и неограничен в плане;
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен расходу опытной скважины;
- типовая схема: рис. 4.5.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (4.2.3);
- понижение для стационарного периода: уравнения (4.2.4) и (4.2.5);
- понижение для стационарного периода, частные случаи расположения скважин: уравнения (4.2.6) – (4.2.15);
- понижение для стационарного периода в опытной скважине: уравнение (4.2.16).

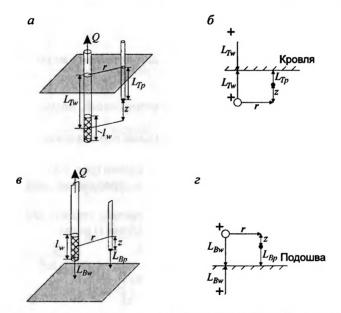


Рис. 4.5. Типовая схема линейного источника в напорном пласте с профильной непроницаемой границей. Трехмерное представление и схема: a, 6 – граница – кровля пласта; a, c – граница – подошва пласта.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в пьезометре для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + f_{line}(l_{w}, r, B_{w} + B_{p}, t) \right]. \tag{4.2.3}$$

Уравнения для периода стационара

Понижение в пьезометре для изотропного и анизотропного пласта

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} \arcsin \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \arcsin \frac{0.5l_{w} + z}{r} + \\ + \arcsin \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r} + \arcsin \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{r} \end{bmatrix}, \tag{4.2.4}$$

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r} l_{w}} \begin{bmatrix} \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} - z}{r \chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} + z}{r \chi} + \\ + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r \chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} + B_{w} + B_{p}}{r \chi} \end{bmatrix}.$$
(4.2.5)

Частные случаи для стационарного периода

1. Опытная скважина и пьезометр находятся на одном уровне (z=0) (рис. 4.6): понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k l_w} \left(2 \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w - 2B_w}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w + 2B_w}{r} \right), \tag{4.2.6}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r l_w} \left(2 \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - 2B_w}{r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + 2B_w}{r\chi} \right). \tag{4.2.7}$$

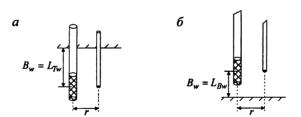


Рис. 4.6. Частные случаи расположения скважин — опытная скважина и пьезометр находятся на одном уровне. a — вблизи кровли пласта; δ — вблизи подошвы пласта.

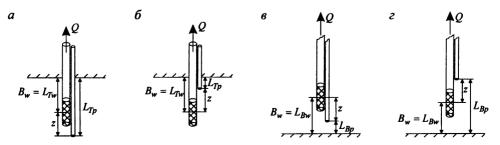


Рис. 4.7. Частные случаи расположения скважин — опытная скважина и пъезометр находятся на одной оси. a, b — вблизи кровли пласта; b, c — вблизи подошвы пласта.

2. Пьезометр расположен по оси опытной скважины (r=0) (рис. 4.7): понижение для изотропного и анизотропного пласта

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k l_w} \left(\ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l_w} + \ln \frac{B_w + B_p + 0.5 l_w}{B_w + B_p - 0.5 l_w} \right), \tag{4.2.8}$$

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k_r l_w} \left(\ln \frac{z + 0.5l_w}{z - 0.5l_w} + \ln \frac{B_w + B_p + 0.5l_w}{B_w + B_p - 0.5l_w} \right). \tag{4.2.9}$$

- Опытная скважина и/или пьезометр примыкают к кровле или подошве водоносного пласта. Понижение для изотропного и анизотропного пласта, если:
 - пьезометр примыкает к кровле или подошве пласта ($z = B_w$) (рис. 4.8, a, b),

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w - B_w}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w + B_w}{r} \right), \tag{4.2.10}$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k_r l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - B_w}{r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + B_w}{r\chi} \right); \tag{4.2.11}$$

- опытная скважина примыкает к кровле или подошве пласта [Гиринский, 1950] (рис. 4.8, ϵ , ϵ),

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - B_p}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + B_p}{r} \right), \tag{4.2.12}$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k_r l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - B_p}{r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + B_p}{r\chi} \right); \tag{4.2.13}$$

– опытная скважина и пьезометр примыкают к кровле или подошве пласта (рис. $4.8, \partial, e$),

$$s_m = \frac{Q}{\pi k l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r}, \qquad (4.2.14)$$

$$s_m = \frac{Q}{\pi k_r l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r\chi} \,. \tag{4.2.15}$$

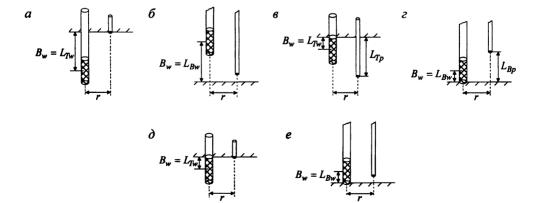


Рис. 4.8. Частные случаи расположения скважин относительно профильной границы. a, b – пъезометр примыкает к кровле или подошве пласта; e, e – опытная скважина примыкает к кровле или подошве пласта; d, e – опытная скважина и пъезометр примыкают к кровле или подошве пласта.

4. Понижение в опытной скважине [Шестаков, 1973]:

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.74 l_w}{r_w} + \frac{1}{2} \ln \frac{B_w + 0.5 l_w}{B_w - 0.5 l_w} - \frac{B_w}{l_w} \ln \frac{B_w^2 - 0.25 l_w^2}{B_w^2} \right). \tag{4.2.16}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.2.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$M'(u,\beta) = \begin{bmatrix} M\left(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + M\left(u,\frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r}\right) \end{bmatrix}.$$

Способ прямой линии

Таблица 4.2.2

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	s-f(r,z)	$k = \frac{Q}{4\pi l_w C}$

$$\Pi \text{ римечание. } f(r,z) = \begin{bmatrix} \arcsin \frac{0.5l_w - z}{r} + \arcsin \frac{0.5l_w + z}{r} + \\ + \arcsin \frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r} + \arcsin \frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r} \end{bmatrix}.$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{line}(l_w, r_1, z_1, t) + f_{line}(l_w, r_1, B_{w,1} + B_{p,1}, t)}{f_{line}(l_w, r_2, z_2, t) + f_{line}(l_w, r_2, B_{w,2} + B_{p,2}, t)},$$
(4.2.17)

подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара для различных случаев расположения скважин (для случая анизотропного водоносного пласта вместо коэффициента фильтрации k определяется коэффициент фильтрации по

горизонтали k_r , при этом необходимо заменить расстояние до опытной скважины r приведенным расстоянием $r\chi$).

1. Произвольное расположение скважин:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \begin{bmatrix} \arcsin \frac{0.5l_w - z}{r} + \arcsin \frac{0.5l_w + z}{r} + \\ + \arcsin \frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r} + \arcsin \frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r} \end{bmatrix}.$$
 (4.2.18)

2. Опытная скважина и пьезометр находятся на одном уровне (z = 0) (рис. 4.6):

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \left(2 \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w - 2B_w}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w + 2B_w}{r} \right). \tag{4.2.19}$$

3. Пьезометр расположен по оси опытной скважины (r=0) (рис. 4.7):

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \left(\ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l_w} + \ln \frac{B_w + B_p + 0.5 l_w}{B_w + B_p - 0.5 l_w} \right). \tag{4.2.20}$$

4. Пьезометр расположен на кровле или подошве пласта ($z = B_w$) (рис. 4.8, a, δ):

$$k = \frac{Q}{2\pi s_{m} l_{w}} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} - B_{w}}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_{w} + B_{w}}{r} \right). \tag{4.2.21}$$

5. Опытная скважина примыкает к кровле или подошве пласта (рис. 4.8, ϵ , ϵ):

$$k = \frac{Q}{2\pi s_m l_w} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - B_p}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + B_p}{r} \right). \tag{4.2.22}$$

6. Опытная скважина и пьезометр примыкают к кровле или подошве пласта (рис. $4.8, \partial, e$):

$$k = \frac{Q}{\pi s_m l_w} \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r}.$$
 (4.2.23)

7. По понижению в опытной скважине

$$k = \frac{Q}{2\pi s_{mw}l_{w}} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{0.74l_{w}}{r_{w}} + \frac{1}{2} \ln \frac{B_{w} + 0.5l_{w}}{B_{w} - 0.5l_{w}} - \frac{B_{w}}{l_{w}} \ln \frac{B_{w}^{2} - 0.25l_{w}^{2}}{B_{w}^{2}} \right). \tag{4.2.24}$$

Подбор параметров

Таблиуа 4.2.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.2.3	k, a	$s - \lg t$
4.2.17	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.2.2. Полуограниченный в плане пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало раздела 4.2);
- граница: плановая;
- пласт неограничен в разрезе и полуограничен в плане;
- фиктивная скважина: одна;
- типовая схема: рис. 4.9.

Рассматривается два варианта граничных условий:

вариант 1: граница обеспеченного питания (условие І рода);

вариант 2: непроницаемая граница (условие II рода).

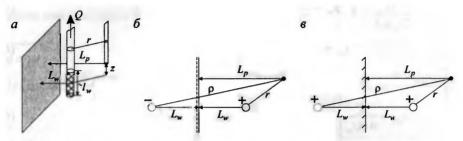


Рис. 4.9. Типовая схема линейного источника в напорном полуограниченном в планс пласте. a – трехмерное представление; b – план для границы обеспеченного питания; b – план для непроницаемой границы.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (4.2.25);
- понижение для стационарного периода: уравнения (4.2.26) и (4.2.27);
- понижение для стационарного периода, частные случаи расположения скважин: уравнения (4.2.28) – (4.2.31).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в пьезометре для изотропного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} [f_{line}(l_{w}, r, z, t) \pm f_{line}(l_{w}, \rho, z, t)], \qquad (4.2.25)$$

где знак «+» для границы II рода, знак «-» для границы I рода.

Уравнения для периода стационара

Понижение в пьезометре для изотропного и анизотропного пласта

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{cases} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{r} \right] \pm \\ \pm \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - z}{\rho} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{\rho} \right] \end{cases}, \tag{4.2.26}$$

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r} l_{w}} \left\{ \begin{bmatrix} \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - z}{r\chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{r\chi} \end{bmatrix} \pm \\ \pm \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - z}{\rho \chi} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{\rho \chi} \right] \right\}.$$
(4.2.27)

Частные случаи для стационарного периода

Понижение для изотропного и анизотропного пласта:

- опытная скважина и пьезометр находятся на одном уровне (z = 0) (рис. 4.10, a)

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi k l_{w}} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{l_{w}}{2r} \pm \operatorname{arcsinh} \frac{l_{w}}{2\rho} \right], \tag{4.2.28}$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k_r l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r\chi} \pm \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2\rho\chi} \right]; \tag{4.2.29}$$

- пьезометр расположен по оси опытной скважины (r = 0) (рис. 4.10, δ , ϵ):

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[\ln \frac{z + 0.5 l_{w}}{z - 0.5 l_{w}} \pm \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5 l_{w})^{2} + \rho^{2} + (z + 0.5 l_{w})}}{\sqrt{(z - 0.5 l_{w})^{2} + \rho^{2} + (z - 0.5 l_{w})}} \right], \tag{4.2.30}$$

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k_{r} l_{w}} \left[\ln \frac{z + 0.5 l_{w}}{z - 0.5 l_{w}} \pm \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5 l_{w})^{2} + (\rho \chi)^{2} + (z + 0.5 l_{w})}}{\sqrt{(z - 0.5 l_{w})^{2} + (\rho \chi)^{2} + (z - 0.5 l_{w})}} \right]. \tag{4.2.31}$$

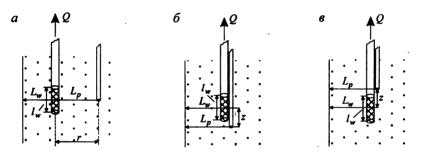


Рис. 4.10. Частные случаи расположения скважин относительно плановой границы (разрезы). a — фильтр опытной скважины и пьезометр находятся на одном уровне;

б, е - фильтр опытной скважины и пьезометр находятся на одной оси.

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.2.4 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.

$$M'(u,\beta) = \left[M\left(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\right) \right] \pm \left[M\left(ur',\frac{0.5l_w + z}{\rho}\right) + M\left(ur',\frac{0.5l_w - z}{\rho}\right) \right];$$

$$r' = (\rho/r)^2.$$

Способ прямой линии

Таблица 4.2.5

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут
Площадное прослеживание	s-f(r,z)	$k = \frac{Q}{4\pi l_w C}$

Примечание.

$$f(r,z) = \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r} \right] \pm \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{\rho} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{\rho} \right].$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{line}(l_w, r_1, z_1, t) \pm f_{line}(l_w, \rho_1, z_1, t)}{f_{line}(l_w, r_2, z_2, t) \pm f_{line}(l_w, \rho_2, z_2, t)},$$
(4.2.32)

подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

Определение коэффициента фильтрации k по понижению на период стационара для различных случаев расположения скважин (для случая анизотропного водоносного пласта вместо коэффициента фильтрации k определяется коэффициент фильтрации по горизонтали k_r , при этом расстояния до опытной скважины r и до отраженной скважины ρ необходимо заменить приведенными расстояниями $r\chi$ и $\rho\chi$).

1. Произвольное расположение скважин:

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \begin{bmatrix} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r} \right] \pm \\ \pm \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{\rho} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{\rho} \right] \end{bmatrix}. \tag{4.2.33}$$

2. Опытная скважина и пьезометр находятся на одном уровне (z = 0) (рис. 4.10, a):

$$k = \frac{Q}{2\pi s_m l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2r} \pm \operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{2\rho} \right]. \tag{4.2.34}$$

3. Пьезометр расположен по оси опытной скважины (r = 0) (рис. 4.10, δ , ϵ):

$$k = \frac{Q}{4\pi s_m l_w} \left[\ln \frac{z + 0.5 l_w}{z - 0.5 l_w} \pm \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5 l_w)^2 + \rho^2} + (z + 0.5 l_w)}{\sqrt{(z - 0.5 l_w)^2 + \rho^2} + (z - 0.5 l_w)} \right]. \tag{4.2.35}$$

Подбор параметров

Таблица 4.2.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.2.25	k, a	$s - \lg t$
4.2.32	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.3. Ограниченный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, ограниченный в разрезе или в плане:
- границы: две прямолинейные параллельные бесконечные, профильные или плановые.
 Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 4.11):
- вариант 1: ограниченный в разрезе пласт (неограниченный по простиранию) две профильные непроницаемые границы (условия II рода);
- вариант 2: ограниченный в плане пласт (неограниченный в разрезе) две плановые границы обеспеченного питания (условия I рода), непроницаемые границы (условия II рода) или две границы различного рода (условия I и II рода);

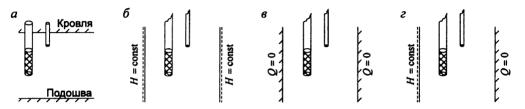


Рис. 4.11. Схематичные разрезы ограниченного пласта. a – профильные непроницаемые границы; δ – плановые границы обеспеченного питания;

s — плановые непроницаемые границы; s — плановые смещанные граничные условия.

4.3.1. Ограниченный в разрезе пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного пласта (см. начало раздела 4.3);
- границы: две профильные непроницаемые (условия II рода);
- пласт неограничен в плане;
- фиктивные скважины: один ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 4.12, г;
- понижение определяется в наблюдательной скважине или в пьезометре в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 4.12.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Вертикальные расстояния от открытой части пьезометра или середины фильтра наблюдательной скважины до середины фильтра фиктивных скважин, отраженных от кровли z_1^f и от подошвы z_2^f :

$$z_1^j = L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{B_w} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{T_w} , \qquad (4.3.1)$$

$$z_2^j = L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw} . \tag{4.3.2}$$

Список решений:

- 1) решения для пьезометра:
- понижение для нестационарного периода: уравнения (4.3.3), (4.3.5) и (4.3.7);
- понижение для нестационарного периода, частные случаи: уравнения (4.3.8), (4.3.10), (4.3.12) (4.3.15);
- 2) решения для среднего понижения в наблюдательной скважине:
- понижение для нестационарного периода: уравнение (4.3.16);
- понижение для нестационарного периода, частные случаи: уравнения (4.3.17), (4.3.18), (4.3.20) – (4.3.28);
- 3) общее уравнение для больших расстояний: уравнение (4.3.29).

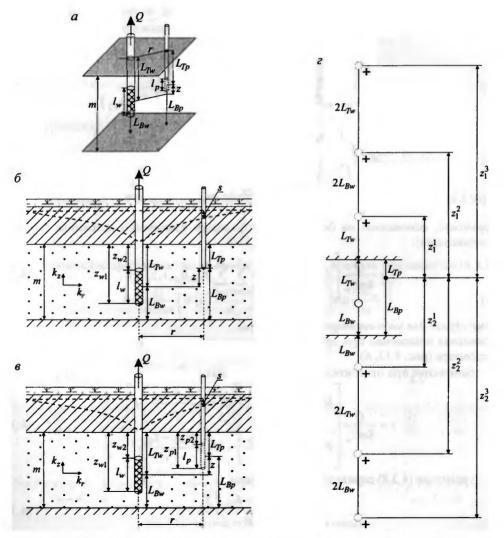


Рис. 4.12. Типовая схема линейного источника в напорном ограниченном в разрезе пласте.

а – трехмерное представление; б – схематичный разрез с пьезометром; в – схематичный разрез с наблюдательной скважиной; г – схематичный разрез с фиктивными скважинами и вертикальными расстояниями до них.

Откачка с постоянным расходом

❖ Базовые аналитические зависимости

Решения для пьезометра

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Общее уравнение понижения:

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W\left(u, \frac{n\pi r}{m}\right) \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m}\right) \cos \frac{n\pi L_{Tp}}{m} \right] \right\}, \quad (4.3.3)$$

$$u = \frac{r^2 S_s}{4kt} = \frac{r^2}{4at} \,. \tag{4.3.4}$$

2. Уравнение (4.3.3) можно записать в иной форме:

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \left[M\left(u, \frac{z_{w1} + L_{Tp}}{r}\right) + M\left(u, \frac{z_{w1} - L_{Tp}}{r}\right) + f'(z_{w1}) - \left(u, \frac{z_{w2} + L_{Tp}}{r}\right) + M\left(u, \frac{z_{w2} - L_{Tp}}{r}\right) + f'(z_{w2}) \right], \tag{4.3.5}$$

$$f'(\beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[M\left(u, \frac{2nm + \beta + L_{T_p}}{r}\right) - M\left(u, \frac{2nm - \beta - L_{T_p}}{r}\right) + M\left(u, \frac{2nm + \beta - L_{T_p}}{r}\right) - M\left(u, \frac{2nm - \beta + L_{T_p}}{r}\right) \right].$$
(4.3.6)

Уравнение, основанное на бесконечном отражении единичного источника (принцип суперпозиции):

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, r, z_{i}^{j}, t) \right]. \tag{4.3.7}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. Уравнения понижений при произвольном расположении фильтра опытной скважины и пьезометра (рис. 4.12, 6):
 - понижение при относительно малых величинах времени

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \left[M \left(u, \frac{z_{w} + L_{Tp}}{r} \right) - M \left(u, \frac{z_{w2} + L_{Tp}}{r} \right) + \left(u, \frac{z_{w} - L_{Tp}}{r} \right) - M \left(u, \frac{z_{w2} - L_{Tp}}{r} \right) \right], \tag{4.3.8}$$

уравнение (4.3.8) справедливо для времени

$$t < \frac{\left(2m - z_{wl} - L_{Tp}\right)^2 S_s}{20k},\tag{4.3.9}$$

что соответствует аргументу
$$u > \frac{5r^2}{(2m - z_{wl} - L_{T_p})^2}$$
;

- понижение при относительно больших величинах времени

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{4m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_0 \left(\frac{n\pi r}{m} \right) \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \cos \frac{n\pi L_{Tp}}{m} \right] \right\}, \quad (4.3.10)$$

уравнение (4.3.10) справедливо для времени

$$t > \frac{m^2 S_s}{2k},\tag{4.3.11}$$

что соответствует аргументу $u < \frac{r^2}{2m^2}$.

- 2. Уравнения понижений для условия, когда фильтр опытной скважины и пьезометр примыкают к кровле водоносного пласта ($z_{w2} = L_{T_D} = 0$) (рис. 4.13, a):
 - уравнение (4.3.3) упрощается:

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W\left(u, \frac{n\pi r}{m}\right) \sin \frac{n\pi l_w}{m} \right] \right\}; \tag{4.3.12}$$

уравнение (4.3.5) упрощается:

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_w} \left\{ M\left(u, \frac{l_w}{r}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[M\left(u, \frac{2nm + l_w}{r}\right) - M\left(u, \frac{2nm - l_w}{r}\right) \right] \right\}; \tag{4.3.13}$$

- понижение при относительно малых величинах времени (неравенство (4.3.9))

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_w} M\left(u, \frac{l_w}{r}\right); \tag{4.3.14}$$

понижение при относительно больших величинах времени (неравенство (4.3.11))

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{4m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_0 \left(\frac{n\pi r}{m} \right) \sin \frac{n\pi l_w}{m} \right] \right\}. \tag{4.3.15}$$

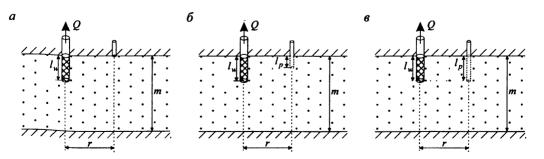


Рис. 4.13. Частные случаи расположения скважин.

a — фильтр опытной скважины и пьезометр примыкают к кровле пласта; b — фильтры опытной и наблюдательной скважин примыкают к кровле пласта; b — фильтры опытной и наблюдательной скважин имеют равную длину и примыкают к кровле пласта.

Решения для среднего понижения в наблюдательной скважине <u>Уравнения нестационарной фильтрации</u>

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m^2}{\pi^2 l_w l_p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} W\left(u, \frac{n\pi r}{m}\right) \left(\sin\frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{w2}}{m}\right) \times \left(\sin\frac{n\pi z_{p1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{p2}}{m}\right) \right] \right\}. \quad (4.3.16)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. Уравнения понижений при произвольном расположении фильтров опытной и наблюдательной скважин (см. рис. 4.12, в):
 - понижение при относительно малых величинах времени

$$s = \frac{Qr}{8\pi k l_{w} l_{p}} \left[F\left(u, \frac{z_{w1} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p1}}{r}\right) - F\left(u, \frac{z_{w2} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p1}}{r}\right) + F\left(u, \frac{z_{w2} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p2}}{r}\right) - F\left(u, \frac{z_{w1} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p2}}{r}\right) \right], \quad (4.3.17)$$

$$F(u, \beta_1, \beta_2) = \begin{cases} \beta M(u, \beta_1) - \beta_2 M(u, \beta_2) + \\ + 2 \left[\sqrt{1 + \beta_2^2} \operatorname{erfc} \sqrt{(1 + \beta_2^2)u} - \sqrt{1 + \beta_1^2} \operatorname{erfc} \sqrt{(1 + \beta_1^2)u} + \right] \\ + \frac{\exp[-(1 + \beta_1^2)u] - \exp[-(1 + \beta_2^2)u]}{\sqrt{\pi u}} \end{cases}, \quad (4.3.18)$$

уравнение (4.3.17) справедливо для времени

$$t < \frac{(2m - z_{w1} - z_{w2})^2 S_s}{20k}, \tag{4.3.19}$$

что соответствует аргументу $u > \frac{5r^2}{(2m - z_{wl} - z_{w2})^2}$;

- понижение при относительно больших величинах времени (неравенство (4.3.11))

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{4m^2}{\pi^2 l_w l_p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} K_0 \left(\frac{n\pi r}{m} \right) \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \times \left(\sin \frac{n\pi z_{p1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{p2}}{m} \right) \right] \right\}. \tag{4.3.20}$$

- 2. Уравнения понижений для условия, когда фильтры опытной и наблюдательной скважин примыкают к кровле водоносного пласта ($z_{w2} = z_{p2} = 0$) (рис. 4.13, 6):
 - общее уравнение понижения

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m^2}{\pi^2 l_w l_p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} W\left(u, \frac{n\pi r}{m}\right) \sin \frac{n\pi l_w}{m} \sin \frac{n\pi l_p}{m} \right] \right\}; \tag{4.3.21}$$

понижение при относительно малых величинах времени (неравенство (4.3.19))

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_w l_p} F\left(u, \frac{z_{wl} + z_{pl}}{r}, \frac{z_{wl} - z_{pl}}{r}\right); \tag{4.3.22}$$

- понижение для относительно больших величин времени (неравенство (4.3.11))

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left[W(u) + \frac{4m^2}{\pi^2 l_w l_p} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n^2} K_0 \left(\frac{n\pi r}{m} \right) \sin \frac{n\pi l_w}{m} \sin \frac{n\pi l_p}{m} \right\} \right]. \tag{4.3.23}$$

- 3. Уравнения понижений для условия, когда фильтры опытной и наблюдательной скважин имеют равную длину и примыкают к кровле водоносного пласта $(z_{w2} = z_{p2} = 0 \text{ и } l_w = l_p)$ (рис. 4.13, в):
 - общее уравнение понижения

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m^2}{\pi^2 l_w^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} W\left(u, \frac{n\pi r}{m}\right) \left(\sin \frac{n\pi l_w}{m}\right)^2 \right] \right\}; \tag{4.3.24}$$

понижение для относительно больших величин времени (неравенство (4.3.11))

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ W(u) + \frac{2m^2}{\pi^2 l_w^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} K_0 \left(\frac{n\pi r}{m} \right) \left(\sin \frac{n\pi l_w}{m} \right)^2 \right] \right\}. \tag{4.3.25}$$

- 4. Уравнения понижений при относительно малых величинах времени (неравенство (4.3.19)):
 - для условия $z_{p1}/z_{w1} < 2$ с достаточной точностью для практических целей можно использовать приближенное уравнение

$$s \approx \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \left[M \left(u, \frac{z_{w1} + L_{Tp}}{r} \right) - M \left(u, \frac{z_{w2} + L_{Tp}}{r} \right) + \left(u, \frac{z_{w1} - L_{Tp}}{r} \right) - M \left(u, \frac{z_{w2} - L_{Tp}}{r} \right) \right]; \tag{4.3.26}$$

— для условия $\frac{r}{z_{wl}} > 1$, $\frac{z_{pl}}{z_{wl}} < 1$, и если фильтры опытной и наблюдательной скважин

примыкают к кровле водоносного пласта,

$$s \approx \frac{Q}{4\pi k l_w} M\left(u, \frac{l_w}{r}\right),\tag{4.3.27}$$

если же глубина вскрытия опытной и наблюдательной скважин одинаковая ($z_{w1} = z_{p1}$), то

$$s \approx \frac{Q}{8\pi k l_w} M \left(u, \frac{2z_{wl}}{r} \right). \tag{4.3.28}$$

Замечания

1. Для относительно больших расстояний от опытной скважины (при отношении r/m > 1.5) уравнение понижения и в пьезометрах, и в наблюдательных скважинах имеет следующий вид:

$$s = \frac{Q}{4\pi km} W \left(\frac{r^2}{4at}\right). \tag{4.3.29}$$

Уравнение (4.3.29) дает достаточно точное решение и для отношения r/m, равного единице при условии, что $\frac{r^2}{4at} < 0.1 \left(\frac{r}{m}\right)^2$ или соответственно для времени $t > 2.5 \frac{m^2}{a}$.

2. Уравнения понижений (4.3.8) и (4.3.17) для относительно малых величин времени можно использовать в неограниченном в разрезе водоносном пласте при откачке любой длительности [Hantush. 1961b].

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой (для пьезометра)

Таблица 4.3.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

$$\Pi \text{ римечание. } M'(u,\beta) = \begin{cases} M\bigg(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\bigg) + M\bigg(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\bigg) + \\ + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \left[M\bigg(u,\frac{0.5l_w + z_i^j}{r}\bigg) + M\bigg(u,\frac{0.5l_w - z_i^j}{r}\bigg)\right] \end{cases}.$$

Способ отношения понижений (для пьезометра)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_{line}(l_w, r_1, z_1, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_w, r_1, z_{i,1}^j, t)}{f_{line}(l_w, r_2, z_2, t) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_w, r_2, z_{i,2}^j, t)},$$
(4.3.30)

подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 4.3.2 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

	1 1	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.3.3, 4.3.5, 4.3.7, 4.3.16	k, a	$s - \lg t$
4.3.30	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Замечания

- 1. В рассмотренной схеме используется большое количество решений для частных случаев: различные интервалы времени, определенное расположение опытной и наблюдательной скважин. Их можно также применять для обработки откачки способами эталонной кривой, отношения понижений и подбором параметров.
- 2. Для всех случаев применения уравнения (4.3.29) обработку опытно-фильтрационных опробований можно осуществлять способами, предложенными для совершенной по степени вскрытия скважины в однородном изотропном водоносном пласте, неограниченном в плане (см. раздел 3.1).

4.3.2. Ограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного пласта (см. начало раздела 4.3);
- границы: две плановые;
- пласт неограничен в разрезе и ограничен в плане;
- фиктивные скважины: один ряд бесконечных скважин, знаки расходов см. на рис. 4.14, 6;
- понижение определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта.
- типовая схема: рис. 4.14.

Рассматривается три варианта граничных условий:

вариант 1: две границы обеспеченного питания (условие І рода);

вариант 2: две непроницаемые границы (условие II рода);

вариант 3: одна граница обеспеченного питания (условие I рода), а противоположная – непроницаемая граница (условие II рода).

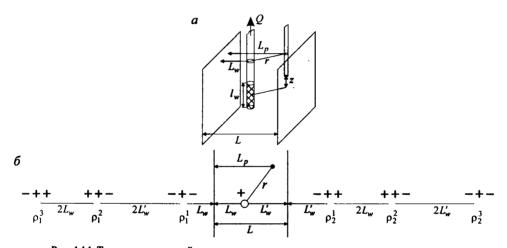


Рис. 4.14. Типовая схема линейного источника в напорном ограниченном в плане пласте. a — трехмерное представление; δ — схематичный план с фиктивными скважинами и горизонтальными расстояниями

предмерное представление; о – схематичный план с фиктивными скважинами и горизонтальными расстояниями
(рядом с фиктивными скважинами показаны горизонтальные расстояния от них до точки наблюдения; три знака
расхода: первый – для границ I рода, второй – для границ II рода и третий – для границ I и II рода).

Список решений:

- понижение в пьезометре для нестационарного периода: уравнения (4.3.33) – (4.3.35).

Определение расстояний до фиктивных скважин

Горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до отраженных скважин от левой ρ_1^J и от правой ρ_2^J границ

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2} , \tag{4.3.31}$$

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_p' + L_w' + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w'\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2} . \tag{4.3.32}$$

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в пьезометре:

для параллельных границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \right]; \tag{4.3.33}$$

для параллельных границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \right]; \tag{4.3.34}$$

для параллельных границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) + \\ + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \end{bmatrix}$$
(4.3.35)

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.3.3 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой
 График эталонной кривой
 Коэффициент фильтрации, м/сут
 Пьезопроводность, м²/сут

$$\lg s - \lg t$$
 $\lg M'(u, \beta) - \lg \frac{1}{u}$
 $k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$
 $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

 Π р и м е ч а н и е . Значения вспомогательной функции $M'(u,\beta)$ в зависимости от граничных условий:

- для границ I рода
$$M'(u, \beta) = \begin{cases} M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^j}\right)\right] \end{cases};$$

- для границ II рода
$$M'(u, \beta) = \begin{cases} M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^{j}}\right) + M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^{j}}\right)\right] \end{cases};$$

для границ I и II рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_{w}+z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_{w}-z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[M\left(ur_{i}^{\prime j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{\prime j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{i}^{\prime j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{\prime j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] \end{cases}$$

 $r_i^{\prime j} = \rho_i^j / r .$

Способ отношения понижений (для пьезометра)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{4.3.36}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы; f — выражение в квадратных скобках уравнений (4.3.33) — (4.3.35) для первого (f_1) и второго (f_2) пьезометров.

Подбор параметров

Таблица 4.3.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.3.33 – 4.3.35	k, a	$s-\lg t$
4.3.36	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.4. Пласт-квадрант (плановый или профильный)

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, полуограничен в разрезе и в плане или ограничен в плане и неограничен в разрезе;
- границы: две пересекающиеся под прямым углом прямолинейные полубесконечные, профильные и/или плановые: рис. 4.15;
- фиктивные скважины: три, знаки расходов см. на рис. 4.16, δ и рис. 4.17, δ , ε ;
- понижение: определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта;
- типовые схемы: рис. 4.16 и рис. 4.17.

Рассматривается три варианта граничных условий для планового (рис. 4.16) и два варианта для профильного пласта-квадранта (рис. 4.17):

- вариант 1: две плановые границы обеспеченного питания (условия І рода);
- вариант 2: две плановые непроницаемые границы (условия II рода);
- вариант 3: две плановые границы со смешанными граничными условиями (условия I и II рода);
- вариант 4: плановая граница обеспеченного питания (условие І рода) и профильная непроницаемая граница (условие ІІ рода);
- вариант 5: плановая и профильная непроницаемые границы (условия ІІ рода).

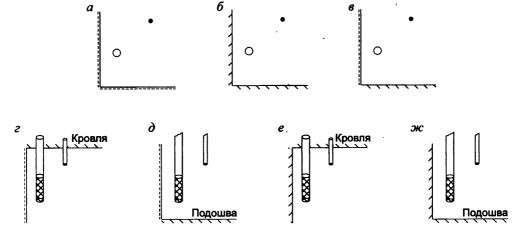


Рис. 4.15. Схематичные планы (a - e) и разрезы (z - ж).

a, 6, s – плановые границы: обеспеченного питания (a), непроницаемые (b) и смешанные (s); z, ∂ – разрезы с плановой границей обеспеченного питания; e, ∞ – разрезы с плановой непроницаемая границей.

Определение горизонтальных расстояний до фиктивных скважин

1. Плановое расположение пласта-квадранта:

$$\rho_1 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' - L_p')^2} , \qquad (4.4.1)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} , \qquad (4.4.2)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} \ . \tag{4.4.3}$$

- 2. Профильное расположение пласта-квадранта:
 - расстояние до фиктивной скважины, отраженной от плановой границы, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_1 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_{Tw} - L_{Tp})^2} , \qquad (4.4.4)$$

$$\rho_1 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_{Bw} - L_{Bp})^2} ; (4.4.5)$$

 расстояние до фиктивной скважины, отраженной соответственно от кровли или от подошвы водоносного пласта,

$$\rho_2 = r \; ; \tag{4.4.6}$$

 расстояние до фиктивной скважины, отраженной от фиктивных скважин, соответственно при наличии кровли или подошвы водоносного пласта

$$\rho_3 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_{Tw} + L_{Tp})^2}, \qquad (4.4.7)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_{Bw} + L_{Bp})^2} . \tag{4.4.8}$$

Список решений:

- понижение в пьезометре для нестационарного периода: уравнения (4.4.9) и (4.4.10).

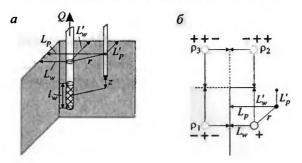


Рис. 4.16. Типовая схема линейного источника в плановом пласте-квадранте. a — трехмерное представление; δ — план с фиктивными скважинами (рядом с фиктивными скважинами показаны горизонтальные расстояния от них до точки наблюдения; три знака расхода: первый — для границ I рода, второй — для границ II рода и третий — для границ I и II рода).

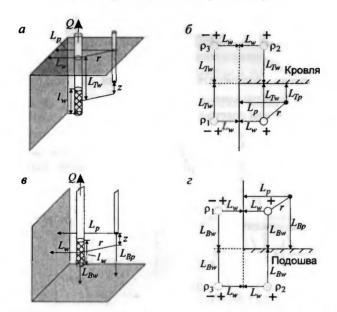


Рис. 4.17. Типовая схема линейного источника в профильном пласте-квадранте. а, в – трехмерное представление; б, г – разрез с фиктивными скважинами (рядом с фиктивными скважинами показаны горизонтальные расстояния от них до точки наблюдения; два знака расхода: первый – для плановой границы II рода).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в пьезометре:

для планового расположения пласта-квадранта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{line}(l_w, r, z, t) + \sum_{j=1}^{3} n_j f_{line}(l_w, \rho_j, z, t) \right]; \tag{4.4.9}$$

для профильного расположения пласта-квадранта

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[f_{line}(l_w, r, z, t) \pm f_{line}(l_w, \rho_1, z, t) + f_{line}(l_w, r, B_w + B_p, t) \pm f_{line}(l_w, \rho_3, B_w + B_p, t) \right], \tag{4.4.10}$$

где знак «+» для плановой границы II рода, знак «-» для плановой границы I рода.

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

 $Tаблица\ 4.4.1$ Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной	Коэффициент	Пьезопроводность,
	кривой	фильтрации, м/сут	м ² /сут
$\lg s - \lg t$	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Значения вспомогательной функции $M'(u,\beta)$ в зависимости от положения пласта-квадранта и граничных условий:

- для планового расположения пласта-квадранта

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{3} n_{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right)\right] \end{cases};$$

для профильного расположения пласта-квадранта

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\right) \pm \\ \pm \left[M\left(ur_1',\frac{0.5l_w + z}{\rho_1}\right) + M\left(ur_1',\frac{0.5l_w - z}{\rho_1}\right)\right] + \\ + \left[M\left(u,\frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r}\right)\right] \pm \\ \pm \left[M\left(ur_3',\frac{0.5l_w + B_w + B_p}{\rho_3}\right) + M\left(ur_3',\frac{0.5l_w - B_w - B_p}{\rho_3}\right)\right] \end{cases};$$

$$r_i' = \rho_i/r$$
.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{4.4.11}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы; f — выражение в квадратных скобках уравнений (4.4.9) и (4.4.10) для первого (f_1) и второго (f_2) пьезометров.

Подбор параметров

Таблица 4.4.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.4.9, 4.4.10	k, a	$s-\lg t$
4.4.11	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.5. U-образный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, профильно-анизотропный, ограничен в разрезе или в плане и соответственно полуограничен в плане или в разрезе;
- границы: две параллельные полубесконечные прямолинейные и одна ограниченная прямолинейная, перпендикулярная к параллельным; если параллельные границы располагаются в разрезе, то принимается полуограниченность пласта в плане и, наоборот, если параллельные границы расположены в плане, то в разрезе водоносный пласт полуограничен;
- фиктивные скважины: два ряда бесконечных скважин, знаки расходов см. в разделе 2.4 для соответствующих граничных условий (рис. 2.22 – 2.24);
- понижение определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта;
- типовые схемы: рис. 4.19.

Рассматривается четырнадцать вариантов расположения границ и граничных условий:

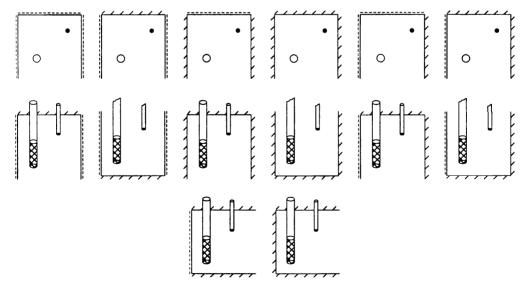


Рис. 4.18. Схемы возможных положений и граничных условий U-образного пласта. Верхний ряд: плановые рисунки для U-образных пластов, неограниченных в разрезе и ограниченных в плане; средний ряд: разрезы для полуограниченных в разрезе и ограниченных в плане U-образных пластов; нижний ряд: разрезы для ограниченных в разрезе и полуограниченных в плане U-образных пластов.

- 1) шесть вариантов планового расположения граничных условий (пласт неограничен в разрезе) (рис. 4.18, верхний ряд):
 - вариант 1: параллельные границы I рода, перпендикулярная граница I рода,
 - вариант 2: параллельные границы I рода, перпендикулярная граница II рода,
 - вариант 3: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница I рода,
 - вариант 4: параллельные границы II рода, перпендикулярная граница II рода,
 - вариант 5: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница I рода,
 - вариант 6: параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница II рода;
- 2) шесть вариантов ограниченного по простиранию пласта (непроницаемая профильная граница расположена в кровле или подошве пласта пласт полуограничен в разрезе) (рис. 4.18, средний ряд):
 - вариант 7: плановые границы І рода, пласт ограничен кровлей,
 - вариант 8: плановые границы І рода, пласт ограничен подошвой,
 - вариант 9: плановые границы II рода, пласт ограничен кровлей,
 - вариант 10: плановые границы ІІ рода, пласт ограничен подошвой,
 - вариант 11: плановые границы I и II рода, пласт ограничен кровлей,
- вариант 12: плановые границы I и II рода, пласт ограничен подошвой;
- 3) два варианта полуограниченного по простиранию пласта (непроницаемые профильные границы пласт ограничен в разрезе) (рис. 4.18, нижний ряд):
 - вариант 13: плановая граница І рода,
 - вариант 14: плановая граница II рода.

Определение расстояний до фиктивных скважин

- . Ограниченный в разрезе водоносный пласт (см. рис. 4.20, г):
 - вертикальные расстояния для первого ряда скважин

$$z_1^j = L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Tw} , \qquad (4.5.1)$$

$$z_2^j = L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw} ; \qquad (4.5.2)$$

для второго ряда скважин:
 горизонтальное расстояние

$$\rho_U = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2} = \sqrt{4L_w L_p + r^2},$$
(4.5.3)

вертикальные расстояния

$$z_{U1}^{j} = z_{1}^{j} = L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{Bw} + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{Tw} , \qquad (4.5.4)$$

$$z_{U2}^{j} = z_{2}^{j} = L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{i_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{i_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{Bw} . \tag{4.5.5}$$

- 2. Полуограниченный в разрезе водоносный пласт (рис. 4.20, a, δ):
 - горизонтальные расстояния для первого ряда скважин

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2(L - L_w) + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 - \left(L_w - L_p\right)^2 + r^2} , \tag{4.5.6}$$

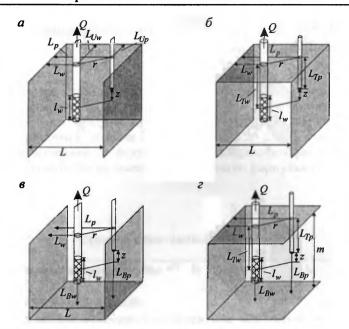


Рис. 4.19. Трехмерное представление линейного источника в U-образном пласте.

а – пласт неограничен в разрезе и полуограничен в плане; б – пласт полуограничен в разрезе (граница – кровля) и ограничен в плане; в – пласт полуограничен в разрезе (граница – подошва) и ограничен в плане; г – пласт ограничен в разрезе и полуограничен в плане.

$$\rho_2^j = \sqrt{2L - (L_p + L_w) + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2(L - L_w)^2 - (L_w - L_p)^2 + r^2}; \qquad (4.5.7)$$

горизонтальные расстояния для второго ряда скважин

$$\rho_{U1}^{J} = \rho_{1}^{J} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w}\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2}},$$
 (4.5.8)

$$\rho_{U2}^{j} = \rho_{2}^{j} = \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0} = 2, 4, \dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0} = 3, 5, \dots}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2} + r^{2}} . \quad (4.5.9)$$

- 3. Неограниченный в разрезе водоносный пласт (рис. 4.20, в):
 - горизонтальные расстояния для первого ряда скважин

$$\rho_1^J = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2(L - L_w) + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^2},$$
 (4.5.10)

$$\rho_2^J = \sqrt{2L - (L_p + L_w) + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2(L - L_w)^2 + (L_{Uw} - L_{Up})^2}; \qquad (4.5.11)$$

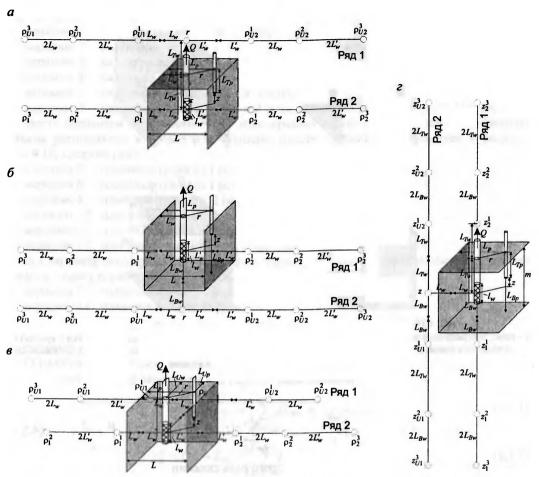


Рис. 4.20. Трехмерное представление линейного источника в U-образном пласте с горизонтальными или вертикальными расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин (показаны рядом с фиктивными скважинами).

a, b – пласт полуограничен в разрезе; b – пласт неограничен в разрезе; c – пласт ограничен в разрезе.

горизонтальные расстояния для второго ряда скважин

$$\rho_U = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_{Uw} + L_{Up})^2}, \qquad (4.5.12)$$

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2(L - L_{w}) + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w}\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}},$$
 (4.5.13)

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}} . \tag{4.5.14}$$

Список решений:

понижение для нестационарного периода: уравнения (4.5.15) – (4.5.21).

Замечание

Решения даются в зависимости от профильных границ и типа граничных условий на параллельных границах. Тип граничного условия на перпендикулярной границе определяется знаком «±» между специальными функциями: «+» для граничного условия II рода и «-» для граничного условия I рода (см. рис. 3.20 для точечного источника в U-образном пласте). Расстояния до фиктивных скважин рассчитываются в зависимости от профильного или планового расположения этих границ по формулам (4.5.1) – (4.5.14).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Ограниченный в разрезе водоносный пласт (см. рис. 4.20, г):

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, r, z_{i}^{j}, t) \end{bmatrix} \pm \\ f_{line}(l_{w}, \rho_{U}, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{U}, z_{i}^{j}, t) \right\},$$
(4.5.15)

где знак «+» для перпендикулярной границы II рода, знак «-» для перпендикулярной границы I рода.

- 2. Полуограниченный в разрезе водоносный пласт (рис. 4.20, a, δ):
 - для параллельных границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \right] + \left[f_{line}(l_{w}, r, B_{w} + B_{p}, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, B_{w} + B_{p}, t) \right] \right\}, \quad (4.5.16)$$

для параллельных границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) + \int_{j=1}^{n} \int_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, B_{w} + B_{p}, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, B_{w} + B_{p}, t) \right\},$$
(4.5.17)

для параллельных границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) + \\ + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) + \\ + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, B_{w} + B_{p}, t) + \\ + \sum_{j=2,4,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, B_{w} + B_{p}, t) \end{cases}$$

$$(4.5.18)$$

- 3. Неограниченный в разрезе водоносный пласт (рис. 4.20, в):
 - для параллельных границ I рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \\ \pm \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{U}, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{U_{i}}^{j}, z, t) \right] \right\},$$

$$(4.5.19)$$

для параллельных границ II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \\ \pm \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{U}, z, t) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{U_{i}}^{j}, z, t) \right] \right\},$$

$$(4.5.20)$$

для параллельных границ I и II рода

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) + \\ + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{i}^{j}, z, t) \\ \pm \begin{cases} f_{line}(l_{w}, \rho_{U}, z, t) + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} f_{line}(l_{w}, \rho_{U_{i}}^{j}, z, t) + \\ + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} f_{line}(l_{w}, \rho_{U_{i}}^{j}, z, t) \end{cases}$$

$$(4.5.21)$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.5.1 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м²/сут
$\lg s - \lg t$	$\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Значения вспомогательной функции $M'(u,\beta)$ в зависимости от положения U-образного пласта и граничных условий:

1) ограниченный в разрезе водоносный пласт:

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(u, \frac{0.5l_{w} + z_{i}^{j}}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - z_{i}^{j}}{r}\right)\right] \right]^{\pm} \\ \frac{M\left(ur_{U}^{i}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{U}}\right) + M\left(ur_{U}^{i}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{U}}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{U}^{i}, \frac{0.5l_{w} + z_{i}^{j}}{\rho_{U}}\right) + M\left(ur_{U}^{i}, \frac{0.5l_{w} - z_{i}^{j}}{\rho_{U}}\right)\right] \end{cases}$$

- 2) полуограниченный в разрезе водоносный пласт:
 - для параллельных границ I рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \left(M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{l=1}^{2} \left[M\left(ur_i^{i,j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{i,j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^j}\right) \right] \right)^{+} \\ + \left(M\left(u, \frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i^{i,j}, \frac{0.5l_w + B_w + B_p}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{i,j}, \frac{0.5l_w - B_w - B_p}{\rho_i^j}\right) \right] \right) \end{cases}$$

для параллельных границ II рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{i}^{i,j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{i,j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] \right] + \\ + \left(M\left(u, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{i}^{i,j}, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{i,j}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] \right] \end{cases}$$

- для параллельных границ I и II рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w - z}{\rho_i^j}\right)\right] + \\ + \sum_{j=2,4,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w - B_p}{\rho_i^j}\right)\right] \end{cases}$$

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w + B_w + B_p}{\rho_i^j}\right) + \\ + M\left(ur_i^{i,j},\frac{0.5l_w - B_w - -$$

- 3) неограниченный в разрезе водоносный пласт:
 - для параллельных границ I рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \left(M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i^{\prime j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^j}\right) \right] \right)^{\frac{1}{2}} \\ \left\{ M\left(ur_U^{\prime}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_U}\right) + M\left(ur_U^{\prime}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_U}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_U^{\prime j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_{li}^j}\right) + M\left(ur_{li}^{\prime j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_{li}^j}\right) \right] \right\} \end{cases}$$

для параллельных границ II рода

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \left[M\left(u, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{i}^{\prime j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{\prime j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{i}^{j}}\right) \right] \right]^{\pm} \\ \left\{ M\left(ur_{U}^{\prime}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{U}}\right) + M\left(ur_{U}^{\prime}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{U}}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_{U}^{\prime j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{U}^{j}}\right) + M\left(ur_{U}^{\prime j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{U}^{j}}\right) \right] \right] \end{cases}$$

- для параллельных границ I и II рода:

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_{w}+z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_{w}-z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] \\ + \left(M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}}\right) + M\left(ur_{i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i,i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i}^{j}}\right)\right] + \\ + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[M\left(ur_{i,i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i,i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i,i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i,i}^{j}}\right)\right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur_{i,i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}+z}{\rho_{i,i}^{j}}\right) + M\left(ur_{i,i}^{i,j},\frac{0.5l_{w}-z}{\rho_{i,i}^{j}}\right)\right] \end{cases}$$

 $r_i^{'j} = \rho_i^j / r$, $r_U^{'} = \rho_U / r$, $r_{Ui}^{'j} = \rho_{Ui}^j / r$.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{4.5.22}$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы; f — выражение в фигурных скобках уравнений (4.5.15) — (4.5.21) для первого (f_1) и второго (f_2) пьезометров.

Подбор параметров

Таблица 4.5.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.5.15 – 4.5.21	k, a	$s - \lg t$
4.5.22	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.6. Угловой пласт

Схема проведения опыта:

- см. описание точечного источника в угловом пласте в разделе 3.6;
- понижение в пьезометре в любой точке водоносного пласта;
- типовые схемы: рис. 4.21.

Рассматривается три варианта:

- вариант 1: неограниченный в разрезе пласт;
- вариант 2: полуограниченный в разрезе пласт;
- вариант 3: ограниченный в разрезе пласт.

Для каждого варианта даны решения для плановых границ (см. рис. 3.21): границ обеспеченного питания (условия I рода), непроницаемых (условия II рода) и смешанных (условия I и II рода).

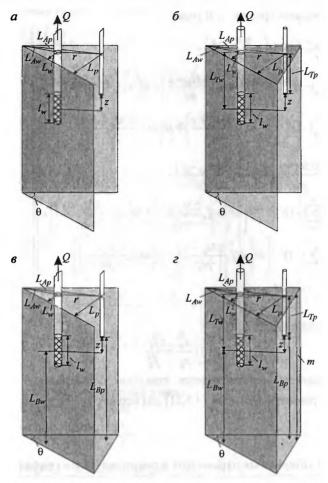


Рис. 4.21. Трехмерное представление линейного источника в угловом пласте. a – неограниченный в разрезе пласт; δ , g – полуограниченный в разрезе пласт (граница – соответственно кровля и подошва пласта); ε – ограниченный в разрезе пласт.

Определение расстояний до фиктивных скважин и количества отражений

Общее правило для определения числа отражений [Ferris at al., 1962] дает уравнение (3.6.1).

Горизонтальные расстояния от наблюдательной скважины до отраженных от плановых границ фиктивных скважин равно:

$$\rho_j = \sqrt{\left(L_w \cos \theta_j - L_p \cos \theta_p\right)^2 + \left(L_w \sin \theta_j - L_p \sin \theta_p\right)^2} , \qquad (4.6.1)$$

$$\theta_j = \theta_w + 2 \sum_{j_0=1,3,...}^{j} (\theta - \theta_w) + 2 \sum_{j_0=2,4,...}^{j} \theta_w$$
 (4.6.2)

Горизонтальные расстояния до фиктивных скважин, отраженных от отражения плановых границ, такие же: уравнения (4.6.1) и (4.6.2).

Для полуограниченного в разрезе пласта вертикальное расстояние до фиктивных скважин, отраженных от профильной границы, равно $B_w + B_p$.

Для ограниченного в разрезе пласта вертикальное расстояние до фиктивных скважин, отраженных от кровли пласта:

$$z_1^{j'} = L_{Tp} + L_{Tw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j'} 2L_{Bw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j'} 2L_{Tw}$$
(4.6.3)

и от подошвы водоносного пласта,

$$z_2^{j'} = L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j'} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j'} 2L_{Bw}.$$
 (4.6.4)

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение для плановых границ II рода: уравнения (4.6.5) (4.6.7);
- понижение для плановых границ I рода: уравнения (4.6.8) (4.6.10);
- понижение для плановых границ I и II рода: уравнения (4.6.11) (4.6.13).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

- 1. Плановые границы II рода:
 - неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \right\};$$
 (4.6.5)

полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \right] + \left[f_{line}(l_{w}, r, B_{w} + B_{p}, t) + \sum_{j=1}^{n} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, B_{w} + B_{p}, t) \right] \right\};$$
(4.6.6)

ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \begin{cases} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \\ + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[f_{line}(l_{w}, r, z_{i}^{j'}, t) + \sum_{j=1}^{n} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z_{i}^{j'}, t) \right] \right\}.$$

$$(4.6.7)$$

2. Плановые границы I рода:

неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \right\}; \tag{4.6.8}$$

полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \left[f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \right] + \left[f_{line}(l_{w}, r, B_{w} + B_{p}, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, B_{w} + B_{p}, t) \right] \right\};$$
(4.6.9)

ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \begin{bmatrix} f_{line}(l_{w}, r, z, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) \\ + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \left[f_{line}(l_{w}, r, z_{i}^{j'}, t) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z_{i}^{j'}, t) \right] \right\}.$$
(4.6.10)

3. Плановые границы I и II рода:

неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_w} \sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left[f_{line}(l_w, \rho_j, z, t) + f_{line}(l_w, \rho_{j+1}, z, t) \right]; \tag{4.6.11}$$

полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) + f_{line}(l_{w}, \rho_{j+1}, z, t) \right] + \left. + \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, B_{w} + B_{p}, t) + f_{line}(l_{w}, \rho_{j+1}, B_{w} + B_{p}, t) \right] \right\}; (4.6.12)$$

ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left\{ \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z, t) + f_{line}(l_{w}, \rho_{j+1}, z, t) \right] + + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[f_{line}(l_{w}, \rho_{j}, z_{i}^{j'}, t) + f_{line}(l_{w}, \rho_{j+1}, z_{i}^{j'}, t) \right] \right\}.$$
(4.6.13)

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 4.6.1

 Расчетные формулы для определения параметров изотропного пласта

 График фактической кривой
 График эталонной фильтрации, м/сут
 Пьезопроводность, м²/сут

 $\lg s - \lg t$ $\lg M'(u, \beta) - \lg \frac{1}{u}$ $k = \frac{Q}{4\pi l_w \cdot 10^D}$ $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. Значения вспомогательной функции $M'(u,\beta)$ в зависимости от наличия профильных границ углового пласта и типа граничных условий:

1) плановые границы II рода:

неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \sum_{j=0}^{n} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right],$$

- полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right] + \\ + \sum_{j=0}^{n} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{\rho_{j}}\right) \right] \end{cases},$$

- ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right] + \\ + \sum_{j=1}^{n'} \sum_{l=1}^{2} \sum_{j=0}^{n} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z'_{l}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z'_{l}}{\rho_{j}}\right) \right] \end{cases};$$

2) плановые границы І рода:

неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right],$$

полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right] + \\ + \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{\rho_{j}}\right) \right] \end{cases}$$

- ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right] + \\ + \sum_{j'=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z'_{i}^{j'}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z'_{i}^{j'}}{\rho_{j}}\right) \right] \end{cases};$$

3) плановые границы I и II рода:

неограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j+1}}\right) \right],$$

- полуограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j}}\right) \right] + \\ + \sum_{j=0}^{n} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{\rho_{j}}\right) \right] \end{cases},$$

- ограниченный в разрезе водоносный пласт

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho_{j+1}}\right) \right] + \\ + \sum_{j=1}^{n'} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=0,2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \left[M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} + z'_{i}}{\rho_{j}}\right) + M\left(ur'_{j}, \frac{0.5l_{w} - z'_{i}}{\rho_{j+1}}\right) \right] \end{cases};$$

$$r'_{i} = \rho_{i}/r \; ; \; r'_{0} = \rho_{0}/r = r/r = 1 \; .$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,, \tag{4.6.14}$$

подбор пьезопроводности a осуществляется способом биссектрисы; f — выражение в фигурных скобках уравнений (4.6.5) — (4.6.13) для первого (f_1) и второго (f_2) пьезометров.

Подбор параметров

Таблица 4.6.2 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

	<u> </u>	* *
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
4.6.5 – 4.6.13	k, a	$s - \lg t$
4.6.14	а	$s_1/s_2 - \lg t$

4.7. Наклонный линейный источник

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный;
- граница: пласт неограничен в разрезе и в плане (рис. 4.22, *a*) или полуограничен в разрезе границей обеспеченного питания и неограничен в плане (рис. 4.22, *b*);
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия, находится под наклоном к горизонтальной поверхности; для полуограниченного в разрезе пласта скважина находится под поверхностью воды;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

Литература: Полубаринова-Кочина, 1956, 1977; Пыхачев, Исаев, 1973.

Определение расстояний

Длина нижней и верхней части фильтра опытной скважины

$$l_1 = \sqrt{\rho_1^2 - \rho^2} \,, \tag{4.7.1}$$

$$l_2 = \sqrt{\rho_2^2 - \rho^2} \,. \tag{4.7.2}$$

Список решений (для стационарного периода):

- понижение для неограниченного пласта: уравнение (4.7.3);
- понижение для полуограниченного в разрезе пласта: уравнение (4.7.4).

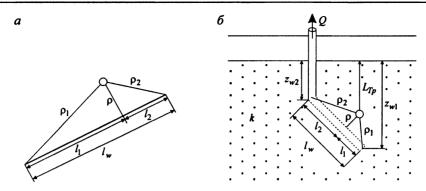


Рис. 4.22. Наклонная опытная скважина в водоносном пласте. a – пласт неограничен в разрезе и в плане; b – полуограничен в разрезе и неограничен в плане.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение для периода стационара

1. Неограниченный в разрезе пласт (см. рис. 4.22, а):

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \ln \frac{\left(\rho_{1} + l_{1}\right)\left(\rho_{2} + l_{2}\right)}{\rho^{2}},$$
(4.7.3)

где ρ_1, ρ_2 — расстояния от точки наблюдения до нижней и верхней части опытной скважины, м.

2. Полуограниченный в разрезе пласт, наклонная скважина находится под поверхностью воды (рис. 4.22, δ):

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k l_w} \ln \frac{(\rho_1 - l_1)(\rho_2' + l_2')}{(\rho_2 + l_2)(\rho_1' - l_1')},$$
(4.7.4)

где

 ρ_1', ρ_2' – расстояния от точки наблюдения до отраженной скважины, м;

 l_1', l_2' — длина нижней и верхней части фильтра фиктивной скважины, отраженной от границы обеспеченного питания, м.

Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в неограниченном пласте:

$$k = \frac{Q}{4\pi l_w s_m} \ln \frac{(\rho_1 + l_1)(\rho_2 + l_2)}{\rho^2}$$
 (4.7.5)

и в полуограниченном в разрезе пласте:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_{1.5}} \ln \frac{(\rho_1 - l_1)(\rho_2' + l_2')}{(\rho_2 + l_2)(\rho_2' - l_2')}.$$
 (4.7.6)

РАЗДЕЛ 5. ПЛАНОВО-НЕОДНОРОДНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ

Водоносный пласт состоит из двух или более зон неоднородностей с разными фильтрационными свойствами, примыкающих друг к другу в плане. Мощность водоносного пласта постоянная и не меняется в пространстве. Опытная и наблюдательная скважины совершенны по степени вскрытия.

5.1. Линейная граница раздела: две зоны неоднородности

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, состоит из двух полуограниченных в плане зон неоднородностей с общей прямолинейной границей;
- опытная скважина: находится в основной зоне неоднородности;
- наблюдательная скважина: находится в основной или смежной зоне;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 5.1.

<u>Литература:</u> Бан и др., 1962; Максимов, 1962; Бочевер и др., 1969; Техника проведения..., 1969; Бабушкин и др., 1974; Проектирование водозаборов..., 1976; Полубаринова-Кочина, 1977; Мироненко, Шестаков, 1978; Fenske, 1984.

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

 a_1, a_2 – пьезопроводности основной и смежной зон, м²/сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

erfc и - дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 L_p – расстояние от наблюдательной скважины до границы раздела двух зон, м;

 $L_{p,1}, L_{p,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в основной или смежной зоне, до границы, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы раздела двух зон, м;

O – расход опытной скважины, $M^3/\text{сут}$;

R — радиус влияния откачки, м;

r — расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, находящейся в основной или смежной зоне, м;

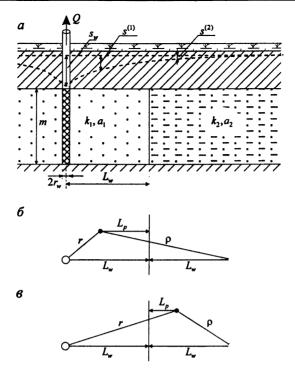


Рис. 5.1. Типовая схема планово-неоднородного пласта с двумя зонами неоднородности. a – разрез; δ – план, наблюдательная скважина находится в основной зоне; s – план, наблюдательная скважина находится в смежной зоне.

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в основной или смежной зоне, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

 $s^{(1)}, s^{(2)}$ — понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в основной и смежной зонах, м;

 $s_m^{(1)}$, $s_m^{(2)}$ — понижения на период стационара в наблюдательных скважинах, находящихся в основной и смежной зонах, м;

 $s_{m,1}^{(1)}, s_{m,2}^{(1)}$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся в основной зоне, м;

 $s_{m,1}^{(2)}, s_{m,2}^{(2)}$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся в смежной зоне, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 T_1 , T_2 – проводимости основной и смежной зоны, м²/сут;

 $\overline{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ — средняя проводимость основной и смежной зон, м²/сут;

время от начала откачки, сут;

и – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

- δ_1 функция для основной зоны, зависящая от координат точки наблюдения и от времени: определяется уравнением (5.1.4);
- $\delta_{1\infty}$ постоянная величина, которая зависит от фильтрационных свойств водоносного пласта: определяется уравнением (5.1.5);
- δ_2 функция для смежной зоны, зависящая от координат точки наблюдения и от времени: определяется уравнением (5.1.7);
- $\delta_{2\infty}$ постоянная величина, которая зависит от фильтрационных свойств водоносного пласта: определяется уравнением (5.1.8);
- ε вспомогательный безразмерный параметр: определяется уравнением (5.1.12);
- ρ расстояние от наблюдательной скважины, находящейся в основной или смежной зоне, до фиктивной скважины: определяется соответственно уравнением (5.1.1) или (5.1.2), м;
- ρ_1, ρ_2 расстояния от фиктивной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в основной или смежной зоне, м;
- ω вспомогательный безразмерный параметр: определяется уравнением (5.1.11).

Определение расстояния до фиктивной скважины

Расстояние от наблюдательной скважины до отраженной от границы (фиктивной) скважины рассчитывается в зависимости от положения наблюдательной скважины по следующим зависимостям:

для наблюдательной скважины, находящейся в основной зоне,

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \,\,\,\,(5.1.1)$$

для наблюдательной скважины, находящейся в смежной зоне,

$$\rho = \sqrt{r^2 - 4L_w L_p} \ . \tag{5.1.2}$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода в основной и смежной зонах (решения Максимова): уравнения (5.1.3) и (5.1.6);
- понижение для нестационарного периода в основной и смежной зонах (решения Fenske): уравнения (5.1.9) и (5.1.10);
- понижение для квазистационарного периода в основной и смежной зоне: уравнения (5.1.13), (5.1.14), (5.1.16) и (5.1.17);
- понижение для периода стационара в основной и смежной зонах: уравнения (5.1.18) и (5.1.19);
- понижение для периода стационара в опытной скважине: уравнение (5.1.20).

Замечание

Точная аналитическая зависимость выведена В.А. Максимовым [1962] применительно к откачке упругой жидкости в неоднородной среде. Решение дано автором в давлениях и с учетом вязкости воды. Альтернативным и относительно более простым с точки зрения математической записи и отсутствия ограничений в выборе параметров водоносного пласта является аналитическое решение P.R. Fenske [1984].

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

- 1. Решение Максимова [1962]:
 - понижение в основной зоне

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[W \left(\frac{r^2}{4a_1 t} \right) + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} W \left(\frac{\rho^2}{4a_1 t} \right) - \delta_1 \right], \tag{5.1.3}$$

$$\delta_{1} \approx \delta_{1\infty} \left[\exp\left(-\frac{\rho^{2}}{4a_{1}t}\right) - \frac{\sqrt{\pi \left(L_{w} + L_{p}\right)}}{2\sqrt{a_{1}t}} \exp\left(-\frac{r^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2}}{4a_{1}t}\right) \operatorname{erfc}\frac{L_{w} + L_{p}}{2\sqrt{a_{1}t}} \right], \quad (5.1.4)$$

$$\delta_{1\infty} = \begin{cases} \frac{2T_{1}T_{2}}{T_{1}^{2} - T_{2}^{2}} \left[\ln \frac{a_{2}}{a_{1}} + 4T_{1} \sqrt{\frac{a_{1} - a_{2}}{T_{1}^{2} a_{2} - T_{2}^{2} a_{1}}} \times \right. \\ \times \arctan \sqrt{\frac{(\sqrt{a_{1}} - \sqrt{a_{2}})(T_{1} \sqrt{a_{2}} - T_{2} \sqrt{a_{1}})}{(\sqrt{a_{1}} + \sqrt{a_{2}})(T_{1} \sqrt{a_{2}} + T_{2} \sqrt{a_{1}})}} \right] \rightarrow T_{1} \neq T_{2} \\ \frac{a_{1}}{a_{2} - a_{1}} \ln \frac{a_{1}}{a_{2}} + 1 \rightarrow T_{1} = T_{2} , \end{cases}$$

$$(5.1.5)$$

с течением времени $t > \frac{2500 \rho^2}{a_1}$ уравнение (5.1.4) стремится к постоянной

величине $\delta_{\rm l} = \delta_{\rm l\infty}$;

понижение в смежной зоне

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} \left[\frac{2T_2}{T_1 + T_2} W \left(\frac{r^2}{4a_2 t} \right) - \delta_2 \right], \tag{5.1.6}$$

$$\delta_2 \approx \delta_{2\infty} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{4a_2t}\right) - \frac{\sqrt{\pi} \left(L_w - L_p\right)}{2\sqrt{a_2t}} \exp\left(-\frac{r^2 - \left(L_w - L_p\right)^2}{4a_2t}\right) \operatorname{erfc} \frac{L_w - L_p}{2\sqrt{a_2t}} \right], \quad (5.1.7)$$

$$\delta_{2\infty} = \frac{T_2}{T_1} \delta_{1\infty} - \frac{2T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{a_1}{a_2}.$$
 (5.1.8)

2. Решение Fenske [1984]:

- понижение в основной зоне

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[W \left(\frac{r^2}{4a_1 t} \right) + \frac{\varepsilon T_1 - \omega T_2}{\varepsilon T_1 + \omega T_2} W \left(\frac{\rho^2}{4a_1 t} \right) \right]; \tag{5.1.9}$$

понижение в смежной зоне

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} \frac{2\varepsilon\omega T_2}{\varepsilon T_1 + \omega T_2} W\left(\frac{r^2}{4a_2t}\right),\tag{5.1.10}$$

$$\omega = \frac{W\left(\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2}{4a_1 t}\right)}{W\left(\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2}{4a_2 t}\right)},$$
(5.1.11)

$$\varepsilon = \frac{\exp\left(-\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2}{4a_1 t}\right)}{\exp\left(-\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2}{4a_2 t}\right)}.$$
 (5.1.12)

Замечание

Главный недостаток решения Максимова в том, что при многочисленных сочетаниях фильтрационных параметров оно имеет ряд численных ограничений (деление на ноль, отрицательный корень), что является существенным при подборе параметров. К тому же данное решение дает достаточную точность при значениях функций δ_1 и δ_2 , близких к их предельным величинам $\delta_{1\infty}$ и $\delta_{2\infty}$, и может быть неприменимо при больших расстояниях до точки возмущения или при одинаковом порядке значений δ и остальных слагаемых. Это ограничение сложно контролировать, и поэтому использование описанных выше выражений требует большой осторожности в применении и постоянного сравнения результатов с более простыми решениями или с численным моделированием.

Уравнения для квазистационарного периода

На основе уравнений (5.1.3) и (5.1.6) и утверждения о том, что на большие моменты времени δ_1 и δ_2 приблизительно равны соответственно $\delta_{l\infty}$ и $\delta_{2\infty}$, решение для периода квазистационарной фильтрации записывается в следующем виде [Максимов, 1962]:

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi \overline{T}} \left(\ln \frac{2.25a_1 t}{r\rho} + \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{\rho}{r} - \frac{\overline{T}}{T_1} \delta_{1\infty} \right), \tag{5.1.13}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi \overline{T}} \left(\ln \frac{2.25a_2t}{r^2} - \frac{\overline{T}}{T_2} \delta_{2\infty} \right), \tag{5.1.14}$$

$$\overline{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \,. \tag{5.1.15}$$

Частный случай для квазистационарного периода

Зависимости для приближенной оценки притока воды к скважине сделаны на основе логарифмической аппроксимации уравнений (5.1.3) и (5.1.6) и пренебрежении последними слагаемыми [Бочевер и др., 1969]. Понижение в основной и смежной зонах

$$s^{(1)} \approx \frac{Q}{4\pi T_1} \left(\ln \frac{2.25a_1t}{r^2} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{2.25a_1t}{\rho^2} \right), \tag{5.1.16}$$

$$s^{(2)} \approx \frac{Q}{4\pi \overline{T}} \ln \frac{2.25a_2t}{r^2}$$
 (5.1.17)

Уравнения для периода стационара

Понижение в основной и смежной зонах [Максимов, 1962; Бабушкин и др., 1974]

$$s_m^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_1} \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{R}{\rho} \right), \tag{5.1.18}$$

$$s_m^{(2)} = \frac{Q}{2\pi \overline{T}} \ln \frac{R}{r} \,, \tag{5.1.19}$$

где R – радиус влияния откачки, м.

Частный случай для стационарного периода

Понижение в опытной скважине [Полубаринова-Кочина, 1977]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T_1} \left(\ln \frac{R}{r_w} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{R}{2L_w} \right). \tag{5.1.20}$$

Замечание

Уравнения (5.1.18) – (5.1.20) не являются строго стационарными решениями, так как в них входит величина радиуса влияния откачки R .

***** Способы обработки откачки

Способ прямой линии

Таблица 5.1.1 Расчетные формулы для определения параметров по набору одиночных замеров

Зона неоднородности	График	Проводимость, м ² /сут	Обобщенный параметр
Основная	$\left(s_{m,1}^{(1)} - s_{m,2}^{(1)}\right) - \ln \frac{r_2}{r_1}$	$T_1 = \frac{Q}{2\pi C}$	$\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = \frac{A}{C} \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$
Смежная	$\left(s_{m,1}^{(2)} - s_{m,2}^{(2)}\right) - \ln \frac{r_2}{r_1}$	$\overline{T} = \frac{Q}{2\pi C}$	-

Учитывая, что в уравнениях (5.1.13) и (5.1.14) последними слагаемыми в круглых скобках можно пренебречь ввиду их малой величины (в этом случае определение пьезопроводности будет несколько завышено), по аналогии с квазистационарным режимом неограниченного напорного пласта (см. раздел 2.1) получаем удобные графоаналитические зависимости для определения параметров изучаемого пласта. Определения проводят по последнему прямолинейному участку типовой кривой, угол наклона которого отвечает осредненной проводимости двух полуограниченных зон неоднородности \overline{T} .

Таблица 5.1.2 Расчетная формула для определения параметров по основной зоне неоднородности

Способ обработки	График	Средняя проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$

Таблица 5.1.3 Расчетные формулы для определения параметров по смежной зоне неоднородности

Способ обработки	График	Средняя проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s - \lg t$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$	$a_2 = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s - \lg r$	$\overline{T} = \frac{0.366Q}{C}$	$a_2 = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s-\lg\frac{t}{r^2}$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$	$a_2 = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Точечные способы

1. Определение подбором проводимости основной зоны T_1 по понижению на период стационара в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне, при известной проводимости смежной зоны:

$$T_{1} = \frac{Q}{2\pi s_{m}^{(1)}} \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{T_{1} - T_{2}}{T_{1} + T_{2}} \ln \frac{R}{\rho} \right)$$
 (5.1.21)

или по понижению на период стационара в опытной скважине:

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \left(\ln \frac{R}{r_w} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{R}{2L_w} \right). \tag{5.1.22}$$

2. Определение средней проводимости \overline{T} по понижению на период стационара в смежной зоне:

$$\overline{T} = \frac{Q}{2\pi S_m^{(2)}} \ln \frac{R}{r} \,. \tag{5.1.23}$$

- 3. Способ разности понижений (по понижениям на период стационара):
 - по двум наблюдательным скважинам, находящимся в основной зоне (рис. 5.2, а),

$$s_{m,1}^{(1)} - s_{m,2}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_1} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right), \tag{5.1.24}$$

определение подбором проводимости основной зоны T_1 при известной проводимости смежной зоны:

$$T_{1} = \frac{Q}{2\pi \left(s_{m,1}^{(1)} - s_{m,2}^{(1)}\right)} \left(\ln \frac{r_{2}}{r_{1}} + \frac{T_{1} - T_{2}}{T_{1} + T_{2}} \ln \frac{\rho_{2}}{\rho_{1}}\right); \tag{5.1.25}$$

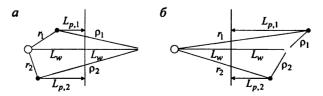


Рис. 5.2. Определение расстояний для двух наблюдательных скважин (план). a – скважины находятся в основной зоне; δ – скважины находятся в смежной зоне.

по двум наблюдательным скважинам, находящимся смежной зоне (рис. 5.2, 6),

$$s_{m,1}^{(2)} - s_{m,2}^{(2)} = \frac{Q}{2\pi \overline{T}} \ln \frac{r_2}{r_1},$$
 (5.1.26)

определение подбором средней проводимости \overline{T} :

$$\overline{T} = \frac{Q}{2\pi \left(s_{m,1}^{(2)} - s_{m,2}^{(2)}\right)} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
(5.1.27)

- 4. Способ разности понижений (по понижениям для квазистационарного периода) (см. рис. 5.2):
 - по двум наблюдательным скважинам, находящимся в основной зоне:

$$s_1^{(1)} - s_2^{(1)} = \frac{Q}{\pi (T_1 + T_2)} \left(\ln \frac{r_2 \rho_2}{r_1 \rho_1} + \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{r_2 \rho_1}{r_1 \rho_2} \right), \tag{5.1.28}$$

определение подбором проводимости основной зоны T_1 при известной проводимости смежной зоны:

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi \left(s_1^{(1)} - s_2^{(1)}\right)} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) - T_2;$$
 (5.1.29)

по двум наблюдательным скважинам, находящимся в смежной зоне:

$$s_1^{(2)} - s_2^{(2)} = \frac{Q}{2\pi \overline{T}} \ln \frac{r_2}{r_1}, \qquad (5.1.30)$$

определение подбором средней проводимости T_0 :

$$\overline{T} = \frac{Q}{2\pi \left(s_1^{(2)} - s_2^{(2)}\right)} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (5.1.31)

Подбор параметров

Таблица 5.1.4

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Горизонт	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
Основной	5.1.3, 5.1.9	T_1, T_2, a_1, a_2	$s - \lg t$
Смежный	5.1.6, 5.1.10	$1_1, 1_2, a_1, a_2$	3 - 1g.

5.2. Линейная граница раздела: три зоны неоднородности

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, состоит из трех плановых зон неоднородности;
- основная зона неоднородности ограничена в плане и находится между двумя полуограниченными в плане зонами, каждая из которых имеет общую прямолинейную границу с основной зоной;
- опытная скважина: находится в основной зоне неоднородности;
- наблюдательная скважина: находится в основной зоне неоднородности;
- понижение определяется в основной зоне неоднородности;
- типовая схема: рис. 5.3.

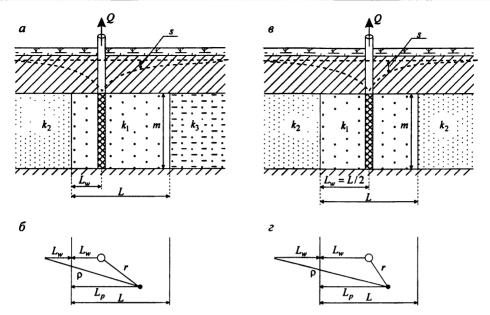


Рис. 5.3. Типовая схема планово-неоднородного (три зоны неоднородности) пласта. а, б – разрез и план для основной зоны неоднородности, окруженной зонами с разными фильтрационными свойствами; в, г – разрез и план для основной зоны неоднородности, окруженной зонами с близкими фильтрационными свойствами.

<u>Литература:</u> Бабушкин и др., 1974.

Условные обозначения:

 k_1 – коэффициент фильтрации основной зоны, м/сут;

 k_2, k_3 — коэффициенты фильтрации смежных зон, м/сут;

L – ширина основной зоны неоднородности, м;

 $L_p\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до границы со второй зоной, м;

 $L_{p,1}$, $L_{p,2}$ — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до границы со второй зоной, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы со второй зоной, м;

т - мощность водоносного пласта, м;

n — номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

R — радиус влияния, м;

r – расстояние от наблюдательной скважины, находящейся в основной зоне, до опытной скважины, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в основной зоне, м;

 s_m — понижение уровня на период стационара в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне неоднородности, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения уровня на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся в основной зоне, м;

- ε обобщенный безразмерный параметр: определяется уравнением (5.2.2);
- ho расстояние от наблюдательной скважины, находящейся в основной зоне, до фиктивной скважины, отраженной от границы между основной зоной и смежной зоной, находящейся слева от основной зоны, м;

 ρ_1, ρ_2 – расстояния от фиктивной скважины, отраженной от границы между основной зоной и смежной зоной (находящейся слева от основной зоны), до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в основной зоне, м.

Список решений:

- понижение в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне: уравнение (5.2.1):
- понижение в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне, при симметричном расположении опытной скважины: уравнение (5.2.3).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение для периода стационара

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi k_{1}m} \begin{bmatrix} \ln\frac{R}{r} + \frac{k_{1} - k_{2}}{k_{1} + k_{2}} \ln\frac{R}{\rho} + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^{n} \ln\sqrt{\frac{r^{2} - (L_{w} - L_{p})^{2} + (2nL - L_{w} + L_{p})^{2}}{L^{2}}} + \\ + \frac{k_{1} + k_{2}}{k_{1} - k_{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^{n} \ln\sqrt{\frac{r^{2} - (L_{w} - L_{p})^{2} + (2nL - L_{w} - L_{p})^{2}}{L^{2}}} - \\ - 2\left(1 + \frac{k_{1}^{2} + k_{2}^{2}}{k_{1}^{2} - k_{2}^{2}}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^{n} \ln\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^{2} + 4n^{2}} \\ \varepsilon = \frac{(k_{1} - k_{2})(k_{1} - k_{3})}{(k_{1} + k_{2})(k_{1} + k_{2})}. \tag{5.2.2}$$

Уравнение (5.2.1) справедливо для следующего условия: $R \ge (2 \div 3)L$.

Частный случай для стационарного периода

Опытная скважина находится в центре основного пласта ($L_w = L/2$), фильтрационные свойства двух смежных зон неоднородности равны ($k_2 = k_3$):

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi k_{1} m} \left\{ \ln \frac{R}{\sqrt{r^{2} - (L_{w} - L_{p})^{2}}} + \left[2 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k_{1} - k_{2}}{k_{1} + k_{2}} \right)^{n} \left(\ln \sqrt{\left(\frac{R}{L} \right)^{2} + 4n^{2}} - \ln \sqrt{\frac{r^{2} - (L_{w} - L_{p})^{2}}{L^{2}} + 4n^{2}} \right) \right] \right\}. (5.2.3)$$

***** Способы обработки откачки

Точечные способы

- 1. Определение подбором коэффициентов фильтрации основной и смежной зон по понижению в наблюдательной скважине основной зоны на основе уравнения (5.2.1) или (5.2.3).
- 2. Способ разности понижений

По двум наблюдательным скважинам основной зоны (рис. 5.4):

$$s_{m,1} - s_{m,2} = \frac{Q}{2\pi k_1 m} \left\{ \begin{cases} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \ln \sqrt{\frac{r_1^2 - (L_w - L_{p,1})^2 + (2nL - L_w - L_{p,1})^2}{r_2^2 - (L_w - L_{p,2})^2 + (2nL - L_w + L_{p,2})^2}} + \\ + \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \ln \sqrt{\frac{r_1^2 - (L_w - L_{p,1})^2 + (2n - L_w - L_{p,1})^2}{r_2^2 - (L_w - L_{p,2})^2 + (2n - L_w - L_{p,2})^2}} \right\}, (5.2.4)$$

$$s_{m,1} - s_{m,2} = \frac{Q}{2\pi k_1 m} \left\{ \ln \sqrt{\frac{r_1^2 - (L_w - L_{p,1})^2}{r_2^2 - (L_w - L_{p,2})^2}} + \left[+ 2 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^n \ln \sqrt{\frac{r_2^2 - (L_w - L_{p,2})^2 + 4n^2 L^2}{r_1^2 - (L_w - L_{p,1})^2 + 4n^2 L^2}} \right] \right\}.$$
 (5.2.5)

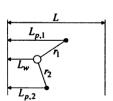


Рис. 5.4. Определение расстояний для двух наблюдательных скважин.

подбором коэффициенты Здесь определяются фильтрации основной и смежной зон по разности двух наблюдательных скважинах, понижений расположенных в основной зоне: на основе уравнения (5.2.4) – для произвольного расположения опытной на основе уравнения (5.2.5) – скважины. расположения опытной скважины симметричного относительно границ. Преимущество последних двух уравнений заключается в отсутствии величины радиуса влияния.

Замечание

При нахождении области влияния откачки в основной ограниченной зоне неоднородности обработка осуществляется по схеме однородного неограниченного в плане водоносного пласта (см. раздел 2.1).

5.3. Круговые зоны неоднородности

Водоносный пласт состоит из двух или более коаксиальных круговых зон неоднородностей с разными фильтрационными свойствами. Круговой пласт может быть неограниченным в плане или замкнутым круговой границей обеспеченного питания.

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

a — минимальная или максимальная пьезопроводность из двух зон для неограниченного в плане пласта, необходима для расчета применимости используемых уравнений, м²/сут;

 a_1, a_2 – пьезопроводности внутренней и внешней зон неограниченного в плане пласта, м²/сут;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

erfcu — дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

i = 1,2,3,...,N – номер i-й кольцевой зоны;

 k_1 – коэффициент фильтрации внутренней зоны, м/сут;

 k_2 – коэффициент фильтрации внешней зоны (для схемы с двумя зонами), м/сут;

 k_i — коэффициент фильтрации i-й кольцевой зоны (для схемы с неограниченным числом кольцевых зон), м/сут;

 k_N — коэффициент фильтрации внешней кольцевой зоны (для схемы с неограниченным числом кольцевых зон), м/сут;

 $L_{pc}\,$ – расстояние от центра круговой зоны до наблюдательной скважины, м;

 $L_{wc}\,$ – расстояние от центра круговой зоны до опытной скважины, м;

т - мощность водоносного пласта, м;

N — количество кольцевых зон;

n – номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 R_1 — радиус внутренней зоны, м;

 R_2 – радиус внешней зоны (для схемы с двумя ограниченными зонами), м;

 R_i — радиус i-й кольцевой зоны (для схемы с неограниченным числом кольцевых зон), м;

 $R_N\,$ – радиус внешней зоны (для схемы с неограниченным числом кольцевых зон), м;

r – расстояние между опытной и наблюдательной скважинами, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся во внутренней или внешней зоне, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

 $s^{(1)}, s^{(2)}$ — понижения в наблюдательных скважинах, находящихся во внутренней и внешней зонах, м;

 $s_1^{(1)}, s_2^{(1)}$ — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся во внутренней зоне, м;

 $s_1^{(2)}, s_2^{(2)}$ — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся во внешней зоне, м;

 s_{mw} — понижение на период стационара в опытной скважине, м;

 s_{w} – понижение уровня в опытной скважине, м;

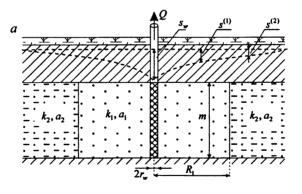
 T_1, T_2 – проводимости внутренней и внешней зон, м²/сут;

- t время от начала откачки, сут;
- u аргумент функции;
- u, u_1, u_2 безразмерные параметры для внутренней зоны, определяются уравнением (5.3.3);
- u_3 , u_4 безразмерные параметры для внешней зоны, определяются уравнением (5.3.5);
- W(u) функция влияния скважины (Приложение 26);
- ε обобщенный безразмерный параметр: определяется уравнением (5.3.2);
- ρ расстояние до фиктивной скважины: определяется уравнением (5.3.17).

5.3.1. Неограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, состоит из двух зон неоднородностей с общей круговой границей;
- основная (внутренняя) зона: замкнутая, находится в центре кругового пласта;
- смежная (внешняя) зона: неограниченная по простиранию, находится во внешней зоне;
- опытная скважина: находится в центре основной зоны;
- наблюдательная скважина: находится в основной или смежной зоне;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 5.5.



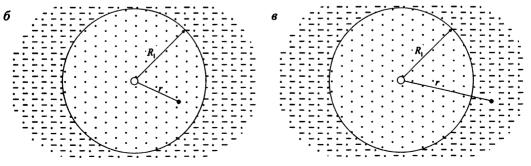


Рис. 5.5. Типовая схема кругового планово-неоднородного пласта с двумя зонами неоднородности. a — разрез; δ — план, наблюдательная скважина находится в основном горизонте; ϵ — план, наблюдательная скважина находится в смежном горизонте.

Литература: Щелкачев, 1951, 1990; Бочевер, и др., 1969.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода во внутренней и внешней зонах: уравнения (5.3.1) и (5.3.4);
- понижение для нестационарного периода в опытной скважине: уравнение (5.3.6);
- понижение для квазистационарного периода во внутренней и внешней зонах: уравнения (5.3.7) и (5.3.8).

Замечание

Аналитические нестационарные зависимости выведены В.А. Щелкачевым [1951] применительно к плоскорадиальному движению жидкости при откачке из совершенной скважины в неоднородной среде. Решения даны автором в давлениях и с учетом вязкости.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Понижение во внутренней зоне

$$s^{(1)} = \frac{Q}{\pi T_1} \sqrt{\frac{a_1 t}{r_w r}} \left\{ \sqrt{\frac{1}{\pi}} \exp(-u^2) - u \operatorname{erfc} u + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \left[\frac{\exp(-u_1^2) + \exp(-u_2^2)}{\sqrt{\pi}} - u_1 \operatorname{erfc} u_1 - u_2 \operatorname{erfc} u_2 \right] \right\}, \quad (5.3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{T_1 \sqrt{a_2 - T_2 \sqrt{a_1}}}{T_1 \sqrt{a_2} + T_2 \sqrt{a_1}},\tag{5.3.2}$$

$$u = \frac{r - r_w}{2\sqrt{a_1 t}}, \quad u_1 = \frac{2n(R_1 - r_w) + (r - r_w)}{2\sqrt{a_1 t}}, \quad u_2 = \frac{2n(R_1 - r_w) - (r - r_w)}{2\sqrt{a_1 t}}.$$
 (5.3.3)

2. Понижение во внешней зоне

$$s^{(2)} = -\frac{Q}{\pi T_1} (1 + \varepsilon) \sqrt{\frac{a_1 t}{r_w r}} \left\{ \sqrt{\frac{1}{\pi}} \exp\left(-u_3^2\right) - u_3 \operatorname{erfc} u_3 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \left[\sqrt{\frac{1}{\pi}} \exp\left(-u_4^2\right) - u_4 \operatorname{erfc} u_4 \right] \right\}, (5.3.4)$$

$$u_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1 - r_w}{\sqrt{a_1 t}} - \frac{R_1 - r}{\sqrt{a_2 t}} \right), \quad u_4 = \frac{1}{2} \left((2n + 1) \frac{R_1 - r_w}{\sqrt{a_1 t}} - \frac{R_1 - r}{\sqrt{a_2 t}} \right). \tag{5.3.5}$$

Частный случай для нестационарной фильтрации Понижение на стенке опытной скважины

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi r_{w} T_{1}} \left\{ \sqrt{\frac{a_{1}t}{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^{n} \left[\sqrt{\frac{a_{1}t}{\pi}} \exp\left(-\frac{n^{2}(R_{1} - r_{w})^{2}}{a_{1}t}\right) - n(R_{1} - r_{w}) \operatorname{erfc} \frac{n(R_{1} - r_{w})}{\sqrt{a_{1}t}} \right] \right\}. (5.3.6)$$

Уравнения (5.3.1), (5.3.4) и (5.3.6) справедливы для неравенства $at/r_w^2 \le 0.05$ или для времени $t \le 0.05 \cdot r_w^2/a$. Точность расчета составляет 1%. Для времени $t \le 0.4 \cdot r_w^2/a$ точность расчета в пределах 10%.

Уравнения для квазистационарного периода

Понижения во внутренней и внешней зонах определяются следующими уравнениями [Бочевер и др., 1969]:

$$s^{(1)} \approx \frac{Q}{2\pi T_2} \left[\ln \frac{1.5\sqrt{a_2 t}}{r} + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \ln \frac{R_1}{r} \right] = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[\frac{T_1}{T_2} \ln \frac{2.25a_2 t}{R_1^2} + 2 \ln \frac{R_1}{r} \right], \quad (5.3.7)$$

$$s^{(2)} \approx \frac{Q}{4\pi T_2} \ln \frac{2.25 a_2 t}{r^2} \,. \tag{5.3.8}$$

Уравнения (5.3.7) и (5.3.8) справедливы для неравенства $\frac{at}{r_w^2} \ge 100\,$ или для времени

 $t \ge 100 \frac{r_w^2}{a}$. Точность расчета составляет 1%. Для времени $t \ge 6 \frac{r_w^2}{a}$ точность расчета в пределах 10%.

Способы обработки откачки

Способ прямой линии

Таблица 5.3.1 Расчетные формулы для определения параметров по понижениям во внутренней зоне

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Радиус внутренней зоны, м
		$T_2 = \frac{0.183Q}{C}$	
Временное прослеживание	$s^{(1)} - \lg t$	$T_1 = \frac{CT_2 \lg \frac{R_1}{r}}{A + C \lg \frac{R_1}{r}}$	$R_1 = 2.3 \exp \frac{AT_1 \lg r}{C(T_2 - T_1)}$

 Π р и м е ч а н и е . Проводимость внутренней зоны T_1 определяется при известной проводимости внешней зоны T_2 и известном радиусе внутренней зоны R_1 . Радиус внутренней зоны определяется при известных проводимостях двух зон.

Таблица 5.3.2 Расчетные формулы для определения параметров по понижениям во внешней зоне

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s^{(2)}-\lg t$	$T_2 = \frac{0.183Q}{C}$	$a_2 = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s^{(2)} - \lg r$	$T_2 = \frac{0.366Q}{C}$	$a_2 = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s^{(2)} - \lg \frac{t}{r^2}$	$T_2 = \frac{0.183Q}{C}$	$a_2 = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1^{(2)}}{s_2^{(2)}} = \frac{\lg \frac{2.25a_2t}{r_1^2}}{\lg \frac{2.25a_2t}{r_2^2}}.$$
 (5.3.9)

Подбор пьезопроводности внешней области a_2 осуществляется способом биссектрисы. График строится по двум наблюдательным скважинам, находящимся во внешней зоне, на моменты времени $t \ge \left(6 \div 100\right) \frac{r_w^2}{a}$.

Точечные способы

Способ разности понижений:

- по двум наблюдательным скважинам внутренней зоны

$$s_1^{(1)} - s_2^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_1} \ln \frac{r_2}{r_1}, \tag{5.3.10}$$

отсюда определение проводимости внутренней зоны T_1 :

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi \left(s_1^{(1)} - s_2^{(1)}\right)} \ln \frac{r_2}{r_1}; \tag{5.3.11}$$

по двум наблюдательным скважинам внешней зоны

$$s_1^{(2)} - s_2^{(2)} = \frac{Q}{2\pi T_2} \ln \frac{r_2}{r_1}, \qquad (5.3.12)$$

отсюда определение проводимости внешней зоны T_2 :

$$T_2 = \frac{Q}{2\pi \left(s_1^{(2)} - s_2^{(2)}\right)} \ln \frac{r_2}{r_1} \,. \tag{5.3.13}$$

Подбор параметров

Таблица 5.3.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Зона	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
Внутренняя	5.3.1	TTGG	$s^{(1)} - \lg t$
Внешняя	5.3.4	T_1, T_2, a_1, a_2	$s^{(2)} - \lg t$
Внешняя	5.3.9	a_2	$s_1^{(2)}/s_2^{(2)}-\lg t$

Замечание

Данную схему можно использовать также для обработки откачки несовершенной по характеру вскрытия (наличие скин-эффекта) опытной скважиной в однородном неограниченном в плане напорном пласте (см. раздел 2.1). В этом случае R_1 — радиус «скина» вокруг опытной скважины.

5.3.2. Ограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, состоит из двух или более коаксиальных круговых зон неоднородности;
- граница: внешний контур является границей обеспеченного питания;
- основная (внутренняя) зона: замкнутая, находится в центре кругового пласта;
- смежная зона: одна или более, ограниченные в плане круговые зоны;
- опытная скважина: находится в центре основной зоны неоднородности;
- понижение определяется в опытной скважине;
- типовая схема: рис. 5.6.

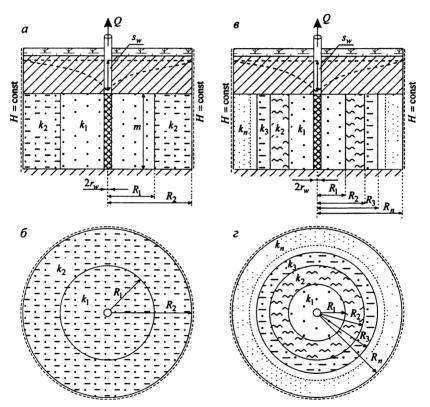


Рис. 5.6. Типовая схема кругового планово-неоднородного пласта, ограниченного границей обеспеченного питания.

a, 6 – разрез и план для двух зон неоднородности; e, z – разрез и план для нескольких зон неоднородности.

Литература: Щелкачев, Лапук, 1949; Пыхачев, Исаев, 1973.

Список решений:

- понижение для стационарного периода в опытной скважине для двух кольцевых зон неоднородности: уравнение (5.3.14);
- понижение для стационарного периода в опытной скважине для неограниченного числа кольцевых зон неоднородности: уравнение (5.3.15).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения для периода стационара

1. Для двух кольцевых зон [Щелкачев, Лапук, 1949]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi m} \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{R_1}{r_w} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R_2}{R_1} \right). \tag{5.3.14}$$

2. Для неограниченного числа кольцевых зон [Пыхачев, Исаев, 1973]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi m} \frac{1}{k_1} \left(\ln \frac{R_1}{r_w} + \sum_{i=2}^{N} \frac{1}{k_i} \ln \frac{R_i}{R_{i-1}} \right).$$
 (5.3.15)

Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение подбором коэффициентов фильтрации каждой зоны неоднородности по максимальному понижению в опытной скважине по уравнению (5.3.14) или (5.3.15) в зависимости от выбранной схемы.

Замечание

При нахождении области влияния откачки в первой (внутренней) зоне обработка осуществляется по схеме однородного неограниченного водоносного пласта (см. раздел 2.1).

5.3.3. Включение круговой зоны неоднородности

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, состоит из двух зон неоднородности с общей круговой границей;
- внутренняя зона: ограничена круговой границей;
- внешняя зона: неограниченная по простиранию;
- скважины: находятся во внутренней или внешней зоне;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 5.7.

Литература: Бочевер и др., 1979.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение в наблюдательной скважине при нахождении опытной скважины во внутренней зоне: уравнения (5.3.16) и (5.3.18);
- понижение в наблюдательной скважине при нахождении опытной скважины во внешней зоне: уравнения (5.3.19) и (5.3.20).

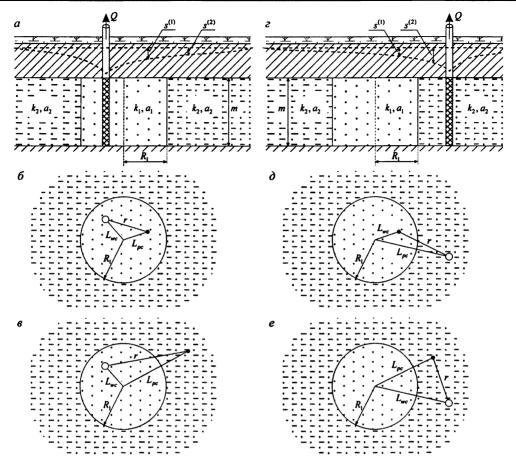


Рис. 5.7. Типовая схема водоносного пласта с включением круговой неоднородной зоны. Опытная скважина находится внутри неоднородной зоны: a – разрез; δ , e – план; опытная скважина находится во внешней зоне: e – разрез; d, e – план.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Частные случаи нестационарной фильтрации

Решения даны для больших промежутков времени: $t > 2.8 \frac{\left(L_{wc} + R_1\right)^2}{a_2}$.

- 1. Опытная скважина находится во внутренней зоне (рис. 5.7, a e):
 - понижение в наблюдательной скважине, расположенной во внутренней зоне,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[\ln \frac{2.25a_2t}{r^2} - \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1} \left(\ln \frac{2.25a_2tR_1^2}{\rho^2 L_{wc}^2} + \frac{T_1}{T_2} \ln \frac{2.25a_2t}{R_1^2} \right) \right], \tag{5.3.16}$$

$$\rho = \frac{1}{L_{wc}} \sqrt{\left(L_{wc}^2 - R_1^2\right) \left(L_{pc}^2 - R_1^2\right) + r^2 R_1^2} ; \qquad (5.3.17)$$

понижение в наблюдательной скважине, расположенной во внешней зоне,

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} \left[W \left(\frac{r^2}{4a_2 t} \right) + \frac{T_2 - T_1}{2T_2} W \left(\frac{L_{pc}^2}{4a_2 t} \right) \right]. \tag{5.3.18}$$

- 2. Опытная скважина находится во внешней зоне (рис. 5.7, z - e):
 - понижение в наблюдательной скважине, расположенной во внутренней зоне,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} \left[W \left(\frac{r^2}{4a_2t} \right) - \frac{T_2 - T_1}{2T_2} \ln \frac{2.25a_2t}{L_{wc}^2} \right]; \tag{5.3.19}$$

понижение в наблюдательной скважине, расположенной во внешней зоне,

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} \left\{ W \left(\frac{r^2}{4a_2 t} \right) - \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1} \left[W \left(\frac{L_{pc}^2}{4a_2 t} \right) + W \left(\frac{\rho^2}{4a_2 t} \right) \right] \right\}. \tag{5.3.20}$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблииа 5.3.4

подопраемые нараметры и рекомендуемые графики			
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
5316 5318		$s^{(1)} - \log t$	

Зона	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
Внутренняя	5.3.16, 5.3.18	T_1, T_2, a_2	$s^{(1)} - \lg t$
Внешняя	5.3.19, 5.3.20	I_1, I_2, u_2	$s^{(2)} - \lg t$

5.4. Планово-неоднородные пласты, ограниченные границей обеспеченного питания

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, в плане состоит из двух зон неоднородности с общей границей;
- опытная скважина: находится в основной зоне неоднородности;
- наблюдательная скважина: находится в основной или смежной зоне;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

Рассматривается три варианта расположения зон неоднородности относительно друг друга и относительно границы обеспеченного питания:

- вариант 1: основная зона ограничена в плане двумя параллельными границами: с одной стороны – граница обеспеченного питания (условие І рода); с другой – линия соединения двух зон неоднородности; смежная зона полуограничена в плане общей прямолинейной границей (рис. 5.8); аналог пласта-полосы;
- вариант 2: основная зона ограничена в плане двумя пересекающимися границами: границей обеспеченного питания (условие І рода) и линией соединения двух зон неоднородности (рис. 5.9, а); аналог углового пласта;

вариант 3: основная зона ограничена в плане границей обеспеченного питания (условие І рода) и круговой границей соединения двух зон (рис. 5.9, δ).

<u>Литература:</u> Бочевер и др., 1979.

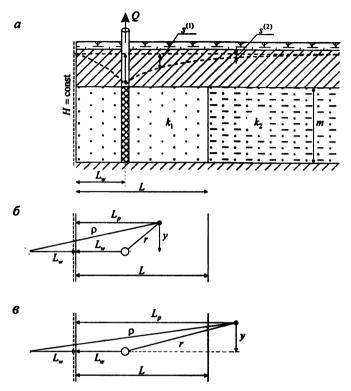


Рис. 5.8. Типовая схема полуограниченного планово-неоднородного пласта с двумя зонами неоднородности. Наблюдательная скважина иаходится в основной зоне: *а* – разрез; *б* – план; *в* – наблюдательная скважина находится в смежной зоне, план.

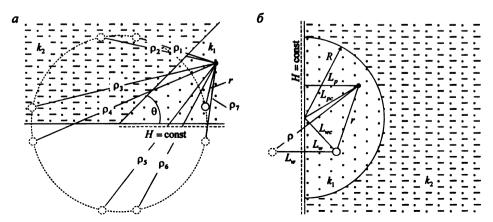


Рис. 5.9. Типовая схема планово-неоднородного пласта с двумя зонами неоднородности. a – план углового пласта; δ – план круговой зоны неоднородности.

Условные обозначения:

j — номер фиктивной скважины углового пласта; общее количество фиктивных скважин определяется по формуле (2.5.12):

L – ширина основной зоны (см. рис. 5.8), м;

 L_p — расстояние от наблюдательной скважины, находящейся в основной или смежной зоне, до границы обеспеченного питания, м;

 $L_{pc}\,$ – расстояние от центра полукруга основной зоны до наблюдательной скважины, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы обеспеченного питания, м;

 $L_{wc}\,$ — расстояние от центра полукруга основной зоны до опытной скважины, м;

n — номер суммы; для углового пласта — количество слагаемых, определенных по формуле (5.4.4); Q — расход опытной скважины, м³/сут;

R – радиус полукруга основной зоны (см. рис. 5.9, δ), м;

r — расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, находящейся в основной или смежной зоне, м;

 $s_m^{(1)}$, $s_m^{(2)}$ — понижения на период стационара в наблюдательных скважинах, находящихся в основной и смежной зонах, м;

 T_1 , T_2 – проводимости основной и смежной зонах, м²/сут;

 $y = \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$ — проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной скважины на линию границы (рис. 5.8, 6, в), м;

 θ — угол между двумя пересекающимися границами (рис. 5.9, a), градус;

 $\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p}$ — расстояние от наблюдательной скважины, находящейся в основной или смежной зоне, до фиктивной скважины (рис. 5.8 и рис. 5.9, δ), м;

 ρ_j — расстояние от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины (рис. 5.9, *a*), м; для определения расстояний см. уравнения (2.5.1) – (2.5.4).

Список решений (для стационарного периода):

- понижение в основной и смежной зонах для варианта 1: уравнения (5.4.1) и (5.4.2);
- понижение в основной зоне для варианта 2: уравнение (5.4.3);
- понижение в основной и смежной зонах для варианта 3: уравнения (5.4.5) и (5.4.6).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение для периода стационара

- 1. Линейная граница раздела параллельна границе обеспеченного питания (рис. 5.8):
 - понижение в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне,

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_{1}} \left\{ \ln \frac{\rho}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\left(\frac{T_{2} - T_{1}}{T_{2} + T_{1}}\right)^{n} \times \left(\frac{\sqrt{(2nL + L_{p} + L_{w})^{2} + y^{2}} \sqrt{(2nL - L_{p} - L_{w})^{2} + y^{2}}}{\sqrt{(2nL + L_{p} - L_{w})^{2} + y^{2}} \sqrt{(2nL - L_{p} + L_{w})^{2} + y^{2}}} \right] \right\}; \quad (5.4.1)$$

- понижение в наблюдательной скважине, находящейся в смежной зоне,

$$s_m^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} \left\{ \ln \frac{\rho}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1} \right)^n \ln \frac{\sqrt{(2nL + L_p + L_w)^2 + y^2}}{\sqrt{(2nL + L_p - L_w)^2 + y^2}} \right] \right\}.$$
 (5.4.2)

2. Линейная граница раздела находится под углом к границе обеспеченного питания (см. рис. 5.9, *a*). Понижение в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне,

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_{1}} \begin{cases} \ln \frac{\rho_{7}}{r} + \left(\frac{T_{2} - T_{1}}{T_{2} + T_{1}}\right)^{n} \ln \frac{\rho_{2n-1}}{\rho_{2n}} + \\ + \ln \sum_{j=1}^{n-1} \left[\left(\frac{T_{2} - T_{1}}{T_{2} + T_{1}}\right)^{j} \ln \frac{\rho_{2j-1}\rho_{4n-2j-1}}{\rho_{2j}\rho_{4n-2j}} \right] \end{cases}, \tag{5.4.3}$$

где

$$n = \frac{\pi}{2\theta} \,. \tag{5.4.4}$$

- 3. Граница обеспеченного питания проходит по диаметру круговой границы раздела (рис. 5.9, δ):
 - понижение в наблюдательной скважине, находящейся в основной зоне,

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_{1}} \left\{ \ln \frac{\rho}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{T_{1} - T_{2}}{T_{1} + T_{2}} \right) \ln \frac{\left(L_{wc}^{2} - R^{2} \right) \left(L_{pc}^{2} - R^{2} \right) + \rho^{2} R^{2}}{\left(L_{wc}^{2} - R^{2} \right) \left(L_{pc}^{2} - R^{2} \right) + r^{2} R^{2}} \right\};$$
 (5.4.5)

понижение в наблюдательной скважине, находящейся в смежной зоне,

$$s_m^{(2)} = \frac{Q}{2\pi (T_1 + T_2)} \ln \frac{\rho}{r} \,. \tag{5.4.6}$$

Способы обработки откачки

Точечные способы

- 1. Определение подбором проводимости двух зон по понижению в наблюдательной скважине на период стационара по уравнению (5.4.1) (5.4.3) или (5.4.5).
- Определение суммарной проводимости по понижению на период стационара в смежной зоне:

$$T_1 + T_2 = \frac{Q}{2\pi s_m^{(2)}} \ln \frac{\rho}{r}.$$
 (5.4.7)

РАЗДЕЛ 6. ОДНОСЛОЙНЫЙ БЕЗНАПОРНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ

Однослойный безнапорный водоносный пласт имеет постоянную начальную обводненную мощность. Подошва водоносного пласта является абсолютным (полностью непроницаемым) водоупором.

6.1. Совершенная скважина в безнапорном изотропном водоносном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, неограниченный в плане; рассмотрен случай перетекания из нижележащего слоя;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- понижение (повышение) определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 6.1 и рис. 6.2.

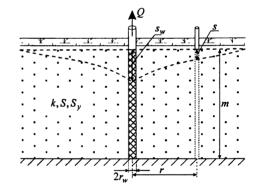


Рис. 6.1. Типовая схема неограниченного безнапорного пласта (разрез).

<u>Литература:</u> Биндеман, 1951; Boulton, 1954a, 1954b, 1963, 1970; Remson, Lang, 1955; Don

Kirkham, 1959; Jacob, 1963a; Dagan, 1967b; Walton, 1970; Boulton, Pontin, 1971; Marino, Yeh, 1972; Streltsova, 1972, 1988; Streltsova, Rushton, 1973; Полубаринова-Кочина, 1977; Мироненко, Шестаков, 1978.

Условные обозначения:

A — величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии); $A(u,\beta)$ — специальная функция (Приложение 1);

$$a = \frac{k\overline{m}}{S_y}$$
 — уровнепроводность водоносного пласта, м²/сут;

- B параметр перетекания: определяется уравнением (6.1.17), м;
- С угол наклона прямой (для способа прямой линии);
- D расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $F_{B}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 7);

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

m – начальная обводненная мощность водоносного пласта, м;

 \overline{m} — может определяться как средняя обводненная мощность между начальной обводненной мощностью m и обводненной мощностью на конец откачки, м;

m' - мощность разделяющего слоя, м;

Q — расход опытной скважины (переменная величина при нагнетании с постоянным повышением), M^3 /сут;

R – радиус влияния, м;

r — горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

S – упругая водоотдача водоносного пласта;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s - понижение (повышение) в водоносном пласте, м;

 s_1, s_2 — понижения в водоносном пласте для первой и второй наблюдательных скважин, м;

 s_w — понижение или постоянное повышение в опытной скважине, м;

t – время от начала откачки (нагнетания), сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

u – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 α — эмпирический параметр, можно определить как $\alpha = \frac{3k}{Sm}$, 1/сут;

 β – аргумент функций.

Список решений (для нестационарного периода):

- среднее понижение: уравнение (6.1.1);
- понижение уровня грунтовых вод: уравнение (6.1.2);
- частные случаи среднего понижения: уравнения (6.1.3) и (6.1.4);
- общее уравнение для понижения на большие моменты времени: уравнение (6.1.5);
- понижение для гравитационного режима: уравнения (6.1.6) и (6.1.7);
- повышение для нестационарного периода при нагнетании с постоянным повышением уровня: уравнение (6.1.15);
- понижение при наличии перетекания: уравнение (6.1.16).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Среднее понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\tau} J_{0} \left(r \sqrt{\frac{\alpha S_{y}}{km}} \tau \right) \begin{cases} 1 - \frac{1}{\tau^{2} + 1} \exp\left(-\frac{\alpha t}{\tau^{2} + 1} \tau^{2} \right) - \\ -\frac{\tau^{2}}{\tau^{2} + 1} \exp\left[-\alpha \frac{S + S_{y}}{S} t(\tau^{2} + 1) \right] \end{cases} d\tau . \tag{6.1.1}$$

2. Решение Boulton (понижение уровня грунтовых вод)

$$s = \frac{Q}{2\pi km} F_B \left(\frac{kt}{S_{\nu}m}, \frac{r}{m} \right). \tag{6.1.2}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. При низкой водоотдаче S (или при отношении $\frac{S+S_y}{S} \to \infty$) уравнение (6.1.1) можно записать так:

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\tau} J_0 \left(r \sqrt{\frac{\alpha S_y}{km}} \tau \right) \left[1 - \frac{1}{\tau^2 + 1} \exp\left(-\frac{\alpha t}{\tau^2 + 1} \tau^2 \right) \right] d\tau . \tag{6.1.3}$$

2. Для начальных моментов времени уравнение (6.1.1) можно привести к виду

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\tau} J_0 \left(r \sqrt{\frac{\alpha S_y}{km}} \tau \right) \frac{\tau^2}{\tau^2 + 1} \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha \frac{S + S_y}{S} t \left(\tau^2 + 1 \right) \right] \right\} d\tau . \tag{6.1.4}$$

3. Для времени $t > 5\frac{Sm}{k}$ уравнения (6.1.1) и (6.1.2) аппроксимируют следующим выражением:

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} J_{0} \left(r \sqrt{\frac{\alpha S_{y}}{km}} \tau \right) \frac{1 - \exp(-\alpha t \tau^{2})}{\tau} d\tau . \tag{6.1.5}$$

Уравнение для гравитационного режима

Упрощенное решение:

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k}W\left(\frac{r^2}{4at}\right)}. (6.1.6)$$

Уравнение для квазистационарного периода гравитационного режима

$$s(2m-s) = \frac{0.366Q}{L} \lg \frac{2.25at}{r^2}$$
 (6.1.7)

***** Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 6.1.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.1.1	k, S, S_y	s = la(t)
6.1.2	k, S_y	$s-\lg(t)$

❖ Способы обработки гравитационного режима откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 6.1.2

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
$\lg[s(2m-s)] - \lg\frac{t}{r^2}$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	$a=\frac{10^E}{4}$
$\lg[s(2m-s)] - \lg t$	ig w (u) - ig u	$k = \frac{Q}{4\pi r \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Способ прямой линии

Таблица 6.1.3

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s(2m-s)-\lg t$	$k = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$s(2m-s)-\lg r$	$k = \frac{0.732Q}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s(2m-s)-\lg\frac{t}{r^2}$	$k = \frac{0.366Q}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1(2m-s_1)}{s_2(2m-s_2)} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)} = \frac{\lg\frac{2.25at}{r_1^2}}{\lg\frac{2.25at}{r_2^2}}.$$
(6.1.8)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Способ разности понижений

$$s_1(2m-s_1)-s_2(2m-s_2) = \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{t_1 r_2^2}{t_2 r_1^2}.$$
 (6.1.9)

На основе выражения (6.1.9) рассматривается три возможности определения коэффициента фильтрации:

- по двум наблюдательным скважинам и разным моментам времени

$$k = \frac{Q}{2\pi \left[s_1(2m - s_1) - s_2(2m - s_2)\right]} \ln \frac{t_1 r_2^2}{t_2 r_1^2};$$
 (6.1.10)

- по двум наблюдательным скважинам на один момент времени

$$k = \frac{Q}{\pi \left[s_1(2m - s_1) - s_2(2m - s_2)\right]} \ln \frac{r_2}{r_1}; \tag{6.1.11}$$

по одной наблюдательной скважине и на разные моменты времени:

$$k = \frac{Q}{2\pi[s_1(2m-s_1)-s_2(2m-s_2)]} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (6.1.12)

2. Способ отношения понижений

$$\frac{s_1(2m-s_1)}{s_2(2m-s_2)} = \frac{\lg(2.25at_1/r_1^2)}{\lg(2.25at_2/r_2^2)}.$$
(6.1.13)

На основе уравнения (6.1.13) подбором находят уровнепроводность по единичным замерам понижений уровня в двух наблюдательных скважинах.

3. По понижению в опытной скважине (используется радиус влияния R) определяется коэффициент фильтрации:

$$k = \frac{Q}{\pi s_w (2m - s_w)} \ln \frac{R}{r_w}. \tag{6.1.14}$$

Подбор параметров

Таблица 6.1.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры График		
6.1.6	k, a	$s(2m-s)-\lg t$	
6.1.8	а	$\frac{s_1(2m-s_1)}{s_2(2m-s_2)}-\lg t$	

Нагнетание с постоянным повышением

❖ Базовые аналитические зависимости

<u>Уравнение нестационарной фильтрации для повышения уровня</u> Повышение уровня в наблюдательной скважине [*Marino*, *Yeh*, 1972]

$$s(2m+s) = s_w(2m+s_w)A\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}\right).$$
 (6.1.15)

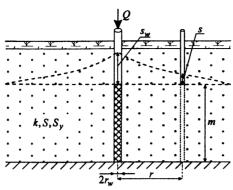


Рис. 6.2. Схема нагнетания в совершенную опытную скважину (разрез).

❖ Способы обработки нагнетания с постоянным повышением

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

Таблица 6.1.5

			•
График фактической	График эталонной	Уровнепроводность,	Повышение в опытной
кривой	кривой	м²/cyт	скважине, м
$\lg s - \lg t$	$ \lg A \left(u, \frac{r}{r_w} \right) - \lg u $	$a = \frac{10^E}{r_w^2}$	$s_w(2m+s_w)=10^D$

Подбор параметров

Таблица 6.1.6

Подбираемый параметр и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.1.15	а	$s(2m+s)-\lg t$

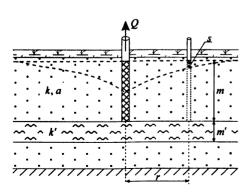


Рис. 6.3. Типовая схема безнапорного водоносного пласта с перетеканием.

Замечание

При наличии в подошве безнапорного водоносного пласта слабо-проницаемого слоя, ниже которого находится хорошо проницаемый пласт с постоянным уровнем (рис. 6.3), уравнение для понижения в наблюдательной скважине будет иметь вид [Полубаринова-Кочина, 1977]:

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k}W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right)}$$
, (6.1.16)

$$B = \sqrt{\frac{k\overline{m}m'}{k'}} \ . \tag{6.1.17}$$

Способы обработки данных откачки по уравнению (6.1.6) аналогичны обработке схемы перетекания из пластов с постоянным напором (см. раздел 9.1.1) с заменой понижения s на значение s(2m-s).

6.2. Несовершенная скважина в безнапорном анизотропном водоносном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане;
- опытная скважина: может быть совершенной или несовершенной по степени вскрытия;
- наблюдение: пьезометр или наблюдательная скважина;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 6.4.

Рассматривается четыре варианта в зависимости от совершенства и типа опытной и наблюдательной скважин:

вариант 1: несовершенная опытная скважина и пьезометр (рис. 6.4, a);

вариант 2: несовершенные опытная и наблюдательная скважины (рис. 6.4, б);

вариант 3: совершенная опытная скважина и пьезометр (рис. 6.4, в);

вариант 4: совершенные опытная и наблюдательная скважины (рис. 6.4, г).

<u>Литература:</u> Boreli, 1955; Cox, 1956; Dagan, 1967a; Neuman, 1972, 1973, 1974, 1975, 1979; Streltsova, 1974; Kruseman, Ridder, 1994.

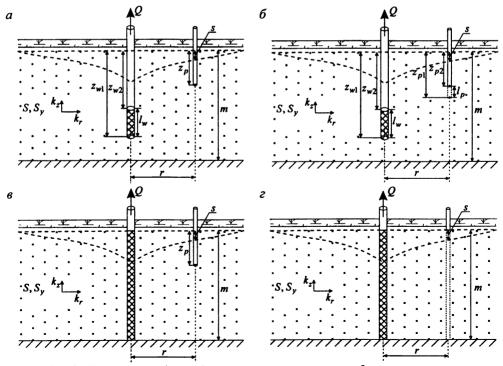


Рис. 6.4. Типовые схемы (разрезы) неограниченного анизотропного безнапорного пласта. a – несовершенная опытная скважина и пьезометр; b – несовершенные опытная и наблюдательная скважины; b – совершенные опытная и наблюдательная скважины.

Условные обозначения:

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_r – горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут;

 k_z — вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут;

 $l_{p}\,$ – длина фильтра наблюдательной скважины, м;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

m – начальная обводненная мощность водоносного пласта м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

S — упругая водоотдача водоносного пласта;

 S_{ν} — гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в водоносном пласте, м;

t — время от начала откачки, сут;

$$t_s = \frac{k_r mt}{Sr^2}$$
 — безразмерное время относительно упругой водоотдачи (S);

$$t_y = rac{k_r m t}{S_v r^2}$$
 — безразмерное время относительно гравитационной водоотдачи (S_y);

$$u_0(\tau)$$
 – определяется уравнением (6.2.2), (6.2.4), (6.2.6) или (6.2.8);

$$u_n(\tau)$$
 – определяется уравнением (6.2.3), (6.2.5), (6.2.7) или (6.2.9);

 $W_N(t_s, oldsymbol{eta})$ — специальная функция для начальных замеров (Приложение 29);

$$W_N(t_y, oldsymbol{eta})$$
 — специальная функция для больших интервалов времени (Приложение 29);

 ${m z}_p$ — вертикальное расстояние от уровня грунтовых вод до точки наблюдения, м;

 z_{p1}, z_{p2} — вертикальные расстояния от уровня грунтовых вод до дна и верха фильтра наблюдательной скважины, м;

 z_{w1}, z_{w2} — вертикальные расстояния от уровня грунтовых вод до дна и верха фильтра опытной скважины, м;

$$\beta$$
 – аргумент функций; может определяться как $\beta = \left(\chi \frac{r}{m}\right)^2$;

$$\gamma_0$$
 — корень уравнения $\sigma\gamma_0 \sinh\gamma_0 = \left(\tau^2 - \gamma_0^2\right) \cosh\gamma_0$, $\gamma_0^2 < \tau^2$;

$$\gamma_n$$
 — корни уравнения $\sigma \gamma_n \sin \gamma_n = -\left(\tau^2 - \gamma_n^2\right) \cos \gamma_n$, $(2n-1)\frac{\pi}{2} < \gamma_n < n\pi$, $n \ge 1$;

 $\sigma = S/S_y$ – безразмерный параметр;

$$\chi = \sqrt{k_z / k_r}$$
 — коэффициент профильной анизотропии (для изотропного пласта $\chi = 1$).

Список решений (для нестационарного периода):

- основное уравнение понижения: уравнение (6.2.1);
- понижение в пьезометре при несовершенной опытной скважине: функциональные зависимости (6.2.2) и (6.2.3) для уравнения (6.2.1);

- понижение в наблюдательной скважине при несовершенной опытной скважине:
 функциональные зависимости (6.2.4) и (6.2.5) для уравнения (6.2.1);
- понижение в пьезометре при совершенной опытной скважине: функциональные зависимости (6.2.6) и (6.2.7) для уравнения (6.2.1);
- понижение в наблюдательной скважине при совершенной опытной скважине:
 функциональные зависимости (6.2.8) и (6.2.9) для уравнения (6.2.1);
- понижение для гравитационного режима: уравнение (6.2.10).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине (решение Neuman)

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \int_0^\infty 4\pi J_0 \left(\tau \chi \frac{r}{m} \right) \left[u_0(\tau) + \sum_{n=1}^\infty u_n(\tau) \right] d\tau.$$
 (6.2.1)

В зависимости от вида и совершенства по степени вскрытия опытной и наблюдательной скважин функциональные зависимости $u_0(\tau)$ и $u_n(\tau)$ определяются следующим образом:

– для несовершенной опытной скважины и пьезометра [Neuman, 1974]

$$u_{0}(\tau) = \left\{ \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_{z}t}{Sm}\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)\right)\right] \cosh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{p}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right] \cosh\gamma_{0}} \times \frac{\sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m} \sinh\gamma_{0}} \right\},$$
(6.2.2)

$$u_{n}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_{z}t}{Sm}\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)\right)\right] \cos\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right] \cos\gamma_{n}} \times \\ \times \frac{\sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m} \sin\gamma_{n}} \end{cases};$$
(6.2.3)

 для несовершенных опытной и наблюдательной скважин (при подстановке в уравнение (6.2.1) получим осредненное понижение по длине фильтра наблюдательной скважины)
 [Neuman, 1974]

$$u_{0}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_{z}t}{Sm}\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)\right)\right]\left[\sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{p2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{p1}}{m}\right)\right]}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right]\cosh\gamma_{0}} \\ \times \frac{\sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m}\frac{l_{p}}{m}\gamma_{0}\sinh\gamma_{0}} \end{cases}, (6.2.4)$$

$$u_{n}(\tau) = \begin{cases} \left[1 - \exp\left(-\frac{k_{z}t}{Sm}\left(\tau^{2} - \gamma_{n}^{2}\right)\right) \right] \left[\sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p1}}{m}\right) \right] \\ \left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma} \right] \cos\gamma_{n} \\ \times \frac{\sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m} \frac{l_{p}}{m} \gamma_{n} \sin\gamma_{n}} \end{cases}; (6.2.5)$$

– для совершенной опытной скважины и пьезометра [Neuman, 1972, 1973]

$$u_0(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_z t}{Sm} \left(\tau^2 - \gamma_0^2\right)\right)\right] \cosh\left(\gamma_0 \frac{m - z_p}{m}\right)}{\left[\tau^2 + (1 + \sigma)\gamma_0^2 - \frac{\left(\tau^2 - \gamma_0^2\right)^2}{\sigma}\right] \cosh\gamma_0},$$
(6.2.6)

$$u_{n}(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_{z}t}{Sm}\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)\right)\right] \cos\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right] \cos\gamma_{n}};$$
(6.2.7)

 для совершенных опытной и наблюдательной скважин (при подстановке в уравнение (6.2.1) получим осредненное понижение по длине фильтра наблюдательной скважины) [Neuman, 1975]

$$u_0(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_z t}{Sm} \left(\tau^2 - \gamma_0^2\right)\right)\right] \tanh \gamma_0}{\left[\tau^2 + (1 + \sigma)\gamma_0^2 - \frac{\left(\tau^2 - \gamma_0^2\right)^2}{\sigma}\right] \gamma_0},$$
(6.2.8)

$$u_n(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{k_z t}{Sm} \left(\tau^2 + \gamma_n^2\right)\right)\right] \tan \gamma_n}{\left[\tau^2 - (1 + \sigma)\gamma_n^2 - \frac{\left(\tau^2 + \gamma_n^2\right)^2}{\sigma}\right] \gamma_n}.$$
(6.2.9)

Уравнения для гравитационного режима

Понижение в наблюдательной скважине для третьего участка индикаторной кривой при совершенной по степени вскрытия опытной скважине [Neuman, 1973]

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \int_0^\infty 2\tau J_0 \left(\tau \chi \frac{r}{m} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{k_z t}{S_y m} \tanh \tau \right) \frac{1}{\cosh \tau} \cosh\left(\tau \frac{m - z_p}{m} \right) \right] \frac{d\tau}{\tau}. \quad (6.2.10)$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблиуа 6.2.1

подопрас	подовраемые параметры в рекомендуемый график				
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График			
6.2.1	k_r, k_z, S, S_y	$s - \lg t$			
6.2.10	k_r, k_z, S_y	5 – 1g t			

<u>Алгоритм определения параметров по эталонным кривым</u> [Neuman, 1975; Kruseman, Ridder, 1994]

Условием применения данного алгоритма является совершенство опытной и наблюдательных скважин.

- 1. Строим два семейства эталонных кривых в билогарифмическом масштабе для различных значений параметра β : $\lg W_N(t_s,\beta) \lg t_s$ и $\lg W_N(t_y,\beta) \lg t_y$. Это можно сделать различными способами: рассчитать кривые по уравнениям (6.2.1), (6.2.8) и (6.2.9), использовать для этого компьютерную программу DELAY2 (автор Neuman, 1986) или воспользоваться Приложением 29.
- 2. Построим фактические данные по понижениям уровня в наблюдательной скважине в билогарифмическом масштабе: $\lg s \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графиков эталонных кривых.
- 3. Перемещая график $\lg s \lg t$, совместим его начальные данные (отвечающие упругому режиму фильтрации) с наиболее подходящей эталонной кривой на графике $\lg t_s \lg \beta$.
- 4. Возьмем координаты (x, y) произвольной точки на совмещенных графиках.
- 5. Координата x на фактическом графике будет соответствовать $\lg t$, а на эталонной кривой $\lg t_s$. Следовательно, зная t, t_s и то, что $t_s = \frac{k_r m t}{S r^2}$, рассчитаем упругую водоотдачу S:

$$S = \frac{k_r mt}{t r^2} \,. \tag{6.2.11}$$

6. Координата y на фактическом графике будет соответствовать $\lg s$, а на эталонной кривой $\lg W_N(t_s,\beta)$. Следовательно, зная s, $W_N(t_s,\beta)$ и то, что $s=\frac{Q}{4\pi k_r m}W_N(t_s,\beta)$, найдем горизонтальный коэффициент фильтрации k_r :

$$k_r = \frac{QW_n(t_s, \beta)}{4\pi ms}. (6.2.12)$$

7. По параметру $\beta = \left(\chi \frac{r}{m}\right)^2$, отвечающему наиболее подходящей эталонной кривой, найдем коэффициент анизотропии χ :

$$\chi = \sqrt{\beta} \, \frac{m}{r} \,. \tag{6.2.13}$$

- 8. По найденным значениям k_r и χ определим вертикальный коэффициент фильтрации k_z : $k_z = \chi k_r \,. \tag{6.2.14}$
- 9. Перемещая график $\lg s \lg t$, совместим его данные для длительных периодов откачки (отвечающие гравитационному режиму фильтрации) с наиболее подходящей эталонной кривой на графике $\lg t_y \lg \beta$. Возьмем координаты (x,y) произвольной точки на совмещенных графиках.
- 10. Координата x на фактическом графике будет соответствовать $\lg t$, а на эталонной кривой $\lg t_y$. Следовательно, зная t, t_y и то, что $t_y = \frac{k_r m t}{S_y r^2}$, найдем гравитационную водоотдачу S_y :

$$S_y = \frac{k_r mt}{t_y r^2}. ag{6.2.15}$$

- 11. Далее повторяются пункты 6, 7 и 8 для нахождения k_r , χ и k_z . Их значения должны совпадать с ранее определенными значениями.
- 12. Пункты с 4 по 11 можно повторить для произвольного количества точек. При этом полученные результаты должны быть близкими.

Замечания

- 1. Осредненное по длине фильтра понижение будет всегда больше, чем понижение уровня грунтовых вод.
- 2. Из-за сложности решения уравнения (6.2.1) для расчета понижений рекомендуется использовать доступный программный код DELAY2 (автор Neuman, 1986), который определяет безразмерное понижение $\frac{4\pi k_r m}{Q}$ в зависимости от фильтрационных параметров водоносного пласта и геометрии расположения опытной и наблюдательной скважин.
- 3. При совершенных по степени вскрытия опытной и наблюдательных скважинах для обработки данных, отвечающих упругому режиму фильтрации, можно также использовать все способы обработки, соответствующие схеме Тейса (см. раздел 2.1).
 - При этом определяемыми параметрами являются проводимость $(T = k_r m)$ и
- пьезопроводность ($a = k_r m/S$).
- При совершенных по степени вскрытия опытной и наблюдательных скважинах для обработки данных, отвечающих гравитационному режиму фильтрации, можно также

использовать все способы обработки, соответствующие схеме Тейса (см. раздел 2.1). При этом определяемыми параметрами являются проводимость ($T = k_r m$) и уровнепроводность ($a = k_r m/S_v$).

- 5. Представленные здесь уравнения линейны и, следовательно, к ним можно применять принцип суперпозиции [Neuman, 1974]. Отсюда, по аналогии с решениями для откачки в напорном водоносном пласте (см. раздел 2 для совершенной и разделы 3 и 4 для несовершенной опытной скважины), решение (6.2.1) можно использовать для учета плановой ограниченности безнапорного фильтрационного потока. Сюда входят:
 - полуограниченный пласт (граничные условия I или II рода),
 - ограниченный двумя параллельными границами: пласт-полоса (граничные условия I, II рода или I и II рода),
 - ограниченный двумя пересекающимися границами: угловой пласт (граничные условия I, II рода или I и II рода),
 - две параллельные границы пересекаются третьей под прямым углом: U-образный пласт (любая комбинация граничных условий I и II рода).

Для расчета понижений в ограниченных водоносных пластах требуется:

- 1) в качестве функции принять несобственный интеграл уравнения (6.2.1);
- 2) знаки отраженных скважин ставить в зависимости от граничного условия;
- 3) расчет расстояний от точки наблюдения до фиктивных скважин для совершенных по степени вскрытия скважин производится как для совершенных скважин в ограниченном напорном пласте (см. раздел 2.3), а для несовершенных – как для линейного (раздел 3) или точечного источника (раздел 4).
- 6. Для решения задачи, описанной в данном разделе, могут также использоваться решения Moench [1993, 1996, 1997]. Определение фильтрационных параметров в этом случае основано на способе эталонных кривых, построение которых осуществляется с помощью специализированной программы WTAQ2 (автор Moench, 1997).

6.3. Несовершенная скважина большого диаметра в безнапорном анизотропном водоносном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия; учитывается емкость скважины;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 6.5.

<u>Литература:</u> Boulton, Streltsova, 1976.

Условные обозначения:

- c_n безразмерный параметр: определяется уравнением (6.3.5);
- $J_0(\beta)$ функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $J_1(\beta)$ функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- $K_0(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $K_1(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2).

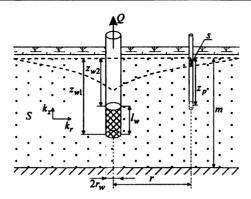


Рис. 6.5. Типовая схема (разрез) неограниченного анизотропного безнапорного пласта. Опытная скважина имеет большой радиус.

к, - горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут;

 k_z – вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут;

 l_w – длина фильтра опытной скважины, м;

т – начальная обводненная мощность водоносного пласта м;

n — номер суммы и номер корня;

 P_1 – определяется уравнением (6.3.2);

 P_2 – определяется уравнением (6.3.3);

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

S – упругая водоотдача водоносного пласта;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в водоносном пласте, м;

t — время от начала откачки, сут;

u – безразмерный параметр: определяется уравнением (6.3.4);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 z_p — вертикальное расстояние от уровня грунтовых вод до точки наблюдения, м;

 z_{w1}, z_{w2} — вертикальные расстояния от уровня грунтовых вод до дна и верха фильтра опытной скважины, м;

 β – аргумент функций;

 ζ_n – положительные корни уравнения $(n\alpha)^2 - \zeta_n^2 = \beta \zeta_n \frac{K_1(\zeta_n)}{K_0(\zeta_n)}$; α, β – константы;

 $\chi = \sqrt{k_z \, / \, k_r} \, \, - \,$ коэффициент профильной анизотропии.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (6.3.1);

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi k_{r} m} \sum_{n=1,3,5,...}^{\infty} \left\{ \frac{32S}{\pi^{2} n} \left(\cos \frac{n\pi z_{w2}}{2m} - \cos \frac{n\pi z_{w1}}{2m} \right) \sin \frac{n\pi z_{p}}{2m} \times \frac{\pi K_{0} \left(\zeta_{n} \frac{r}{r_{w}} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{\left(c_{n}^{2} - \zeta_{n}^{2} \right) u}{4} \right) \right]}{K_{1} \left(\zeta_{n} \left[4S \frac{l_{w}}{m} \zeta_{n} \left(1 - S \frac{l_{w}}{m} \right) + \frac{\left(c_{n}^{2} - \zeta_{n}^{2} \right)^{2}}{\zeta_{n}} \right]}{\zeta_{n}} + \frac{1}{\sqrt{\frac{P_{2}J_{0} \left(\tau \frac{r}{r_{w}} \right) - P_{1}Y_{0} \left(\tau \frac{r}{r_{w}} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{u(\tau^{2} + c_{n}^{2})}{4} \right) \right]}{\left(P_{1}^{2} + P_{2}^{2} \right) \left(\tau^{2} + c_{n}^{2} \right)} u d\tau} \right\}, (6.3.1)$$

где ζ_n – положительные корни уравнения $c_n^2 - \zeta_n^2 = 2S \frac{l_w}{m} \zeta_n \frac{K_1(\zeta_n)}{K_0(\zeta_n)}$,

$$P_{1} = \left(\tau^{2} + c_{n}^{2}\right) I_{0}(\tau) - 2S \frac{l_{w}}{m} \tau I_{1}(\tau), \tag{6.3.2}$$

$$P_2 = \left(\tau^2 + c_n^2\right) Y_0(\tau) - 2S \frac{l_w}{m} \tau Y_1(\tau), \tag{6.3.3}$$

$$u = \frac{4k_r mt}{r_w^2 S},\tag{6.3.4}$$

$$c_n = n\pi\chi \frac{r_w}{2m} \,. \tag{6.3.5}$$

Замечание

Данное решение рекомендуется использовать только для начальных моментов времени. Для определения гравитационной водоотдачи S_y необходимо использовать решение, которое не учитывает емкости скважины (см. раздел 6.2 [Streltsova, 1974]).

❖ Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 6.3.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.3.1	k_r, k_z, S	$s - \lg t$

6.4. Несовершенная скважина в полуограниченном в разрезе безнапорном изотропном водоносном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, неограниченный в разрезе;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия; представлена точечным или линейным источником:
- упругой водоотдачей водоносного пласта пренебрегаем;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- типовая схема: рис. 6.6.

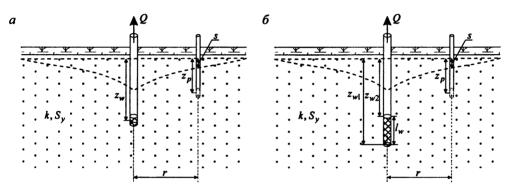


Рис. 6.6. Типовые схемы (разрез) полуограниченного в разрезе изотропного безнапорного пласта. Опытная скважина представлена: *a* – точечным, *б* – линейным источником.

Литература: Белякова, 1956; Шестаков, 1966; Шестаков, Невечеря, 1998.

Условные обозначения:

k — коэффициент фильтрации, м/сут;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

 S_{y} – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

лонижение в водоносном пласте, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

t — время от начала откачки, сут;

 z_p – вертикальное расстояние от уровня грунтовых вод до точки наблюдения, м;

 z_{w} – вертикальное расстояние от уровня грунтовых вод до точечного источника, м;

 z_{w1}, z_{w2} — вертикальные расстояния от уровня грунтовых вод до дна и верха фильтра опытной скважины, м.

Список решений:

- понижение в пласте для нестационарного периода: уравнения (6.4.1) и (6.4.2);
- понижение уровня грунтовых вод для нестационарного периода: уравнения (6.4.3) (6.4.6);
- понижение в опытной скважине: уравнения (6.4.7) и (6.4.8).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в любой точке водоносного пласта:

1) опытная скважина – точечный источник (см. рис. 6.6, а)

$$s = \frac{Q}{2\pi k} \left[\frac{1}{2\sqrt{r^2 + (z_p + z_w)^2}} + \frac{1}{2\sqrt{r^2 + (z_p - z_w)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z_p - z_w - tk/S_y)^2}} \right]; \quad (6.4.1)$$

2) опытная скважина – линейный источник (см. рис. 6.6, б)

$$s = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[\frac{\arcsin \frac{z_{w1} - z_{p}}{r} - \arcsin \frac{z_{w2} - z_{p}}{r} + \arcsin \frac{z_{w1} + z_{p}}{r} - \arcsin \frac{z_{w2} + z_{p}}{r} - \arcsin \frac{z_{w2} + z_{p}}{r} - \frac{z_{w2} + z_{p}}{r} - \frac{z_{w2} + z_{p} + tk/S_{y}}{r} - 2 \arcsin \frac{z_{w1} + z_{p} + tk/S_{y}}{r} + 2 \arcsin \frac{z_{w2} + z_{p} + tk/S_{y}}{r} - \frac{z_{w2} + z_{p} + tk/S_{y}}{r} \right]. (6.4.2)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. Опытная скважина точечный источник (см. рис. 6.6, а):
 - понижение уровня грунтовых вод ($z_p = 0$)

$$s = \frac{Q}{2\pi k} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + z_w^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z_w + tk/S_y)^2}} \right]; \tag{6.4.3}$$

— понижение уровня грунтовых вод над опытной скважиной ($z_p = 0; r = 0$)

$$s = \frac{Q}{2\pi k} \frac{tk/S_y}{z_w(z_w + tk/S_y)}.$$
 (6.4.4)

- 2. Опытная скважина линейный источник (см. рис. 6.6, δ):
 - понижение уровня грунтовых вод ($z_p = 0$)

$$s = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{z_{w1}}{r} - \operatorname{arcsinh} \frac{z_{w2}}{r} - \operatorname{arcsinh} \frac{z_{w1} + tk/S_y}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{z_{w2} + tk/S_y}{r} \right]; (6.4.5)$$

— понижение уровня грунтовых вод вблизи опытной скважины ($z_p = 0$; $r << z_{w2}$)

$$s = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\ln \frac{z_{wl}}{z_{w2}} - \ln \frac{z_{wl} + tk/S_y}{z_{w2} + tk/S_y} \right]; \tag{6.4.6}$$

- понижение на расстоянии от опытной скважины $r > 2l_w$: используется уравнение (6.4.1) для точечного источника [Шестаков, Невечеря, 19981:
- понижение в опытной скважине

$$s_{w} = s_{mw} - \frac{Q}{2\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} 2\ln\frac{2z_{w1} + tk/S_{y}}{z_{w2} + z_{w1} + tk/S_{y}} - \\ -\frac{2z_{w2} + tk/S_{y}}{l_{w}} \ln\frac{(z_{w2} + z_{w1} + tk/S_{y})^{2}}{(2z_{w2} + tk/S_{y})(2z_{w1} + tk/S_{y})} \end{bmatrix},$$
(6.4.7)

где s_{mw} — максимальное понижение в опытной скважине, которое определяется уравнением (6.4.8).

Уравнение для периода стационара

Частный случай для стационарного периода (понижение в опытной скважине):

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\ln \frac{1.47 l_w}{r_w} + \ln \frac{z_{wl}}{z_{w2} + z_{wl}} + \frac{z_{w2}}{l_w} \ln \frac{4z_{w2} z_{wl}}{\left(z_{w2} + z_{wl}\right)^2} \right]. \tag{6.4.8}$$

Способы обработки откачки

Точечный способ

По понижению на период стационара в опытной скважине определяется коэффициент фильтрации:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_w s_{mw}} \left[\ln \frac{1.47 l_w}{r_w} + \ln \frac{z_{wl}}{z_{w2} + z_{wl}} + \frac{z_{w2}}{l_w} \ln \frac{4z_{w2} z_{wl}}{\left(z_{w2} + z_{wl}\right)^2} \right]. \tag{6.4.9}$$

Подбор параметров

Таблица 6.4.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.4.1, 6.4.2, 6.4.3, 6.4.5	k, S_y	$s-\lg t$

6.5. Инфильтрационное питание и перетекание в безнапорном круговом водоносном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух хорошо проницаемых слоев, разделенных слабопроницаемым слоем;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый безнапорный, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый напорный, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, через который происходит перетекание;

- граница: водоносный комплекс ограничен в плане круговой непроницаемой границей;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины учитывается;
- сверху поступает инфильтрационное питание;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в безнапорном пласте;
- поток в слабопроницаемых слоях вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемых слоях не учитывается;
- типовая схема: рис. 6.7.

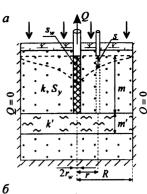
Литература: Полубаринова-Кочина, 1977.

Условные обозначения:

$$a=rac{k\overline{m}}{S_y}$$
 — уровнепроводность безнапорного пласта, м²/сут;

$$B = \sqrt{k\overline{m} \frac{m'}{k'}} - \text{параметр перетекания, м;}$$

 $I_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);



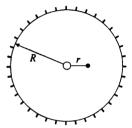


Рис. 6.7. Типовая схема с инфильтрационным питанием. a — разрез; δ — план.

- $I_1(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- $J_0(eta)$ функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $J_1(\beta)$ функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- $K_0(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $K_1(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

k – коэффициент фильтрации безнапорного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

т – начальная обводненная мощность безнапорного пласта, м;

m' — мощность разделяющего слоя, м;

 \overline{m} — может определяться как средняя обводненная мощность между начальной обводненной мощностью m и обводненной мощностью на конец откачки, м;

n – номер суммы;

Q – расход опытной скважины (переменная величина при откачке с постоянным понижением), M^3/C ут;

R – радиус кругового пласта (расстояние от центра опытной скважины до границы), м;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_{w} — радиус опытной скважины, м;

 S_{ν} — гравитационная водоотдача безнапорного пласта;

s - понижение в безнапорном водоносном пласте, м;

 s_w — понижение в опытной скважине (постоянная величина при откачке с постоянным понижением), м;

t — время от начала откачки, сут;

 x_n – корни уравнения $J_1(x_n) = 0$ (Приложение 33);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 β – аргумент функций;

 ε – величина инфильтрационного питания, м/сут;

$$\varsigma_n$$
 – корни уравнения $J_1(\varsigma_n)Y_1\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right) - Y_1(\varsigma_n)J_1\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right) = 0$ (Приложение 41);

$$\xi_n$$
 – корни уравнения $J_0(\xi_n)Y_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right) - Y_0(\xi_n)J_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right) = 0$ (Приложение 39).

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение при откачке с постоянным расходом: уравнение (6.5.1);
- понижение при откачке с постоянным понижением: уравнение (6.5.2).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$S = \begin{cases} \frac{\varepsilon m'}{k'} \left[1 - \exp\left(-\frac{k'}{S_{y}m'}t\right) \right] - \\ \frac{2B^{2}r_{w} \exp\left(-\frac{k'}{S_{y}m'}t\right)}{R^{2} - r_{w}^{2}} + B \frac{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)K_{0}\left(\frac{r}{B}\right)}{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)K_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)} + \\ \frac{Q}{2\pi k r_{w}\overline{m}} + \pi a \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\frac{\varsigma_{n}}{r_{w}} \exp\left[-\left(\frac{k'}{S_{y}m'} + a\frac{\varsigma_{n}^{2}}{r_{w}^{2}}\right)t\right]}{\frac{k'}{S_{y}m'} + a\frac{\varsigma_{n}^{2}}{r_{w}^{2}}} J_{1}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)J_{1}\left(\varsigma_{n}\right) \times \\ \times \frac{J_{1}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)Y_{0}\left(\varsigma_{n}\frac{r}{r_{w}}\right) - J_{1}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)Y_{1}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)}{J_{1}^{2}\left(\varsigma_{n}\right) - J_{1}^{2}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)} \right] \end{cases}$$

где
$$\varsigma_n$$
 – корни уравнения $J_1(\varsigma_n)Y_1\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right)-Y_1(\varsigma_n)J_1\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right)=0$.

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 6.5.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.5.1	k, S_y, k'	$s-\lg t$

Откачка с постоянным понижением

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \begin{cases} \frac{\varepsilon m'}{k'} + \left(s_{w} - \frac{\varepsilon m'}{k'}\right) \frac{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)K_{0}\left(\frac{r}{B}\right)}{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) + I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)} + \\ + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\varepsilon + s_{w}a\frac{\xi_{n}^{2}}{r_{w}^{2}}}{\frac{k'}{S_{y}m'} + a\frac{\xi_{n}^{2}}{r_{w}^{2}}} \exp\left[-\left(\frac{k'}{S_{y}m'} + a\frac{\xi_{n}^{2}}{r_{w}^{2}}\right)t\right] \times \\ \times J_{1}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}(\xi_{n}) \frac{J_{0}\left(\xi_{n}\frac{r}{r_{w}}\right)Y_{1}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right) - J_{1}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)Y_{0}\left(\xi_{n}\frac{r}{r_{w}}\right)}{J_{0}^{2}(\xi_{n}) - J_{1}^{2}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)} \end{cases} \right\}, (6.5.2)$$

где ξ_n — корни уравнения $J_0(\xi_n)Y_1\bigg(\xi_n\frac{R}{r_w}\bigg)-Y_0(\xi_n)J_1\bigg(\xi_n\frac{R}{r_w}\bigg)=0$.

❖ Способы обработки откачки с постоянным понижением

Подбор параметров

Таблица 6.5.2

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
6.5.2	S_y, a, k'	$s-\lg t$

РАЗДЕЛ 7. ОТКАЧКА ОКОЛО РЕКИ

7.1. Полуограниченный в плане напорный пласт: граница III рода

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная бесконечная в плане, представляет собой речную долину (граничное условие III рода);
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины (до речной долины);
- типовая схема: рис. 7.1.

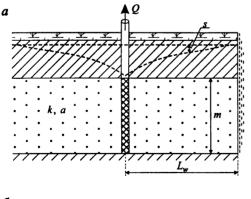




Рис. 7.1. Типовая схема напорного полуограниченного водоносного пласта с граничным условием III рода. a – разрез; δ – план.

<u>Литература:</u> Hantush, 1959a; Зеегофер, Шестаков, 1968; Боревский и др., 1973; Шестаков, 1973; Kruseman, Ridder, 1994.

Условные обозначения:

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

b — ширина реки, м;

 $f(\beta)$ – специальная функция (см. табл. 7.1.4);

 f_L – функция, зависящая от параметров ΔL и ρ_L ;

k' – коэффициент фильтрации русла реки, м/сут;

 $L_0 = L_w + \Delta L$ — расстояние от опытной скважины до гидравлической границы: определяется по формулам (7.1.15) и (7.1.16), м;

 L_p – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы, м;

m' — мощность русла реки, м;

Q – расход опытной скважины, м 3 /сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 $r' = (\rho/r)^2$ – приведенное расстояние для способа эталонной кривой;

S – водоотдача водоносного пласта;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_m – понижение на период стационара в наблюдательной скважине, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_p — понижение в точке изгиба графика: определяется уравнением (7.1.19), м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 $t_{p}\,$ – время в точке изгиба графика, сут;

u – аргумент функций;

 u_p — аргумент функции в точке изгиба графика: определяется уравнением (7.1.18);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

W'(u) – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 β – аргумент функции;

 ΔL – дополнительное фильтрационное сопротивление русла реки: определяется по формуле (7.1.4), м;

 Δs_p — наклон прямолинейного участка графика на единичный логарифмический цикл: определяется уравнением (7.1.21);

 ρ — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной с учетом сопротивления русла реки ΔL : определяется уравнением (7.1.1), м;

 $\rho_L = \rho \cdot f_L$ – расчетное расстояние до фиктивной скважины, м;

 $ho_{L,1},
ho_{L,2}$ — расчетные расстояния от первой и второй наблюдательной скважин до фиктивной скважины, м.

Определение расстояния до фиктивной скважины

Расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной с учетом сопротивления русла реки рассчитывается по следующей формуле:

$$\rho = \sqrt{(L_p + L_w + 2\Delta L)^2 + r^2 - (L_w - L_p)^2} . \tag{7.1.1}$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (7.1.2);
- понижение для стационарного периода: уравнение (7.1.5);
- понижение для стационарного периода для наблюдательных скважин, находящихся в створе, перпендикулярном границе: уравнения (7.1.6) и (7.1.7).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho_L^2}{4at} \right) \right], \tag{7.1.2}$$

$$\rho_L = \rho \cdot f_L \left(\frac{\Delta L}{\rho} \right). \tag{7.1.3}$$

По численным оценкам В.М.Шестакова [1973] уравнение (7.1.2) можно использовать в расчетах с вполне приемлемой точностью (от 1 до 2 %), начиная со времени $t \ge (5 \cdot \Delta L)^2/a$.

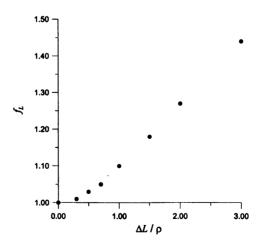


Рис. 7.2. Зависимость функции f_L от отношения $\Delta L/\rho$.

Ю.О. Зеегофер и В.М. Шестаков [1968] дают табулированные значения функции f_L в зависимости от соотношения ΔL и ρ (табл. 7.1.1). График этой функции показан на рис. 7.2.

Для неравенства $\Delta L/\rho > 2$ функция имеет аппроксимацию [Зеегофер, Шестаков, 1968]

$$f_L = 0.96 + 0.16 \frac{\Delta L}{\rho}$$
.

Для неравенства $\Delta L/\rho \le 2$ автором предложен следующий полином:

$$f_L = \left[1 - 0.00259435\frac{\Delta L}{\rho} + 0.1424847 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^2 - 0.04896219 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^3 + 0.0060177989 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^4\right].$$

Таблица 7.1.1

Таблица значений f_L и $\Delta L/\rho$

$\Delta L/\rho$	0.0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0
f_L	1.00	1.01	1.03	1.05	1.10	1.18	1.27	1.44

Величину дополнительного фильтрационного сопротивления русла реки можно определить по теоретической зависимости [Боревский и др., 1973]

$$\Delta L = \frac{\sqrt{Tm'/k'}}{\tanh\left(\frac{b}{\sqrt{Tm'/k'}}\right)}.$$
 (7.1.4)

Уравнения для периода стационара

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_L}{r} \,. \tag{7.1.5}$$

Частный случай для стационарного периода

Опытная и наблюдательная скважины находятся в створе, перпендикулярном реке [Зеегофер, Шестаков, 1968]:

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi T} \left[2\ln \frac{L_{w} + L_{p}}{L_{w} - L_{p}} + 4\exp \left(\frac{L_{w} + L_{p}}{\Delta L}\right) W \left(\frac{L_{w} + L_{p}}{\Delta L}\right) \right]. \tag{7.1.6}$$

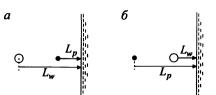


Рис. 7.3. Опытная и наблюдательная скважины находятся в створе, перпендикулярном реке.

или упрощенное решение [Боревский, и др., 1973]:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2(L_w + \Delta L) - r}{r} \,. \tag{7.1.7}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 7.1.2

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\frac{\lg s - \lg \frac{t}{r^2}}{\lg s - \lg t}$	$\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$ $a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание. $W'(u) = W(u) - W(ur'); r' = (\rho_L/r)^2$.

Способ прямой линии

Таблица 7.1.3

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Площадное прослеживание	$s-\lg \frac{\rho_L}{r}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho_{L,1}^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho_{L,2}^2}{4at}\right)}.$$
 (7.1.8)

Подбор пьезопроводности и сопротивления русла реки осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном сопротивлении русла реки:

$$T = \frac{0.366Q}{s_m} \lg \frac{\rho_L}{r} \,. \tag{7.1.9}$$

2. Определение проводимости по понижению на период стационара в наблюдательной скважине при известном сопротивлении русла реки и при нахождении опытной и наблюдательной скважин в створе, перпендикулярном реке:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_m} \left[2\ln \frac{L_w + L_p}{L_w - L_p} + 4\exp \left(\frac{L_w + L_p}{\Delta L} \right) W \left(\frac{L_w + L_p}{\Delta L} \right) \right]$$
(7.1.10)

или

$$T = \frac{0.366Q}{s_m} \lg \frac{2(L_w + \Delta L) - r}{r}.$$
 (7.1.11)

3. Определение сопротивления русла реки по понижению на период стационара при известной проводимости и при нахождении опытной и наблюдательной скважин в створе, перпендикулярном реке:

$$\Delta L = \frac{r}{2} \left(\exp \frac{2\pi T s_m}{Q} + 1 \right) - L_w. \tag{7.1.12}$$

- 4. Способ отношения понижений (определение подбором сопротивления русла реки по двум наблюдательным скважинам):
 - при произвольном расположении наблюдательных скважин

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\ln \frac{\rho_{L,1}}{r_1}}{\ln \frac{\rho_{L,2}}{r_2}};$$
(7.1.13)

 по наблюдательным скважинам, находящимся с опытной скважиной в створе, перпендикулярном реке,

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{\ln \frac{2(L_w + \Delta L) - r_1}{r_1}}{\ln \frac{2(L_w + \Delta L) - r_2}{r_2}}.$$
 (7.1.14)

Решение Hantush [1959a; Kruseman, Ridder, 1994]

При неизвестном сопротивлении русла реки и, следовательно, невозможности рассчитать координаты фиктивной скважины применяется алгоритм определения параметров по точке изгиба P графика временного прослеживания. Параметры определяются на основе ряда зависимостей:

 уравнения, связывающего геометрическое расположение скважин и сопротивление русла реки,

$$L_0^2 - L_0 \left(L_w - L_p \right) - 0.25 r^2 \left[\left(\frac{\rho}{r} \right)^2 - 1 \right] = 0,$$
 (7.1.15)

из решения уравнения (7.1.15) получаем

$$L_0 = \frac{1}{2} \left\{ \left(L_w - L_p \right) \pm \sqrt{\left(L_w - L_p \right)^2 + r^2 \left[\left(\frac{\rho}{r} \right)^2 - 1 \right]} \right\}, \tag{7.1.16}$$

где

$$L_0 = L_w + \Delta L \tag{7.1.17}$$

- расстояние от опытной скважины до гидравлической границы (см. рис. 7.1, б);
- значения аргумента в точке изгиба полулогарифмического графика $s-\lg t$

$$u_{p} = \frac{r^{2}S}{4\pi T t_{p}} = \frac{2\ln\frac{\rho}{r}}{\left(\frac{\rho}{r}\right)^{2} - 1};$$
 (7.1.18)

понижения в точке изгиба

$$s_p = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W(u_p) - W \left[u_p \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right] \right\}; \tag{7.1.19}$$

— максимального понижения (для времени $t > 4t_p$)

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r}; \qquad (7.1.20)$$

— наклона прямой на единичный логарифмический цикл на графике $s-\lg t$

$$\Delta s_p = \frac{2.3Q}{4\pi T} \left\{ \exp\left(-u_p\right) - \exp\left[-\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 u_p\right] \right\}; \tag{7.1.21}$$

– отношения понижения на период стационара s_m к величине наклона Δs_p

$$\frac{s_m}{\Delta s_p} = \frac{2\lg\frac{\rho}{r}}{\exp(-u_p) - \exp\left[-\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 u_p\right]} = f\left(\frac{\rho}{r}\right),\tag{7.1.22}$$

где $f(\beta)$ – табулированная функция в диапазоне β от 1 до 100 (табл. 7.1.4 [Kruseman, Ridder, 1994]).

Значения функции $f(\beta)$

Таблица 7.1.4

	٦
	-
•] /
	1
B	-
7	
:	1
	1
	1 10 100
	1 10 100 lg β
	()

Рис. 7.4. Зависимость функции $f(\beta)$ от $\lg \beta$.

		·					
β	f(b)	β	f(ß)	β	f(β)	β	f(β)
1.0	1.179	5.0	1.667	10	2.115	35	3.109
1.1	1.183	5.2	1.688	11	2.188	36	3.134
1.2	1.188	5.4	1.710	12	2.251	37	3.155
1.3	1.194	5.6	1.731	13	2.312	38	3.178
1.4	1.203	5.8	1.752	14	2.367	39	3.199
1.5	1.214	6.0	1.770	15	2.423	40	3.221
1.6	1.223	6.2	1.794	16	2.472	41	3.242
1.7	1.235	6.4	1.814	17	2.520	42	3.262
1.8	1.247	6.6	1.833	18	2.564	43	3.282
1.9	1.262	6.8	1.852	19	2.609	44	3.301
2.0	1.273	7.0	1.871	20	2.647	45	3.321
2.2	1.301	7.2	1.889	21	2.687	46	3.339
2.4	1.329	7.4	1.908	22	2.725	47	3.357
2.6	1.357	7.6	1.925	23	2.761	48	3.375
2.8	1.385	7.8	1.943	24	2.796	49	3.393
3.0	1.413	8.0	1.960	25	2.837	50	3.410
3.2	1.435	8.2	1.977	26	2.862	55	3.491
3.4	1.467	8.4	1.994	27	2.893	60	3.565
3.6	1.493	8.6	2.010	28	2.923	65	3.634
3.8	1.520	8.8	2.026	29	2.952	70	3.697
4.0	1.545	9.0	2.041	30	2.980	75	3.757
4.2	1.571	9.2	2.057	31	3.008	80	3.812
4.4	1.597	9.4	2.072	32	3.034	85	3.864
4.6	1.619	9.6	2.087	33	3.059	90	3.913
4.8	1.642	9.8	2.102	34	3.085	95	3.960
5.0	1.667	10	2.115	35	3.109	100	4.004

Для значений $\beta > 100$ функцию $f(\beta)$ можно аппроксимировать выражением $f(\beta) \approx 2 \lg(\beta)$ [Hantush, 1959а]. Для табулированного диапазона (табл. 7.1.4) автором предложена следующая аппроксимация:

для *β* ≤ 10

$$f(\beta) \approx \begin{pmatrix} 1.2789021 - 0.2928364\beta + 0.2591378\beta^2 - 0.07978534\beta^3 + \\ + 0.01383505\beta^4 - 0.001392048\beta^5 + 7.5701847 \cdot 10^{-5}\beta^6 - 1.7211559 \cdot 10^{-6}\beta^7 \end{pmatrix},$$

для 10 < β ≤ 100

$$f(\beta) \approx \begin{pmatrix} 1.1076706 + 0.1413395\beta - 0.00517978\beta^2 + 0.000135419\beta^3 - 2.2596387 \cdot 10^{-6}\beta^4 + \\ + 2.2786826 \cdot 10^{-8}\beta^5 - 1.2601295 \cdot 10^{-10}\beta^6 + 2.9250071 \cdot 10^{-13}\beta^7 \end{pmatrix}$$

Алгоритм определения параметров Hantush

- 1. Строим график (рис. 7.5) $s \lg t$.
- 2. Определяем максимальное понижение s_m .
- Проводим прямую линию на прямолинейном участке индикаторной кривой.
- 4. Определяем наклон прямой на единичный логарифмический цикл Δs_p .
- 5. По отношению $\frac{s_m}{\Delta s_p}$ (7.1.22) определяем функцию $f\left(\frac{\rho}{r}\right)$, находим ее аргумент и, следовательно, значение ρ .

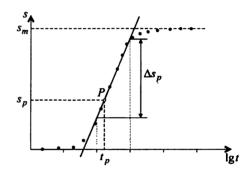


Рис. 7.5. График для определения фильтрационных параметров при откачке около реки.

6. Из уравнения (7.1.20) для понижения на период стационара s_m определяем проводимость T :

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \ln \frac{\rho}{r} \,. \tag{7.1.23}$$

- 7. Из выражения (7.1.18) определяем значение аргумента u_p .
- 8. По значениям ρ и u_p определяем понижение в точке изгиба s_p (7.1.19).
- 9. Снимем с графика значение времени в точке изгиба t_p (соответствует понижению s_p).
- 10. Из выражения для аргумента функции u_p (7.1.18) и при известных значениях времени t_p и проводимости T определяем водоотдачу S:

$$S = u_p \frac{4\pi T t_p}{r^2} \,. \tag{7.1.24}$$

- 11. Из выражения (7.1.16) при известном значении ho найдем L_0 .
- 12. Из выражения (7.1.17) определим сопротивление русла реки ΔL .

Подбор параметров

Таблица 7.1.5

Полбираемые	папаметры	u	рекомендуемые	графики
подопрасмые	HADAMCIDDE	n	PCRUMICHA J CMIDIC	IDAWNKN

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
7.1.2	$T, a, \Delta L$	$s-\lg t$
7.1.8	$a, \Delta L$	$s_1/s_2 - \lg t$

Замечание

При понижении уровня на величину менее 25% от первоначального напора h_0 и постоянстве емкости пласта решение для откачки у реки можно применять и для безнапорного пласта. Для этого вместо значения понижения в расчетах необходимо использовать приведенное понижение $s' = s - \frac{s^2}{2h_0}$ [Hantush, 1959a].

7.2. Полуограниченный в плане безнапорный пласт: граница III рода

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная бесконечная в плане представляет собой речную долину (граничное условие III рода);
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- фиктивная скважина: одна;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины (до речной долины);
- типовая схема [Hantush, 1955, 1965]: рис. 7.6.

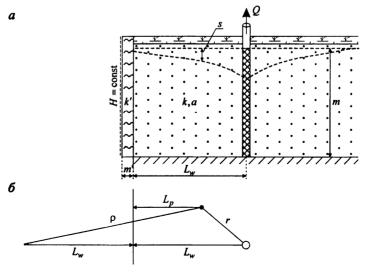


Рис. 7.6. Типовая схема безнапорного полуограниченного водоносного пласта с граничным условием III рода. a – разрез; δ – план.

<u>Литература:</u> Glover, Balmer, 1954; Hantush, 1955, 1965.

Условные обозначения:

a — уровнепроводность водоносного пласта, м²/сут;

 $B = \frac{k}{k'}m' - \text{параметр перетекания, м;}$

 $J^*(u, \beta_1, \beta_2)$ – специальная функция (Приложение 20);

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации русла реки, м/сут;

 L_{p} – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 L_{w} – расстояние от опытной скважины до границы, м;

т - начальная обводненная мощность водоносного пласта, м;

m' – мощность русла реки, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r - расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

t — время от начала откачки, сут;

u -аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $\beta_1, \, \beta_2 \, -$ аргументы функции;

ho — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной: определяется уравнением (7.2.1), м.

Определение расстояния до фиктивной скважины

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ . \tag{7.2.1}$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (7.2.2).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{\rho^2}{4at} \right) + J^* \left(u, \beta_1, \beta_2 \right) \right]}, \qquad (7.2.2)$$

$$u = \frac{(2L_w + L_p)^2}{4\sigma t},$$
 (7.2.3)

$$\beta_1 = \frac{2L_w + L_p}{B} \,, \tag{7.2.4}$$

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}}{2L_w + L_p}.$$
 (7.2.5)

***** Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 7.2.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
7.2.2	k, a	$s-\lg t$

7.3. Неограниченный в плане безнапорный водоносный пласт пересекает река

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, неограниченный в плане, делится на три зоны;
- водоносный пласт пересекает речная долина;
- первая зона: полуограниченная береговой линией зона, в которой находится опытная скважина;
- вторая зона: полуограниченная, находится на противоположном (относительно первой зоны) берегу;
- третья зона: ограниченная под руслом реки, ширина зоны равна ширине русла реки;
- фильтрационные свойства русла реки отличаются от свойств водоносного пласта;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- фиктивная скважина: одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины (отдельно для каждой зоны);
- типовая схема: рис. 7.7.

Литература: Бочевер, Гылыбов, 1966; Бочевер и др., 1968, 1969.

Условные обозначения:

$$B = \sqrt{\frac{km_3m'}{k'}} - \text{параметр перетекания, м;}$$

b – ширина реки, м;

 $F_R(\beta_1, \beta_2)$ – специальная функция (Приложение 10);

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации русла реки, м/сут;

 L_p — расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в первой зоне, до ближнего берега реки, м;

 L_{p2} , L_{p3} — расстояния от наблюдательных скважин, расположенных в первой и второй зонах, до ближнего к опытной скважине берега реки, м;

 L_{w} – расстояние от опытной скважины до ближнего берега реки, м;

m — начальная обводненная мощность водоносного пласта в первой и второй зонах, м;

m' – мощность русла реки, м;

 m_3 – мощность водоносного пласта под рекой (зона 3), м;

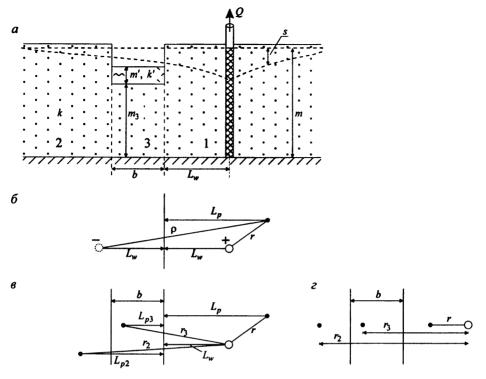


Рис. 7.7. Типовая схема безнапорного водоносного пласта (пласт пересскаст речная долина). a – разрез; δ , ϵ , ϵ – план: a – с фиктивной скважиной, ϵ – с наблюдательными скважинами, расположенными в различных зонах, ϵ – опытная и наблюдательная скважины находятся на одной линии в створе, перпендикулярном реке. Цифрами на разрезе показаны номера зон.

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r — расстояние от опытной скважины до наблюдательной, расположенной в первой зоне, м; $r_{1,1}$, $r_{1,2}$ — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, расположенных в первой зоне, м;

 r_2 , r_3 — расстояния от опытной скважины до наблюдательных скважин, расположенных во второй и третьей зонах, м;

 $s_m^{(i)}$ — понижение на период стационара в первой (i=1), второй (i=2) и третьей (i=3) зонах, м;

 $s_{m,1}^{(i)}, s_{m,2}^{(i)}$ — понижения на период стационара в первой (i=1), второй (i=2) и третьей (i=3) зонах в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 $W(\beta_1)$ – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $\alpha = \frac{m_3 \Delta L}{mB^2}$ – показатель несовершенства русла реки, 1/M;

 β_1 , β_2 – аргументы функций;

 ΔL — дополнительное фильтрационное сопротивление русла реки: определяется по формуле (7.1.3), м;

 ρ — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной: определяется уравнением (7.3.1), м;

 ρ_1, ρ_2 — расстояния от первой и второй наблюдательных скважин, расположенных в первой зоне, до фиктивной скважины, м.

Определение расстояния до фиктивной скважины

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ . \tag{7.3.1}$$

Список решений (для стационарного периода):

- понижения в 1-й, 2-й и 3-й зонах: уравнения (7.3.2), (7.3.4) и (7.3.5);
- понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в створе к реке и на одной линии с опытной скважиной: уравнения (7.3.6), (7.3.7) и (7.3.8).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения для периода стационара

1. Понижение в зоне 1

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi km} \left\{ + F_{R} \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p} \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r^{2} - \left(L_{w} - L_{p} \right)^{2}} \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] + F_{R} \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p} \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r^{2} - \left(L_{w} - L_{p} \right)^{2}} \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] \right\} \right\}$$

$$= \frac{Q}{2\pi km} \left\{ -\frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right\} \left[-\frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right] + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right]$$

$$= \frac{Q}{2\pi km} \left[-\frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right] + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right]$$

$$= \frac{Q}{2\pi km} \left[-\frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right] + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right]$$

$$\alpha = \frac{m_3 \Delta L}{mR^2} \,. \tag{7.3.3}$$

2. Понижение в зоне 2

$$S_{m}^{(2)} = \frac{Q}{2\pi km} \begin{cases} F_{R} \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b \right) \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r_{2}^{2} - \left(L_{w} + L_{p2} \right)^{2}} \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] - \left\{ -F_{R} \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b \right) \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r_{2}^{2} - \left(L_{w} + L_{p2} \right)^{2}} \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] \right\}. (7.3.4)$$

3. Понижение в зоне 3

$$S_{m}^{(3)} = \frac{Q}{2\pi km} \begin{cases} \frac{\sinh \frac{b - L_{p3}}{B} \ln \frac{\rho}{r_{3}} + \frac{\sinh \frac{b - L_{p3}}{B} + \sinh \frac{L_{p3}}{B}}{\sinh \frac{b}{B}} \times \\ \times F_{R} \left[\alpha L_{w} \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r_{3}^{2} - (L_{w} + L_{p3})^{2}} \left(1 + \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] + \\ + \frac{\sinh \frac{b - L_{p3}}{B} - \sinh \frac{L_{p3}}{B}}{\sinh \frac{b}{B}} \times \\ \times F_{R} \left[\alpha L_{w} \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right), \alpha \sqrt{r_{3}^{2} - (L_{w} + L_{p3})^{2}} \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{b}{B}} \right) \right] \end{cases}$$
(7.3.5)

Частные случаи для стационарного периода

Понижения для наблюдательных скважин, находящихся на одной линии с опытной скважиной, перпендикулярной реке (см. рис. 7.7, ε), соответственно для первой, второй и третьей зон

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi km} \left\{ -\exp\left[\alpha \left(L_{w} + L_{p}\right)\left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p}\right)\left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] + \exp\left[\alpha \left(L_{w} + L_{p}\right)\left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p}\right)\left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] + \exp\left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b\right)\left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b\right)\left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] - \exp\left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b\right)\left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha \left(L_{w} + L_{p2} - b\right)\left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] \right\}, (7.3.7)$$

$$s_{m}^{(3)} = \frac{Q}{2\pi km} \left\{ \times \exp\left[\alpha L_{w} \left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha L_{w} \left(1 + \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] + \frac{\sinh\frac{b - L_{p3}}{B} + \sinh\frac{L_{p3}}{B}}{\sinh\frac{b}{B}} + \frac{\sinh\frac{b - L_{p3}}{B} - \sinh\frac{L_{p3}}{B}}{\sinh\frac{b}{B}} \exp\left[\alpha L_{w} \left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha L_{w} \left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] W \left[\alpha L_{w} \left(1 - \frac{1}{\cosh\frac{b}{B}}\right)\right] \right\}. (7.3.8)$$

Способы обработки откачки

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации водоносного пласта при известном параметре перетекания и сопротивлении русла реки:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s^{(i)}} f, (7.3.9)$$

где f – выражение в фигурных скобках уравнений (7.3.2), (7.3.4) – (7.3.8).

- 2. Определение подбором параметра перетекания и сопротивления русла реки при известном коэффициенте фильтрации водоносного пласта. Для подбора используются уравнения (7.3.2), (7.3.4) (7.3.8).
- 3. Способ отношения понижений: определение подбором параметра перетекания и сопротивления русла реки:

$$\frac{s_{m,1}^{(i)}}{s_{m,2}^{(i)}} = \frac{f_1}{f_2},\tag{7.3.10}$$

где f_1 и f_2 – выражения в фигурных скобках уравнений (7.3.2), (7.3.4) – (7.3.8) для первой и второй наблюдательных скважин. В уравнении (7.3.10) возможно использовать отношение понижений в наблюдательных скважинах, расположенных в разных зонах.

4. Способ разности понижений. Способ применяется для наблюдательных скважин, расположенных в первой зоне. Проекция расстояния между наблюдательной и отраженной скважинами на ось, перпендикулярную руслу реки, должна быть больше, чем проекция расстояния между опытной и наблюдательной скважинами на ось, параллельную руслу реки: $(L_w + L_p) > \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$.

$$s_{m,1}^{(1)} - s_{m,2}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r_{1,2}\rho_1}{r_{1,1}\rho_2}.$$
 (7.3.11)

7.4. Скважина под рекой

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: изотропный, неограниченный в плане, пласт пересекает речная долина;
- связь водоносного пласта с рекой является прямой;
- опытная скважина: находится под руслом реки;
- понижение определяется в опытной скважине;
- типовая схема: рис. 7.8.

Литература: Биндеман, 1951; Бабушкин, 1954б.

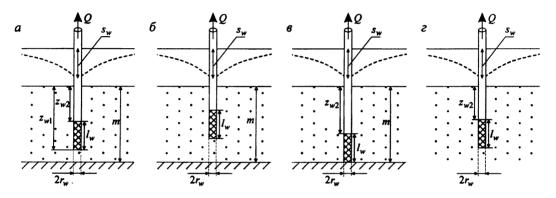


Рис. 7.8. Типовая схема для откачки под руслом реки.

a – произвольное расположение фильтра опытной скважины; δ – фильтр опытной скважины находится посередине водоносного пласта, s – примыкает к подошве водоносного пласта; e – водоносный пласт, полуограниченный в разрезе.

Условные обозначения:

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

 k_1, k_2 — коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего пластов, м/сут;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

m — мощность водоносного пласта под руслом реки, м;

 m_1, m_2 — мощности верхнего и нижнего пластов, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 $r_{\rm w}$ – радиус фильтра опытной скважины, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 z_{wl} – расстояние от дна русла реки до низа фильтра опытной скважины, м;

 z_{w2} – расстояние от дна русла реки до верха фильтра опытной скважины, м.

Список решений (для стационарного периода):

- понижение в опытной скважине: уравнения (7.4.1) (7.4.4);
- понижение в опытной скважине для двухслойного пласта: уравнение (7.4.5).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения для периода стационара

Понижение в опытной скважине [Бабушкин, 19546]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\ln \frac{0.75 l_w \sqrt{m - z_{w1} + 0.75 l_w}}{r_w \sqrt{m - z_{w1} + 0.25 l_w}} - \frac{1}{2} \ln \frac{(z_{w2} + 0.75 l_w)(m + 0.25 l_w)}{(z_{w2} + 0.25 l_w)(m - 0.25 l_w)} \right]. \quad (7.4.1)$$

Частные случаи для стационарного периода

Понижение в опытной скважине:

- фильтр скважины находится посередине водоносного пласта (см. рис. 7.8, б)

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{0.5 l_w}{r_w} - \frac{1}{2} \operatorname{arcsinh} \frac{2m + 0.5 l_w}{r_w} + \frac{1}{2} \operatorname{arcsinh} \frac{2m - 0.5 l_w}{r_w} \right]; \quad (7.4.2)$$

- фильтр скважины примыкает к подошве водоносного пласта (рис. 7.8, e)

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\operatorname{arcsinh} \frac{l_w}{r_w} + \operatorname{arcsinh} \frac{2m - 0.5 l_w}{r_w} - \operatorname{arcsinh} \frac{2m}{r_w} \right]; \tag{7.4.3}$$

 пласт полуограничен в разрезе (влияние откачки не доходит до нижней границы водоносного пласта) (рис. 7.8, г)

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi k l_w} \left[\ln \frac{0.66 l_w \sqrt{z_{w2} + 0.45 l_w}}{r_w \sqrt{z_{w2} + 1.9 l_w}} \right]. \tag{7.4.4}$$

Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации водоносного пласта:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s_{mw}} f , \qquad (7.4.5)$$

где f – выражение в квадратных скобках уравнений (7.4.1) - (7.4.4).

Замечание

Если под руслом реки находится слой с коэффициентом фильтрации, отличающимся от коэффициента фильтрации основного пласта (рис. 7.9), то понижение в совершенной по степени вскрытия скважине на период стационара определяется следующей зависимостью [Биндеман, 1951]:

$$s_{mw} = \frac{Q}{2.72k_2m_2} \lg \left(\frac{1.12}{r_w} \sqrt{\frac{k_2}{k_1} m_2 m_1} \right). \quad (7.4.6)$$

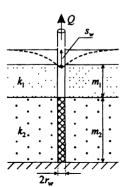


Рис. 7.9. Типовая схема для откачки в двухслойной системе под руслом реки.

РАЗДЕЛ 8. ДВУХСЛОЙНЫЕ ВОДОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

8.1. Двухслойный безнапорный анизотропный комплекс

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух пластов разной проницаемости;
- граница: комплекс неограничен в плане;
- верхний пласт: безнапорный, слабопроницаемый, изотропный;
- нижний пласт: напорный, хорошо проницаемый, профильно-анизотропный;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия, находится в хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется в любой точке хорошо проницаемого пласта;
- поток в верхнем пласте вертикальный;
- типовая схема: рис. 8.1.

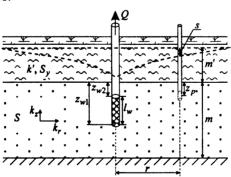


Рис. 8.1. Типовая схема двухслойного безнапорного комплекса (разрез).

Литература: Boulton, Streltsova, 1975.

Условные обозначения:

b – безразмерный параметр: определяется уравнением (8.1.6);

 C_1, C_2, C_3 – константы;

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k' -коэффициент фильтрации слабопроницаемого пласта, м/сут;

к, - горизонтальный коэффициент фильтрации хорошо проницаемого пласта, м/сут;

 k_z – вертикальный коэффициент фильтрации хорошо проницаемого пласта, м/сут;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

т – мощность хорошо проницаемого пласта, м;

m' – начальная обводненная мощность слабопроницаемого пласта, м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

S – упругая водоотдача хорошо проницаемого пласта;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача слабопроницаемого пласта;

s — понижение в наблюдательной скважине, м;

t — время от начала откачки, сут;

 z_p — вертикальное расстояние от кровли хорошо проницаемого пласта до середины фильтра наблюдательной скважины, м;

 z_{w1} , z_{w2} — вертикальные расстояния от кровли хорошо проницаемого пласта до дна и верха фильтра опытной скважины, м;

 β – артумент функции;

$$\zeta_0$$
 – положительный корень уравнения $(C_3-\zeta_0^2-C_1C_2)\zeta_0 \sinh\zeta_0+C_1(\gamma-\zeta_0^2)\cosh\zeta_0=0$; ζ_n – положительный корень уравнения $(C_3+\zeta_n^2-C_1C_2)\zeta_n \sin\zeta_n-C_1(C_3+\zeta_n^2)\cos\zeta_n=0$; $\sigma=S/S_\gamma$ – безразмерный параметр;

 $\chi = \sqrt{k_z \, / k_r} \, -$ коэффициент профильной анизотропии хорошо проницаемого пласта; $\psi_0(\tau), \psi_n(\tau) \, -$ определяются уравнениями (8.1.2) и (8.1.3).

Список решений (для хорошо проницаемого пласта):

- понижение для нестационарного периода: уравнение (8.1.1).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{\pi k_r l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\chi \frac{r}{m} \right) \left[\psi_0(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \psi_n(\tau) \right] d\tau , \qquad (8.1.1)$$

где

$$\psi_{0}(\tau) = \begin{cases}
\frac{\sinh\left(\zeta_{0} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sinh\left(\zeta_{0} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\left[1 + \frac{b(\tau^{2} - \zeta_{0}^{2})}{\tau^{2} - \zeta_{0}^{2} - b\sigma}\right] \sinh \zeta_{0} + \left[1 + \frac{2b^{2}\sigma}{\left(\tau^{2} - \zeta_{0}^{2} - b\sigma\right)^{2}}\right] \zeta_{0} \cosh \zeta_{0}} \times \\
\times \frac{\cosh\left(\zeta_{0} \frac{m - z_{p}}{m}\right) \left\{1 - \exp\left[-\left(\tau^{2} - \zeta_{0}^{2}\right) \frac{tk_{r}}{Sm}\right]\right\}}{\left(\tau^{2} - \zeta_{0}^{2}\right) \cosh \zeta_{0}}
\end{cases} , (8.1.2)$$

$$\psi_{n}(\tau) = \begin{cases} \frac{\sin\left(\zeta_{n} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sin\left(\zeta_{n} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\left[1 + \frac{b\left(\tau^{2} + \zeta_{n}^{2}\right)}{\tau^{2} + \zeta_{n}^{2} - \sigma}\right] \sin \zeta_{n} + \left[1 + \frac{2b^{2}\sigma}{\left(\tau^{2} + \zeta_{n}^{2} - b\sigma\right)^{2}}\right] \zeta_{n} \cos \zeta_{n}} \times \\ \frac{\cos\left(\zeta_{n} \frac{m - z_{p}}{m}\right) \left\{1 - \exp\left[-\left(\tau^{2} - \zeta_{n}^{2}\right) \frac{tk_{r}}{Sm}\right]\right\}}{\left(\tau^{2} + \zeta_{n}^{2}\right) \cos \zeta_{n}} \end{cases}$$
(8.1.3)

 ζ_0 – положительный корень уравнения

$$(\tau^2 - \zeta_0^2 - b\sigma)\zeta_0 \sinh \zeta_0 + b(\tau^2 - \zeta_0^2)\cosh \zeta_0 = 0, \qquad (8.1.4)$$

 ζ_n – положительный корень уравнения

$$\left(\tau^2 + \zeta_n^2 - b\sigma\right)\zeta_n \sin\zeta_n - b\left(\tau^2 + \zeta_n^2\right)\cos\zeta_n = 0, \qquad (8.1.5)$$

$$b = \frac{k'm}{k_{-}m'}. (8.1.6)$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 8.1.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
8.1.1	k_r, k_z, S, k', S_y	$s - \lg t$

8.2. Двухслойный безнапорный изотропный комплекс

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух пластов разной проницаемости;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- верхний пласт: безнапорный, слабопроницаемый, изотропный;
- нижний пласт: напорный, хорошо проницаемый, изотропный;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в хорошо проницаемом и слабопроницаемом пластах;
- поток в верхнем пласте вертикальный;
- типовая схема: рис. 8.2.

Рассматривается два варианта:

вариант 1: капиллярная кайма не учитывается;

вариант 2: капиллярная кайма учитывается в расчетах понижения уровня.

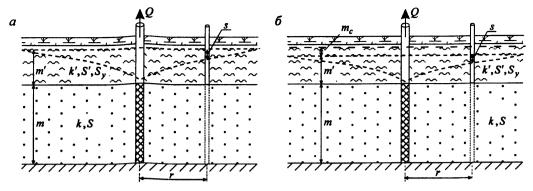


Рис. 8.2. Типовая схема (разрез) двухслойного безнапорного комплекса. *a* – без учета капиллярной каймы: *б* – с учетом капиллярной каймы.

<u>Литература:</u> Баренблатт, 1954; Hantush, 1960; Шестаков, 1965; Моркос, Шестаков, 1966; Мироненко, Сердюков, 1968; Cooley, Case, 1973; Streltsova, 1973; Мироненко, Шестаков, 1978; Шестаков, Невечеря, 1998.

Условные обозначения:

a = T/S – пьезопроводность хорошо проницаемого пласта, м²/сут;

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}$$
 – параметр перетекания, м;

$$B_c = \sqrt{\frac{T(m' + m_c)}{k'}}$$
 — параметр перетекания с учетом капиллярной каймы, м;

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $F_{Sh}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 12);

 $F'_{Sh}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 13);

 $H(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 17);

 $H_c(u,\beta)$ – специальная функция: определяется уравнением (8.2.22);

h' – расчетная мощность безнапорного слабопроницаемого пласта, м;

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k -коэффициент фильтрации хорошо проницаемого пласта, м/сут;

k' -коэффициент фильтрации слабопроницаемого пласта, м/сут;

m - мощность хорошо проницаемого пласта, м;

m' – начальная обводненная мощность слабопроницаемого пласта, м;

 m_c — высота капиллярной каймы, расположенной над уровнем грунтовых вод, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

R — радиус влияния, м;

R(t) — условный радиус влияния, зависящий от времени: определяется уравнением (8.2.2) или (8.2.3), м;

r - расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 – расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

S – упругая водоотдача хорошо проницаемого пласта;

S' – упругая водоотдача слабопроницаемого пласта;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача слабопроницаемого пласта;

s — понижение в наблюдательной скважине, находящейся в верхнем или нижнем водоносном пласте, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, находящихся в нижнем водоносном пласте, м;

T = km – проводимость хорошо проницаемого пласта, м²/сут;

время от начала откачки, сут;

u — аргумент функций;

 u_v – безразмерный параметр: определяется уравнением (8.2.15);

 β – аргумент функций;

 η, η_2 — безразмерные параметры: определяются уравнениями (8.2.19) и (8.2.20);

 μ , μ_2 – безразмерные параметры: определяются уравнениями (8.2.17) и (8.2.18).

Список решений (для хорошо проницаемого пласта):

- понижение для нестационарного периода в хорошо проницаемом пласте: уравнения (8.2.1) и (8.2.6);
- понижение в хорошо проницаемом пласте для времени окончания первого участка индикаторной кривой: уравнение (8.2.4);
- понижение в верхнем слабопроницаемом пласте: уравнение (8.2.7).

Откачка с постоянным расходом (без учета капиллярной каймы)

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Мироненко, Сердюков, 1968]

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R(t)}{r} + \frac{r}{R(t)} - 1 \right), \tag{8.2.1}$$

где

$$R(t) = \sqrt{\frac{12T}{S_y + S}} \left\{ t + \frac{m'S_y^2}{k'(S_y + S)} \left[1 - \exp\left(-\frac{(S_y + S)k'}{S_y Sm'}t\right) \right] \right\}.$$
 (8.2.2)

Решение (8.2.1) используется для наблюдательных скважин, находящихся на расстояниях меньше условного радиуса влияния: $r \leq R(t)$. В противном случае понижение принимается нулевым.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для ложностационарного и гравитационного периодов откачки (второй и третий участки индикаторной кривой) выражение (8.2.2) для условного радиуса влияния (*R*) упрощается [Мироненко, Шестаков, 1978]:

$$R(t) = \sqrt{\frac{12T}{S_y} \left(t + \frac{S_y m}{k'} \right)} . \tag{8.2.3}$$

2. Для ложностационарного режима

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B}\right),\tag{8.2.4}$$

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}} \,. \tag{8.2.5}$$

Замечание

В.М. Шестаков [1965; *Моркос*, *Шестаков*, 1966] приводит более сложные решения для понижения уровня в наблюдательных скважинах, находящихся в верхнем или нижнем водоносном пласте.

Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в нижнем хорошо проницаемом пласте.

$$s = \frac{Q}{2\pi T} F_{Sh} \left(\frac{r}{\sqrt{at}}, \frac{k't}{Sm'} \right). \tag{8.2.6}$$

Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в верхнем безнапорном слабопроницаемом пласте,

$$s = \frac{Q}{2\pi T} F'_{Sh} \left(\frac{r}{\sqrt{at}}, \frac{k't}{Sh'} \right), \tag{8.2.7}$$

где $h' \approx \left(m' - \frac{Qt}{S\pi R^2}\right)$ — расчетная мощность безнапорного пласта, м; πR^2 — площадь, на которую распространяется откачка.

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 8.2.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Параметр перетекания, м
$\lg s - \lg r$	$\lg K_0(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	$B=10^{-E}$

Примечания Понижения берутся для времени окончания первого участка индикаторной кривой.

Точечные способы (для времени окончания первого участка индикаторной кривой)

1. Определение проводимости при известном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{8.2.8}$$

2. Отношение понижений: определение подбором параметра перетекания:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{K_0(r_1/B)}{K_0(r_2/B)}. (8.2.9)$$

3. Разность понижений

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1 - r_2}{R(t)} \right). \tag{8.2.10}$$

На большие моменты времени, когда $R(t) >> (r_1 - r_2)$, вторым слагаемым в круглых скобках уравнения (8.2.10) можно пренебречь:

$$s_1 - s_2 \approx \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$
 (8.2.11)

Определение проводимости хорошо проницаемого пласта по понижениям в двух наблюдательных скважинах на большие моменты времени:

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (8.2.12)

Подбор параметров

Таблица 8.2.2 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
8.2.1 и 8.2.2	T, S, S_y, k'	$s - \lg t$
8.2.1 и 8.2.3	T, S_y, k'	$s - \lg t$
8.2.4	T, k'	$s - \lg r$
8.2.6, 8.2.7	T, S, k'	$s-\lg t$

Замечания

- 1. Для первого участка индикаторной кривой можно использовать все способы обработки для схемы Тейса (см. раздел 2.1). При этом определяются параметры проводимости и пьезопроводности хорошо проницаемого водоносного пласта.
- 2. Для первого и второго участков индикаторной кривой можно использовать все способы обработки, которые применяются для водоносного пласта с перетеканием с постоянным уровнем в смежном пласте (см. раздел 8.1). При этом определяются параметры проводимости и пьезопроводности хорошо проницаемого водоносного пласта и коэффициента фильтрации слабопроницаемого безнапорного пласта.

Откачка с постоянным расходом (с учетом капиллярной каймы)

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации (частные случаи) [Cooley, Case, 1973]

1. Понижение в наблюдательной скважине для малых значений времени $t \le 0.1 \cdot m'S'/k'$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{4B_c} \sqrt{\frac{S'}{S}} \right], \tag{8.2.13}$$

2. Понижение в наблюдательной скважине для больших значений времени $t \ge 10 \cdot m'S'/k'$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\mu}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} 1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2}}{u_{y}}\right) \times \\ \times \left(\cosh \mu_{2} + \frac{(r/B_{c})^{2} \eta - 4\eta_{2}^{2} \tau^{2}}{\sqrt{16\eta_{2}^{4} \tau^{4} - (r/B_{c})^{2} \left[8\eta_{2}^{2} \tau^{2} - \eta(r/B_{c})^{2}\right]}} \sinh \mu_{2} \right) \right\} \times d\tau, (8.2.14)$$

$$\times J_{0} \left(\sqrt{\frac{8\tau^{2}}{\eta} - \frac{(r/B_{c})^{2}}{\eta_{2}^{2}}} \right) \frac{16\eta_{2}^{2} \tau}{8\eta_{2}^{2} \tau^{2} - \eta(r/B_{c})^{2}}$$

где

$$u_y = r^2 \frac{S + S' + S_y}{4Tt}, \qquad (8.2.15)$$

$$B_c = \sqrt{\frac{T(m' + m_c)}{k'}}, (8.2.16)$$

$$\mu = \frac{r}{B_c} \sqrt{\frac{\eta}{8\eta_2^2}} \,, \tag{8.2.17}$$

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{16\eta_2^4 \tau^4 - (r/B_c)^2 \left[8\eta_2^2 \tau^2 - \eta(r/B_c)^2\right]}}{4u_v \eta_2^2},$$
(8.2.18)

$$\eta = \left(S + S' + S_y\right) \frac{m' + m_c}{S(m' + m_c) + S'm_c}, \tag{8.2.19}$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{S_y}{S + S' + S_y}} \ . \tag{8.2.20}$$

3. Упрощенное решение уравнения (8.2.14):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H_c \left(\frac{r^2 S_y}{4Tt}, \frac{r}{B_c} \right), \tag{8.2.21}$$

$$H_c(u,\beta) = \int_0^\infty \frac{2J_0(2\tau)}{\tau} \left[1 - \frac{(r/B_c)^2}{(r/B_c)^2 + 4\tau^2} \exp\left(-\frac{(r/B_c)^2 \tau^2}{u_y(r/B_c)^2 + 4\tau^2} \right) \right] d\tau.$$
 (8.2.22)

Замечание

Время, в течение которого проявляется влияние капиллярной каймы, определяется следующим соотношением: $t = 16 \cdot S_v m_c / k'$.

***** Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 8.2.3 Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
8.2.13	T, S, S', k'	
8.2.14	T, S, S', S_y, k'	$s-\lg t$
8.2.21	T, S_y, k'	

8.3. Круговой двухслойный комплекс

8.3.1. Круговой комплекс: два пласта с разными фильтрационными свойствами

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух напорных изотропных слоев хорошо проницаемого (основной) и слабопроницаемого (смежный) пластов;
- граница: круговая обеспеченного питания (условие І рода);
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в хорошо проницаемом пласте в центре кругового пласта, емкость скважины может учитываться;
- понижение определяется в водоносном комплексе на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовые схемы: рис. 8.3.

Рассматривается два варианта:

вариант 1: верхний пласт слабопроницаемый, нижний хорошо проницаемый; уровень находится на кровле слабопроницаемого пласта и не меняется во времени; т.е. понижение на кровле водоносного комплекса равно нулю и не меняется в течение всего опробования; вариант 2: верхний пласт хорошо проницаемый, нижний слабопроницаемый; напорная система.

<u>Литература:</u> *Hantush*, *Jacob*, 1955с.

Условные обозначения:

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}} - \text{параметр перетекания, м;}$$

 $J_0(\beta)$ -функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $J_1(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

k – коэффициент фильтрации хорошо проницаемого водоносного пласта, м/сут;

k' - коэффициент фильтрации слабопроницаемого водоносного пласта, м/сут;

 \bar{k} – средний коэффициент фильтрации по двум пластам: см. уравнение (8.3.10), м/сут;

 k_1, k_2 — коэффициенты фильтрации первого (верхнего) и второго (нижнего) пластов с близкими фильтрационными свойствами, м/сут;

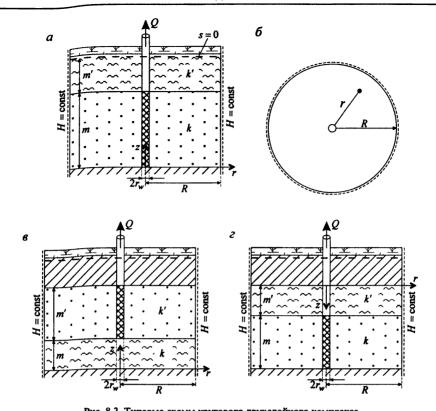


Рис. 8.3. Типовые схемы кругового двухслойного комплекса.

а – безнапорный комплекс: уровень в слабопроницаемом пласте не меняется в процессе опробования;

б – план кругового пласта; в, г – напорный комплекс: хорошо проницаемый пласт находится в кровле (в)

или подошве (г) комплекса.

т, т – мощности хорошо проницаемого и слабопроницаемого пластов, м;

 m_1, m_2 — мощности первого и второго пластов с близкими фильтрационными свойствами, м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

R – радиус кругового пласта (расстояние от центра опытной скважины до границы), м;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, находящейся в основном или смежном пласте, м;

 r_{w} – радиус опытной скважины, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине, находящейся в хорошо проницаемом водоносном пласте на период стационара, м;

 s'_{m} — понижение в наблюдательной скважине, находящейся в слабопроницаемом водоносном пласте на период стационара, м;

 $s_{\it mw}$ — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

T – проводимость хорошо проницаемого водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

t — время от начала откачки, сут;

 x_n – корни уравнения $J_0(x_n) = 0$ (Приложение 33);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

z — вертикальное расстояние от подошвы двухслойной системы (или от кровли для варианта 2 для случая, когда слабопроницаемый пласт перекрывает хорошо проницаемый) до точки наблюдения, м;

 β – аргумент функций;

$$\varsigma_n$$
 – корни уравнения $J_1(\varsigma_n)Y_0\left(\frac{R}{r_w}\varsigma_n\right) - J_0\left(\frac{R}{r_w}\varsigma_n\right)Y_1(\varsigma_n) = 0$ (Приложение 36).

Список решений (период стационара):

Вариант 1

- понижение в хорошо проницаемом пласте: уравнения (8.3.1) и (8.3.3);
- понижение в слабопроницаемом пласте: уравнения (8.3.2) и (8.3.4).

Вариант 2

- понижение в хорошо проницаемом пласте: уравнения (8.3.5) и (8.3.7);
- понижение в слабопроницаемом пласте: уравнения (8.3.6) и (8.3.8).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Вариант 1: безнапорный двухслойный комплекс (см. рис. 8.3, a, b)

Уравнения стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине, находящейся

- в хорошо проницаемом водоносном пласте:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cosh\left(x_{n} \frac{m'}{R}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{z}{R}\right) J_{0}\left(x_{n} \frac{r}{R}\right)}{x_{n}^{2} J_{1}^{2}\left(x_{n}\right) \left[\left(1 + \frac{k'}{k}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{m+m'}{R}\right) - \left(1 - \frac{k'}{k}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{m-m'}{R}\right)\right]} \right\}; (8.3.1)$$

- в слабопроницаемом водоносном пласте:

$$s'_{m} = \frac{Q}{\pi T} 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(x_{n} \frac{m}{R}\right) \sinh\left(x_{n} \frac{m+m'-z}{R}\right) J_{0}\left(x_{n} \frac{r}{R}\right)}{x_{n}^{2} J_{1}^{2}\left(x_{n}) \left[\left(1+\frac{k'}{k}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{m+m'}{R}\right) - \left(1-\frac{k'}{k}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{m-m'}{R}\right)\right]}. \quad (8.3.2)$$

Частные случаи для стационарного периода Для малых значений отношения k'/k и для неравенства (m+m') << R уравнения (8.3.1) и (8.3.2) можно записать в упрощенной форме:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \ln \frac{R}{r} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{0}\left(x_{n} \frac{r}{R}\right)}{x_{n}^{2} J_{1}^{2}\left(x_{n}\right) \left(\left(x_{n} \frac{B}{R}\right)^{2} + 1\right)} \right\}, \tag{8.3.3}$$

$$s'_{m} = \frac{Q}{\pi T} \frac{km(m+m'-z)}{k'R^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{0}\left(x_{n} \frac{r}{R}\right)}{J_{1}^{2}\left(x_{n}\right)\left[\left(x_{n} \frac{B}{R}\right)^{2}+1\right]}.$$
 (8.3.4)

В а р и а н т 2: напорный двухслойный комплекс (см. рис. 8.3, e, z, δ)

Уравнения стационарного периода

- 1. Решения, не учитывающие емкости опытной скважины:
 - понижение в хорошо проницаемом водоносном пласте

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \ln \frac{R}{r} - 4\frac{k'}{k} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(x_{n}\frac{m'}{R}\right)\cosh\left(x_{n}\frac{m+m'-z}{R}\right)J_{0}\left(x_{n}\frac{r}{R}\right)}{x_{n}^{2}J_{1}^{2}\left(x_{n}\right)\left[\left(\frac{k'}{k}+1\right)\sinh\left(x_{n}\frac{m+m'}{R}\right)+\left(\frac{k'}{k}-1\right)\sinh\left(x_{n}\frac{m'-m}{R}\right)\right]} \end{cases}; (8.3.5)$$

- понижение в слабопроницаемом водоносном пласте

$$s'_{m} = \frac{Q}{\pi T} 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(x_{n} \frac{m}{R}\right) \cosh\left(x_{n} \frac{z}{R}\right) J_{0}\left(x_{n} \frac{r}{R}\right)}{x_{n}^{2} J_{1}^{2}\left(x_{n} \sqrt{\left(\frac{k'}{k} + 1\right) \sinh\left(x_{n} \frac{m + m'}{R}\right) + \left(\frac{k'}{k} - 1\right) \sinh\left(x_{n} \frac{m' - m}{R}\right)\right]}.$$
 (8.3.6)

- 2. Решения, учитывающие емкость опытной скважины:
 - понижение в хорошо проницаемом водоносном пласте

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \ln \frac{R}{r} + 4 \frac{k'}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{J_{1}(\varsigma_{n})J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)}{\varsigma_{n}\left[J_{1}^{2}(\varsigma_{n}) - J_{0}^{2}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)\right]} \times \left[Y_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{r}{r_{w}}\right) - Y_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{r}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)\right] \times \frac{\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m'}{r_{w}}\right)\cosh\left(\varsigma_{n} \frac{m+m'-z}{r_{w}}\right)}{\left(\frac{k'}{k} + 1\right)\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m+m'}{r_{w}}\right) + \left(\frac{k'}{k} - 1\right)\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m'-m}{r_{w}}\right)} \right\}; (8.3.7)$$

- понижение в слабопроницаемом водоносном пласте

$$s'_{m} = \frac{Q}{\pi T} 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{J_{1}(\varsigma_{n})J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)}{\varsigma_{n} \left[J_{1}^{2}(\varsigma_{n}) - J_{0}^{2}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)\right]} \times \left[Y_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{r}{r_{w}}\right) - Y_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{r}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)\right] \times \frac{\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m}{r_{w}}\right)\cosh\left(\varsigma_{n} \frac{z}{r_{w}}\right)}{\left(\frac{k'}{k} + 1\right)\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m + m'}{r_{w}}\right) + \left(\frac{k'}{k} - 1\right)\sinh\left(\varsigma_{n} \frac{m' - m}{r_{w}}\right)} \right]$$
(8.3.8)

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 8.3.1 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
8.3.1, 8.3.3, 8.3.5, 8.3.7	k, k'	$s_m - \lg r$
8.3.2, 8.3.4, 8.3.6, 8.3.8	, x, x	$s'_m - \lg r$

8.3.2. Круговой комплекс: два пласта с близкими фильтрационными свойствами

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: два изотропных водоносных пласта разной проницаемости, ограничен круговой границей;
- граница: круговая обеспеченного питания (условие І рода);
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, вскрывает два пласта, находится в центре кругового пласта, емкость скважины не учитывается;
- определяется осредненное понижение водоносного комплекса в опытной скважине;
- типовая схема: рис. 8.4.

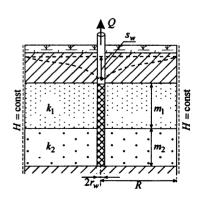


Рис. 8.4. Типовая схема (разрез) двухслойного напорного комплекса, окруженного круговой границей обеспеченного питания.

Литература: Щелкачев, Лапук, 1949.

Список решений (период стационара):

- осредненное понижение в опытной скважине: уравнение (8.3.9).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения стационарного периода

$$\overline{s_{mw}} = \frac{Q}{2\pi(k_1 m_1 + k_2 m_2)} \ln \frac{R}{r_w}.$$
 (8.3.9)

Если принять за средний коэффициент фильтрации

$$\bar{k} = \frac{k_1 m_1 + k_2 m_2}{k_1 + k_2},\tag{8.3.10}$$

то уравнение (8.3.9) записывается в виде

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi \bar{k}} \ln \frac{R}{r_w}. \tag{8.3.11}$$

Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение среднего коэффициента фильтрации по понижению в опытной скважине на период стационара:

$$\bar{k} = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{R}{r_w}.$$
(8.3.12)

8.4. Двухслойный комплекс, разделенный непроницаемым слоем

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: два водоносных пласта разной проницаемости разделены непроницаемым слоем, комплекс неограничен в плане;
- перетекание между водоносными пластами осуществляется через опытную скважину;
- верхний водоносный пласт (пласт 1): напорный или безнапорный, однородный, изотропный;
- нижний водоносный пласт (пласт 2): напорный, однородный, изотропный;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, вскрывает два пласта;
- понижения и расходы определяются для каждого водоносного пласта на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовые схемы: рис. 8.5 8.8.

Рассматривается четыре варианта:

вариант 1: верхний пласт напорный, начальные уровни в водоносных пластах совпадают; вариант 2: верхний пласт напорный, начальные уровни в водоносных пластах различны, откачка началась через некоторое время после проходки скважины;

- **вариант 3**: **вер**хний пласт безнапорный, начальные уровни в водоносных пластах совпадают;
- вариант 4: верхний пласт безнапорный, начальные уровни в водоносных пластах различны; здесь рассматриваются два случая: откачка началась сразу после проходки скважины и через некоторое время после проходки скважины.

Литература: Papadopulos, 1966; Abdul Khader, Veerankutty, 1975; Wikramaratna, 1984.

Условные обозначения:

 $A(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 1);

 a_1 – пьезопроводность (уровнепроводность) верхнего водоносного пласта, м²/сут;

 a_2 – пьезопроводность нижнего водоносного пласта, м²/сут;

 $B(u, \beta_1, \beta_2)$ – специальная функция (Приложение 3);

 $E(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$ — специальная функция: определяется уравнением (8.4.3);

 $F(\beta_2,\beta_3,\beta_4)$ – специальная функция: определяется уравнением (8.4.4);

G(u) – специальная функция (Приложение 15);

 h_{w} – уровень воды в скважине, отсчитанный от подошвы верхнего пласта, м;

 $J_0(eta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $J_1(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 ${\it k}_{1}, {\it k}_{2}$ – коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего водоносных пластов, м/сут;

 m_1 — мощность верхнего напорного пласта или начальная обводненная мощность верхнего безнапорного пласта, м;

 m_2 – мощность нижнего пласта, м;

 $P(u, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$ — специальная функция: определяется уравнением (8.4.19);

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 $Q^{(1)}, Q^{(2)}$ — расходы, поступающие в опытную скважину из верхнего и нижнего водоносных пластов, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, находящейся в основном или смежном пласте, м;

 r_c – радиус обсадной трубы опытной скважины, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

 $S(u, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$ – специальная функция: определяется уравнением (8.4.20);

 S_1, S_2 — водоотдачи верхнего и нижнего водоносных пластов;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача верхнего водоносного пласта;

 $s^{(1)}$, $s^{(2)}$ — изменения уровней в верхнем и нижнем водоносных пластах, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

 T_1 , T_2 — проводимости верхнего и нижнего водоносных пластов, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_0 — время, через которое началась откачка после проходки скважины, сут;

u – аргумент функций;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 β , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 – аргументы функций;

 ΔH – разность между начальными напорами в двух пластах, м;

 $\varphi(t)$ – определяется уравнением (8.4.38);

 $\varphi_1 \div \varphi_8$ — определяются уравнениями (8.4.5) — (8.4.12);

 $\psi_1 \div \psi_8$ – определяются уравнениями (8.4.21) – (8.4.28).

Список решений (для нестационарного периода)

Вариант 1:

- понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в верхнем и нижнем водоносных пластах: уравнения (8.4.1) и (8.4.2).
- понижение в опытной скважине: уравнения (8.4.13) и (8.4.14).

Вариант 2:

- изменения уровней при нулевом расходе опытной скважины: уравнения (8.4.15), (8.4.16), (8.4.29) и (8.4.30);
- расход, поступающий в верхний пласт из нижнего пласта, при нулевом расходе опытной скважины: уравнение (8.4.31);
- понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в верхнем и нижнем водоносных пластах: уравнения (8.4.17), (8.4.18), (8.4.32), (8.4.33), (8.4.36) и (8.4.37);
- понижение в опытной скважине: уравнение (8.4.39);
- расходы, поступающие в опытную скважину из верхнего и нижнего водоносных пластов: уравнения (8.4.34), (8.4.35), (8.4.40) и (8.4.41);

Вариант 3:

- понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в верхнем и нижнем водоносных пластах: уравнения (8.4.42) и (8.4.43).
- расходы, поступающие в опытную скважину из верхнего и нижнего водоносных пластов: уравнения (8.4.44) и (8.4.45).

Вариант 4:

- понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в верхнем и нижнем водоносных пластах: уравнения (8.4.46), (8.4.47), (8.4.50) и (8.4.51);
- расходы, поступающие в опытную скважину из верхнего и нижнего водоносных пластов: уравнения (8.4.48), (8.4.49), (8.4.52) и (8.4.53);
- изменения уровней при нулевом расходе опытной скважины: уравнения (8.4.54) и (8.4.55);
- расход, поступающий в верхний пласт из нижнего пласта, при нулевом расходе опытной скважины: уравнение (8.4.56).

Откачка с постоянным расходом

❖ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Вариант 1: напорный комплекс, начальные уровни в водоносных пластах совпадают (рис. 8.5).

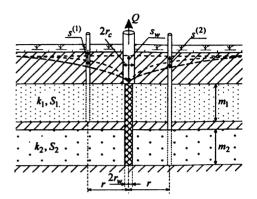


Рис. 8.5. Типовая схема двухслойного пласта, разделенного непроницаемым слосм. Верхний пласт напорный; начальные уровни в верхнем и нижнем пластах совпадают.

1. Уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = 2 \frac{Q}{\pi^2 a_1} \frac{r_w^2}{r_c^2} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^2 a_1 t}{r_w^2}\right) \right] \frac{E\left(\frac{r}{r_w}, \frac{r_w^2 S_1}{r_c^2}, \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \frac{T_2 \sqrt{a_1}}{T_1 \sqrt{a_2}}\right)}{\tau^2 F\left(\frac{r_w^2 S_1}{r_c^2}, \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \frac{T_2 \sqrt{a_1}}{T_1 \sqrt{a_2}}\right)} d\tau , \qquad (8.4.1)$$

$$s^{(2)} = 2 \frac{Q}{\pi^2 a_2} \frac{r_w^2}{r_c^2} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^2 a_2 t}{r_w^2}\right) \right] \frac{E\left(\frac{r}{r_w}, \frac{r_w^2 S_2}{r_c^2}, \sqrt{\frac{a_2}{a_1}, \frac{T_1 \sqrt{a_2}}{T_2 \sqrt{a_1}}}\right)}{\tau^2 F\left(\frac{r_w^2 S_2}{r_c^2}, \sqrt{\frac{a_2}{a_1}, \frac{T_1 \sqrt{a_2}}{T_2 \sqrt{a_1}}}\right)} d\tau , \qquad (8.4.2)$$

где

$$E(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = \varphi_1(\tau \varphi_2 - 2\beta_2 \varphi_3 - 2\beta_2 \beta_4 \varphi_4) - \varphi_5(\tau \varphi_6 - 2\beta_2 \varphi_7 - 2\beta_2 \beta_4 \varphi_8), \quad (8.4.3)$$

$$F(\beta_2, \beta_3, \beta_4) = (\tau \varphi_6 - 2\beta_2 \varphi_7 - 2\beta_2 \beta_4 \varphi_8)^2 + (\tau \varphi_2 - 2\beta_2 \varphi_3 - 2\beta_2 \beta_4 \varphi_4)^2, \tag{8.4.4}$$

$$\varphi_1 = J_0(\beta_1 \tau) J_0(\beta_3 \tau) - Y_0(\beta_1 \tau) Y_0(\beta_3 \tau), \tag{8.4.5}$$

$$\varphi_2 = J_0(\tau) Y_0(\beta_3 \tau) + Y_0(\tau) J_0(\beta_3 \tau), \tag{8.4.6}$$

$$\varphi_3 = J_0(\beta_3 \tau) Y_1(\tau) + Y_0(\beta_3 \tau) J_1(\tau), \tag{8.4.7}$$

$$\varphi_4 = J_0(\tau)Y_1(\beta_3\tau) + Y_0(\tau)J_1(\beta_3\tau), \tag{8.4.8}$$

$$\varphi_5 = J_0(\beta_1 \tau) Y_0(\beta_3 \tau) + Y_0(\beta_1 \tau) J_0(\beta_3 \tau), \tag{8.4.9}$$

$$\varphi_6 = J_0(\tau)J_0(\beta_3\tau) - Y_0(\tau)Y_0(\beta_3\tau), \tag{8.4.10}$$

$$\varphi_7 = J_0(\beta_3 \tau) J_1(\tau) - Y_0(\beta_3 \tau) Y_1(\tau), \tag{8.4.11}$$

$$\varphi_{8} = J_{0}(\tau)J_{1}(\beta_{3}\tau) - Y_{0}(\tau)Y_{1}(\beta_{3}\tau). \tag{8.4.12}$$

2. Уравнения понижений для опытной скважины

$$s_{w} = 8 \frac{Q}{\pi^{3} a_{1}} \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} a_{1} t}{r_{w}^{2}}\right)\right] \times \frac{J_{0}\left(\sqrt{\frac{a_{1}}{a_{2}}\tau}\right)^{2} + Y_{0}\left(\sqrt{\frac{a_{1}}{a_{2}}\tau}\right)^{2} + \frac{T_{2}}{T_{1}}\left[J_{0}(\tau)^{2} + Y_{0}(\tau)^{2}\right]}{\tau^{3} F\left(\frac{r_{w}^{2} S_{1}}{r_{c}^{2}}, \sqrt{\frac{a_{1}}{a_{2}}}, \frac{T_{2}\sqrt{a_{1}}}{T_{1}\sqrt{a_{2}}}\right)} \right\} d\tau$$
 (8.4.13)

или

$$s_{w} = 8 \frac{Q}{\pi^{3} a_{2}} \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} a_{2} t}{r_{w}^{2}}\right)\right] \times \frac{J_{0}\left(\sqrt{\frac{a_{2}}{a_{1}}\tau}\right)^{2} + Y_{0}\left(\sqrt{\frac{a_{2}}{a_{1}}\tau}\right)^{2} + \frac{T_{1}}{T_{2}}\left[J_{0}(\tau)^{2} + Y_{0}(\tau)^{2}\right]}{\tau^{3} F\left(\frac{r_{w}^{2} S_{2}}{r_{c}^{2}}, \sqrt{\frac{a_{2}}{a_{1}}}, \frac{T_{1}\sqrt{a_{2}}}{T_{2}\sqrt{a_{1}}}\right)} \right\} d\tau . \quad (8.4.14)$$

Вариант 2: напорный комплекс, начальные уровни в водоносных пластах различны.

- 1. Точные решения:
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов (откачка из скважины не производится: Q = 0) (рис. 8.6, a)

$$s^{(1)} = \Delta H \left[\frac{T_2}{T_1 + T_2} - P \left(\frac{a_1 t}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \frac{T_1 \sqrt{a_2}}{T_2 \sqrt{a_1}} \right) \right], \tag{8.4.15}$$

$$s^{(2)} = -\Delta H \left[\frac{T_1}{T_1 + T_2} - P \left(\frac{a_2 t}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \frac{T_2 \sqrt{a_1}}{T_1 \sqrt{a_2}} \right) \right]; \tag{8.4.16}$$

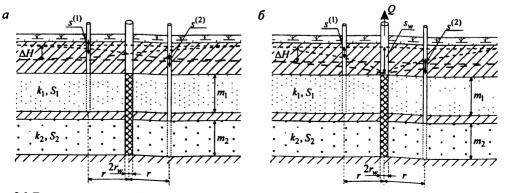


Рис. 8.6. Типовая схема двухслойного комплекса, разделенного непроницаемым слоем; верхний пласт напорный; начальные уровни в верхнем и нижнем пластах различны.

a – изменения уровней при нулевом расходе скважины; δ – понижения после начала откачки.

— уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов (откачка началась через время t_0 после проходки скважины) (рис. 8.6, δ)

$$s^{(1)} = \begin{cases} \Delta H \left[\frac{T_2}{T_1 + T_2} - P \left(\frac{a_1 t}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \frac{T_1 \sqrt{a_2}}{T_2 \sqrt{a_1}} \right) \right] + \\ + \frac{Q}{4\pi T_1} S \left(\frac{a_1 (t - t_0)}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \frac{T_2 \sqrt{a_1}}{T_1 \sqrt{a_2}} \right) \end{cases}, \tag{8.4.17}$$

$$s^{(2)} = \begin{cases} -\Delta H \left[\frac{T_1}{T_1 + T_2} - P \left(\frac{a_2 t}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \frac{T_2 \sqrt{a_1}}{T_1 \sqrt{a_2}} \right) \right] + \\ + \frac{Q}{4\pi T_2} S \left(\frac{a_2 (t - t_0)}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \frac{T_1 \sqrt{a_2}}{T_2 \sqrt{a_1}} \right) \end{cases}$$
(8.4.18)

где

$$P(u, \beta_1, \beta_2, \beta_3) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(-u\tau^2)}{\tau} \frac{\psi_1(\psi_2 + \beta_3\psi_3) - \psi_4(\psi_5 + \beta_3\psi_6)}{(\psi_2 + \beta_3\psi_3)^2 + (\psi_5 + \beta_3\psi_6)^2} d\tau, \qquad (8.4.19)$$

$$S(u,\beta_1,\beta_2,\beta_3) = \frac{4}{\pi} \int_0^\infty \frac{1 - \exp(-u\tau^2)}{\tau^2} \frac{\psi_7(\psi_3 + \beta_3\psi_2) - \psi_8(\psi_6 + \beta_3\psi_5)}{(\psi_3 + \beta_3\psi_2)^2 + (\psi_6 + \beta_3\psi_5)^2} d\tau , \qquad (8.4.20)$$

$$\psi_1 = J_1(\beta_2 \tau) Y_0(\beta_1 \tau) + Y_1(\beta_2 \tau) J_0(\beta_1 \tau), \tag{8.4.21}$$

$$\psi_2 = J_1(\beta_2 \tau) J_0(\tau) - Y_1(\beta_2 \tau) Y_0(\tau), \qquad (8.4.22)$$

$$\psi_3 = J_0(\beta_2 \tau) J_1(\tau) - Y_0(\beta_2 \tau) Y_1(\tau), \qquad (8.4.23)$$

$$\psi_4 = J_1(\beta_2 \tau) J_0(\beta_1 \tau) - Y_1(\beta_2 \tau) Y_0(\beta_1 \tau), \tag{8.4.24}$$

$$\psi_5 = Y_1(\beta_2 \tau) J_0(\tau) + J_1(\beta_2 \tau) Y_0(\tau),$$
 (8.4.25)

$$\psi_6 = J_1(\tau)Y_0(\beta_2\tau) + Y_1(\tau)J_0(\beta_2\tau), \tag{8.4.26}$$

$$\psi_{7} = J_{0}(\beta_{2}\tau)Y_{0}(\beta_{1}\tau) + Y_{0}(\beta_{2}\tau)J_{0}(\beta_{1}\tau), \tag{8.4.27}$$

$$\psi_8 = J_0(\beta_2 \tau) J_0(\beta_1 \tau) - Y_0(\beta_2 \tau) Y_0(\beta_1 \tau). \tag{8.4.28}$$

- 2. Аппроксимационные решения (для времени $t > 30 \cdot r_w^2/a_1$ и $t > 30 \cdot r_w^2/a_2$ при отсутствии откачки и для времени $(t-t_0) > 30 \cdot r_w^2/a_1$ и $(t-t_0) > 30 \cdot r_w^2/a_2$ при откачке):
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов (откачка из скважины не производится: Q=0)

$$s^{(1)} = \Delta H \frac{T_2}{T_1 + T_2} A \left| \frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-0.5 \frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right|, \tag{8.4.29}$$

$$s^{(2)} = -\Delta H \frac{T_1}{T_1 + T_2} A \left[\frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{0.5 \frac{T_2}{T_1 + T_2}} \right]; \tag{8.4.30}$$

- уравнение расхода, поступающего из верхнего пласта в нижний,

$$Q^{(1)} = 2\pi\Delta H \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} G \left[\frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{\frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right]; \tag{8.4.31}$$

- уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов (откачка началась через время t_0 после проходки скважины)

$$s^{(1)} = \begin{cases} \Delta H \frac{T_2}{T_1 + T_2} A \left[\frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-0.5 \frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right] + \\ \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[\times A \left[\frac{a_1 (t - t_0)}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-0.5 \frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right] \right] \end{cases}, \quad (8.4.32)$$

$$s^{(2)} = \begin{cases} -\Delta H \frac{T_1}{T_1 + T_2} A \left[\frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{0.5 \frac{T_2}{T_1 + T_2}} \right] + \\ \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[W \left(\frac{r_2}{4a_2 (t - t_0)} \right) + \frac{T_1}{T_1 + T_2} \ln \frac{a_1}{a_2} \times A \left[\frac{a_1 (t - t_0)}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}}, \frac{r}{r_w} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{0.5 \frac{T_2}{T_1 + T_2}} \right] \right] \end{cases}; \tag{8.4.33}$$

 уравнение расходов, поступающих в опытную скважину из верхнего и нижнего пластов,

$$Q^{(1)} = \begin{cases} 2\pi\Delta H \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} G \left(\frac{a_1 t}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right) + \\ + \frac{QT_1}{2(T_1 + T_2)} \left[2 \exp \left(-\frac{r_w^2}{4a_1(t - t_0)} \right) - \\ - \frac{T_2}{T_1 + T_2} \ln \left(\frac{a_1}{a_2} \right) G \left(\frac{a_1(t - t_0)}{r_w^2} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 + T_2}} \right) \right] \end{cases}, \quad (8.4.34)$$

$$Q^{(2)} = Q - Q^{(1)}. (8.4.35)$$

- $t > 200 \frac{r_w^2}{a}$ и $a_2 \ge a_1$) [Мироненко, Аппроксимационные решения (для времени Шестаков, 19781:
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} W \left(\frac{r^2}{4a_1 t}\right) \frac{1}{1 + \varphi(t)}, \tag{8.4.36}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} W \left(\frac{r^2}{4a_2 t} \right) \frac{\varphi(t)}{1 + \varphi(t)}, \tag{8.4.37}$$

где

$$\varphi(t) = \frac{T_2 \ln \frac{2.25a_1t}{r_w^2}}{T_1 \ln \frac{2.25a_2t}{r^2}};$$
(8.4.38)

уравнение понижения в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi} \frac{\ln \frac{2.25a_{1}t}{r_{w}^{2}} \ln \frac{2.25a_{2}t}{r_{w}^{2}}}{T_{2} \ln \frac{2.25a_{1}t}{r_{w}^{2}} + T_{1} \ln \frac{2.25a_{2}t}{r_{w}^{2}}};$$
(8.4.39)

уравнения расходов, поступающих в опытную скважину из верхнего и нижнего пластов.

$$Q^{(1)} = \frac{Q}{1 + \varphi(t)},\tag{8.4.40}$$

$$Q^{(1)} = \frac{Q}{1 + \varphi(t)},$$

$$Q^{(2)} = \frac{Q\varphi(t)}{1 + \varphi(t)}.$$
(8.4.40)

Вариант 3: верхний пласт безнапорный, начальные уровни в водоносных пластах совпадают (рис. 8.7):

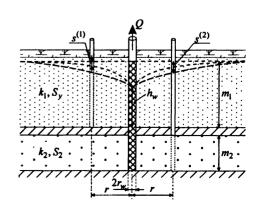


Рис. 8.7. Типовая схема двухслойного комплекса, разделенного непроницаемым слоем; верхний пласт безнапорный. Начальные уровни в верхнем и нижнем пластах совпадают.

- уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_2} \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right) B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)},$$
(8.4.42)

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi T_2} \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2t}}\right) B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)};$$
(8.4.43)

 уравнения расходов, поступающих в опытную скважину из верхнего и нижнего пластов,

$$Q^{(1)} = \frac{Q\frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)},$$
(8.4.44)

$$Q^{(2)} = \frac{QB\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)}.$$
 (8.4.45)

Вариант 4: верхний пласт безнапорный, начальные уровни в водоносных пластах различны.

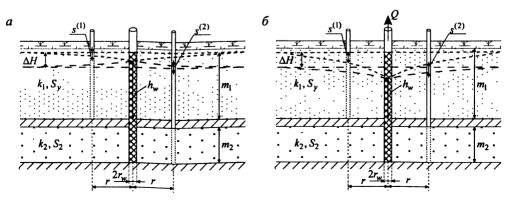


Рис. 8.8. Типовая схема двухслойного комплекса, разделенного непроницаемым слоем; верхний пласт безнапорный; начальные уровни в верхнем и нижнем пластах различны. a – понижения при нулевом расходе скважины; δ – понижения после начала откачки.

- 1. Откачка началась сразу после проходки скважины (рис. 8.8, а):
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = \frac{\frac{Q}{2\pi T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}} \right) B \left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1} \right) + \Delta H B \left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1} \right)}{B \left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1} \right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}} \right)}, \quad (8.4.46)$$

$$s^{(2)} = \frac{\frac{Q}{2\pi T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2 t}}\right) B\left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) - \Delta H K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2 t}}\right)}{B\left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}}\right)};$$
(8.4.47)

 уравнения расходов, поступающих в опытную скважину из верхнего и нижнего пластов,

$$Q^{(1)} = \frac{Q\frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right) + \Delta H \cdot 2\pi T_1}{B\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)},$$
(8.4.48)

$$Q^{(2)} = \frac{QB\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) - \Delta H \cdot 2\pi T_1}{B\left(\frac{2k_1t}{S_ym_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)}.$$
 (8.4.49)

- 2. Откачка началась через время t_0 после проходки скважины (рис. 8.8, δ):
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{Q}{2\pi T_2} & \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2(t-t_0)}}\right) B\left(\frac{2k_1(t-t_0)}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1(t-t_0)}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2(t-t_0)}}\right)} + \\ & + \frac{\Delta H B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)} \end{cases}, \tag{8.4.50}$$

$$s^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{Q}{2\pi T_2} & \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2(t-t_0)}}\right) B\left(\frac{2k_1(t-t_0)}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1(t-t_0)}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2(t-t_0)}}\right)} \\ - \frac{\Delta H K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2t}}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)} \end{bmatrix}; \tag{8.4.51}$$

 уравнения расходов, поступающих в опытную скважину из верхнего и нижнего пластов,

$$Q^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{Q \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2(t - t_0)}} \right)}{B \left(\frac{2k_1(t - t_0)}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1} \right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2(t - t_0)}} \right)} + \\ + \frac{\Delta H \cdot 2\pi T_1}{B \left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1} \right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}} \right)} \end{bmatrix},$$
(8.4.52)

$$Q^{(2)} = \frac{QB\left(\frac{2k_{1}(t-t_{0})}{S_{y}m_{1}}, \frac{r_{w}}{m_{1}}, \frac{h_{w}}{m_{1}}\right)}{B\left(\frac{2k_{1}(t-t_{0})}{S_{y}m_{1}}, \frac{r_{w}}{m_{1}}, \frac{h_{w}}{m_{1}}\right) + \frac{T_{1}}{T_{2}}K_{0}\left(\sqrt{\frac{r_{w}^{2}}{2a_{2}(t-t_{0})}}\right)}{\frac{\Delta H \cdot 2\pi T_{1}}{B\left(\frac{2k_{1}t}{S_{y}m_{1}}, \frac{r_{w}}{m_{1}}, \frac{h_{w}}{m_{1}}\right) + \frac{T_{1}}{T_{2}}K_{0}\left(\sqrt{\frac{r_{w}^{2}}{2a_{2}t}}\right)}$$
(8.4.53)

- 3. Откачка из скважины не производится (Q = 0):
 - уравнения понижений для верхнего и нижнего пластов

$$s^{(1)} = \frac{\Delta HB\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right)}{B\left(\frac{2k_1t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2}K_0\left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2t}}\right)},$$
(8.4.54)

$$s^{(2)} = \frac{-\Delta H \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r^2}{2a_2 t}}\right)}{B\left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}}\right)};$$
(8.4.55)

уравнение расхода, поступающего из верхнего пласта в нижний,

$$Q^{(1)} = \frac{2\pi T_1 \Delta H}{B\left(\frac{2k_1 t}{S_y m_1}, \frac{r_w}{m_1}, \frac{h_w}{m_1}\right) + \frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\sqrt{\frac{r_w^2}{2a_2 t}}\right)}.$$
 (8.4.56)

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 8.4.1 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики для 1-го и 2-го вариантов

Вариант	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
	8.4.1		$s^{(1)} - \lg t$
1	8.4.2		$s^{(2)} - \lg t$
	8.4.13, 8.4.14	T_1, a_1, T_2, a_2	$s_w - \lg t$
	8.4.15, 8.4.17, 8.4.29, 8.4.32		$s^{(1)} - \lg t$
2	8.4.16, 8.4.18, 8.4.30, 8.4.33		$s^{(2)}-\lg t$

Tаблица~8.4.2 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики для 3-го и 4-го вариантов

Вариант	Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
3	8.4.42		$s^{(1)} - \lg t$
3	8.4.43	k_1, S_{ν}, T_2, a_2	$s^{(2)} - \lg t$
4	8.4.46, 8.4.50, 8.4.54	κ_1, S_y, I_2, u_2	$s^{(1)} - \lg t$
	8.4.47, 8.4.51, 8.4.55		$s^{(2)}-\lg t$

Замечание

Сумма расходов, поступающих в опытную скважину из каждого водоносного пласта на любой момент времени, должна равняться постоянному расходу, извлекаемому из опытной скважины: $Q = Q^{(1)} + Q^{(2)}$.

8.5. Двухслойный комплекс: два пласта с близкими фильтрационными свойствами

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух однородных напорных изотропных пластов разной проницаемости; комплекс условно делится на три зоны (нумерация слоев и зон дана на рисунках);
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия, находится в одном из водоносных пластов;
- понижение определяется в любой точке водоносного комплекса;
- типовые схемы: рис. 8.9 и 8.10.

Рассматривается два варианта:

- вариант 1: фильтр опытной скважины примыкает к кровле или к подошве водоносного комплекса;
- вариант 2: фильтр опытной скважины примыкает к кровле нижнего пласта или к подошве верхнего пласта.

Литература: Javandel, Witherspoon, 1983.

Условные обозначения:

 a_1, a_2 – пьезопроводности первого и второго пластов, м²/сут;

 $J_0(eta)$ -функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации первого и второго слоев, м/сут;

 l_w – длина фильтра опытной скважины, м;

 m_1, m_2 — мощности первого и второго пластов, м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до точки наблюдения, м;

 S_1 , S_2 — водоотдачи первого и второго пластов, м/сут;

 $s^{(1)}, s^{(2)}, s^{(3)}$ – понижения в первой, второй и третьей зонах, м;

 T_1, T_2 – проводимости первого и второго пластов, м²/сут;

t – время от начала откачки, сут;

u – аргумент функции;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 z_p — вертикальное расстояние от границы раздела двух пластов до точки наблюдения (нулевая отметка находится на границе раздела пластов, направление вертикальной оси зависит от варианта и показано на рисунках), м;

 β – аргумент функции;

 β_n – определяется уравнением (8.5.12);

 ζ_n – корни уравнения $C_1 \tan \zeta_n + C_2 \tan C_2 = 0$; C_1, C_2 – константы;

 φ , φ_1 , φ_2 , φ_3 — определяются уравнениями (8.5.7) — (8.5.10) для варианта 1 и (8.5.20) — (8.5.23) для варианта 2;

 $\psi_1(\tau)$, $\psi_2(\tau)$, $\psi_3(\tau)$ — определяются уравнениями (8.5.4) — (8.5.6) для варианта 1 и (8.5.17) — (8.5.19) для варианта 2.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижения для варианта 1: уравнения (8.5.1) (8.5.3) и (8.5.13);
- понижения для варианта 2: уравнения (8.5.14) (8.5.16).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения понижений выбираются в зависимости от зоны, в которой находится точка наблюдения.

Вариант 1 (рис. 8.9) Уравнения нестационарной фильтрации

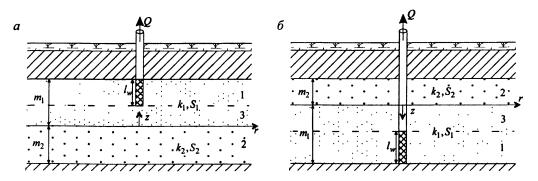


Рис. 8.9. Типовая схема двухслойного комплекса с фильтром опытной скважины, расположенным в кровле (а) и в подошве (б) водоносного комплекса. Цифрами показаны номера зон, в которых определяются понижения.

Понижения для первой, второй и третьей зон

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi k_1 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_1} \right) \left[\frac{1}{\tau^2} - \psi_1(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_1}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.1)$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi k_1 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_1} \right) \left[\psi_2(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_2}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.2)$$

$$s^{(3)} = \frac{Q}{2\pi k_1 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_1} \right) \left[\psi_3(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_3}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.3)$$

где

$$\psi_{1}(\tau) = \frac{\cosh\left(\tau \frac{m_{1} - z_{p}}{m_{1}}\right)\left[\frac{k_{2}}{k_{1}}\tanh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\cosh\left(\tau \frac{m_{1} - l_{w}}{m_{1}}\right) + \sinh\left(\tau \frac{m_{1} - l_{w}}{m_{1}}\right)\right]}{\tau^{2}\left[\frac{k_{2}}{k_{1}}\tanh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\cosh\tau + \sinh\tau\right]}, \quad (8.5.4)$$

$$\psi_{2}(\tau) = \frac{\cosh\left(\tau \frac{z_{p} + m_{2}}{m_{1}}\right) \sinh\left(\tau \frac{l_{w}}{m_{1}}\right)}{\tau^{2}\left[\frac{k_{2}}{k_{1}} \sinh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right) \cosh \tau + \cosh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right) \sinh \tau\right]},$$
(8.5.5)

$$\psi_{3}(\tau) = \frac{\sinh\left(\tau \frac{l_{w}}{m_{1}}\right)\left[\frac{k_{2}}{k_{1}}\sinh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\sinh\left(\tau \frac{z_{p}}{m_{1}}\right) + \cosh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\cosh\left(\tau \frac{z_{p}}{m_{1}}\right)\right]}{\tau^{2}\left[\frac{k_{2}}{k_{1}}\sinh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\cosh\tau + \cosh\left(\tau \frac{m_{2}}{m_{1}}\right)\sinh\tau\right]}, \quad (8.5.6)$$

$$\varphi = \frac{\frac{\beta_{n}}{2} \left(\zeta_{n}^{2} \frac{m_{1}^{2}}{m_{2}^{2}} + \tau^{2}\right)}{\exp \left[-\left(\zeta_{n}^{2} \frac{m_{1}^{2}}{m_{2}^{2}} + \tau^{2}\right) \frac{a_{2}t}{m_{1}^{2}}\right]} \begin{bmatrix} \left(\frac{a_{2}}{a_{1}} - \frac{m_{2}^{2}\beta_{n}^{2}}{m_{1}^{2}\zeta_{n}^{2}}\right) \cos \zeta_{n} \sin \beta_{n} + \\ + \beta_{n} \left(\frac{T_{2}}{T_{1}} + \frac{a_{2}}{a_{1}}\right) \cos \zeta_{n} \sin \beta_{n} - \\ - \beta_{n} \left(\frac{m_{2}^{2}\beta_{n}}{m_{1}^{2}\zeta_{n}} + \frac{k_{2}m_{1}a_{2}\zeta_{n}}{k_{1}m_{2}a_{1}\beta_{n}}\right) \sin \zeta_{n} \cos \beta_{n} \end{bmatrix}, \quad (8.5.7)$$

$$\varphi_1 = \cos\left(\beta_n \frac{z_p - m_1}{m_1}\right) \left[\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2} \zeta_n \sin \zeta_n \cos\left(\beta_n \frac{m_1 - l_w}{m_1}\right) + \beta_n \cos \zeta_n \sin\left(\beta_n \frac{m_1 - l_w}{m_1}\right)\right], (8.5.8)$$

$$\varphi_2 = -\beta_n \sin\left(\beta_n \frac{l_w}{m_1}\right) \cos\left(\zeta_n \frac{m_2 + z_p}{m_2}\right), \tag{8.5.9}$$

$$\varphi_3 = \sin\left(\beta_n \frac{l_w}{m_1}\right) \left[\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2} \zeta_n \sin \zeta_n \sin\left(\beta_n \frac{z_p}{m_1}\right) - \beta_n \cos \zeta_n \cos\left(\beta_n \frac{z_p}{m_1}\right)\right], \quad (8.5.10)$$

 ζ_n – корень уравнения

$$\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2} \tan \zeta_n + \beta_n \tan \beta_n = 0, \qquad (8.5.11)$$

$$\beta_n = m_1 \sqrt{\frac{a_2}{a_1} \left(\frac{\zeta_n^2}{m_2^2} + \frac{\tau^2}{m_1^2}\right) - \frac{\tau^2}{m_1^2}} . \tag{8.5.12}$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

Для больших моментов времени и для расстояний $r \ge 1.5 (m_1 + T_2/k_1)$ понижение в первой зоне

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi(T_1 + T_2)} W \left[\frac{r^2(S_1 + S_2)}{4t(T_1 + T_2)} \right]. \tag{8.5.13}$$

Вариант 2 (рис. 8.10)

Уравнения нестационарной фильтрации

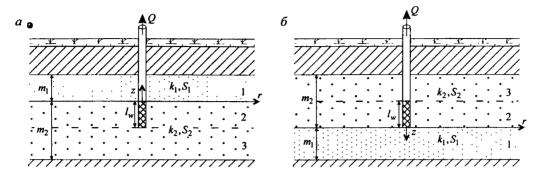


Рис. 8.10. Типовая схема двухслойного комплекса с фильтром опытной скважины, расположенным в кровле нижнего пласта (а) и в подошве верхнего пласта (б). Цифрами показаны номера зон, в которых определяются понижения.

Понижения для первой, второй и третьей зон

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi k_2 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_2} \right) \left[\psi_1(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_1}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.14)$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi k_2 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_2} \right) \left[\frac{1}{\tau^2} - \psi_2(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_2}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.15)$$

$$s^{(3)} = \frac{Q}{2\pi k_2 l_w} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\tau \frac{r}{m_2} \right) \left[\psi_3(\tau) + \sum_{n=1}^\infty \frac{\varphi_3}{\varphi} \right] d\tau , \qquad (8.5.16)$$

где

$$\psi_{1}(\tau) = \frac{\cosh\left(\tau \frac{z_{p} - m_{1}}{m_{2}}\right) \left[\sinh \tau - \sinh\left(\tau \frac{m_{2} - l_{w}}{m_{2}}\right)\right]}{\tau^{2} \left[\cosh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \sinh \tau + \frac{k_{1}}{k_{2}} \sinh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \cosh \tau\right]},$$
(8.5.17)

$$\psi_{2}(\tau) = \frac{\left[\frac{k_{1}}{k_{2}}\sinh\left(\tau\frac{m_{1}}{m_{2}}\right)\cosh\left(\tau\frac{z_{p}+m_{2}}{m_{2}}\right) + \sinh\left(\tau\frac{m_{2}-l_{w}}{m_{2}}\right) \times \left[\times\left[\cosh\left(\tau\frac{m_{1}}{m_{2}}\right)\cosh\left(\tau\frac{z_{p}}{m_{2}}\right) - \frac{k_{1}}{k_{2}}\sinh\left(\tau\frac{m_{1}}{m_{2}}\right)\sinh\left(\tau\frac{z_{p}}{m_{2}}\right)\right]\right]}{\tau^{2}\left[\cosh\left(\tau\frac{m_{1}}{m_{2}}\right)\sinh\tau + \frac{k_{1}}{k_{2}}\sinh\left(\tau\frac{m_{1}}{m_{2}}\right)\cosh\tau\right]},$$
(8.5.18)

$$\psi_{3}(\tau) = \frac{\cosh\left(\tau \frac{z_{p} + m_{2}}{m_{2}}\right) \left[-\frac{k_{1}}{k_{2}} \sinh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) + \frac{k_{1}}{k_{2}} \sinh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \cosh\left(\tau \frac{l_{w}}{m_{2}}\right) + \left[+\cosh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \sinh\left(\tau \frac{l_{w}}{m_{2}}\right)\right]}{\tau^{2} \left[\cosh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \sinh\tau + \frac{k_{1}}{k_{2}} \sinh\left(\tau \frac{m_{1}}{m_{2}}\right) \cosh\tau\right]}, \quad (8.5.19)$$

$$\varphi = \frac{\frac{1}{2} \left(\zeta_{n}^{2} + \tau^{2}\right)}{\exp\left[-\left(\zeta_{n}^{2} + \tau^{2}\right) \frac{a_{2}t}{m_{2}^{2}}\right]} \left[-\zeta_{n}^{2} \sin \beta_{n} \cos \zeta_{n} \left(\frac{S_{1}\zeta_{n}^{2}}{S_{2}\beta_{n}^{2}} - \frac{k_{1}m_{2}}{k_{2}m_{1}} \right) - \left(-\zeta_{n}^{2} \sin \beta_{n} \sin \zeta_{n} \left(\frac{a_{2}m_{1}^{2}\zeta_{n}}{a_{1}m_{2}^{2}\beta_{n}} + \frac{k_{1}m_{2}\beta_{n}}{k_{2}m_{1}\zeta_{n}} \right) + \left(+\zeta_{n}^{2} \cos \beta_{n} \cos \zeta_{n} \left(1 + \frac{S_{1}}{S_{2}} \right) \right) \right],$$
(8.5.20)

$$\varphi_1 = -\zeta_n \cos \left(\beta_n \frac{z_p - m_1}{m_1} \right) \left[\sin \zeta_n - \sin \left(\zeta_n \frac{m_2 - l_w}{m_2} \right) \right], \tag{8.5.21}$$

$$\varphi_{2} = \sin\left(\zeta_{n} \frac{m_{2} - l_{w}}{m_{2}}\right) \left[\zeta_{n} \cos\beta_{n} \cos\left(\zeta_{n} \frac{z_{p}}{m_{2}}\right) + \beta_{n} \frac{k_{1} m_{2}}{k_{2} m_{1}} \sin\left(\zeta_{n} \frac{z_{p}}{m_{2}}\right) \sin\beta_{n} + \left[+\beta_{n} \frac{k_{1} m_{2}}{k_{2} m_{1}} \sin\beta_{n} \cos\left(\zeta_{n} \frac{z_{p} + m_{2}}{m_{2}}\right)\right], \quad (8.5.22)$$

$$\varphi_{3} = \cos\left(\zeta_{n} \frac{z_{p} + m_{2}}{m_{2}}\right) \begin{bmatrix} \beta_{n} \frac{k_{1} m_{2}}{k_{2} m_{1}} \sin \beta_{n} - \beta_{n} \frac{k_{1} m_{2}}{k_{2} m_{1}} \sin \beta_{n} \cos\left(\zeta_{n} \frac{l_{w}}{m_{2}}\right) - \\ -\zeta_{n} \cos \beta_{n} \sin\left(\zeta_{n} \frac{l_{w}}{m_{2}}\right) \end{bmatrix}. \tag{8.5.23}$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 8.5.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
8.5.1 – 8.5.3, 8.5.14 – 8.5.16	k_1, k_2, a_1, a_2	$s^{(i)} - \lg t \ (i - $ номер зоны)

Замечание

Для варианта 1, для понижений в первой зоне, для больших моментов времени и больших расстояний (см. уравнение (8.5.13)) обработку можно осуществлять всеми возможными способами, предусмотренными для схемы Тейса (см. раздел 2.1). При обработке вместо проводимости определяется суммарная проводимость $(T_1 + T_2)$, а вместо

пьезопроводности – обобщенный параметр
$$\frac{T_1 + T_2}{S_1 + S_2}$$
.

РАЗДЕЛ 9. ВОДОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С ПЕРЕТЕКАНИЕМ

9.1. Перетекание без учета емкости разделяющего слоя

В зависимости от изменения в процессе опытного опробования напора в смежном водоносном пласте, из которого происходит перетекание в основной пласт, рассматривается решение двух задач:

- напор в смежном водоносном пласте остается постоянным (нулевое понижение);
- 2) напор в смежном водоносном пласте меняется.

В обоих случаях емкостными свойствами разделяющего слабопроницаемого слоя пренебрегаем.

9.1.1. Перетекание из водоносных пластов с постоянным напором

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых изотропных слоев;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: один или два хорошо проницаемых слоя, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: один или два слабопроницаемых слоя, через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- поток в слабопроницаемых слоях вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемых слоях не учитывается;
- типовая схема: рис. 9.1.

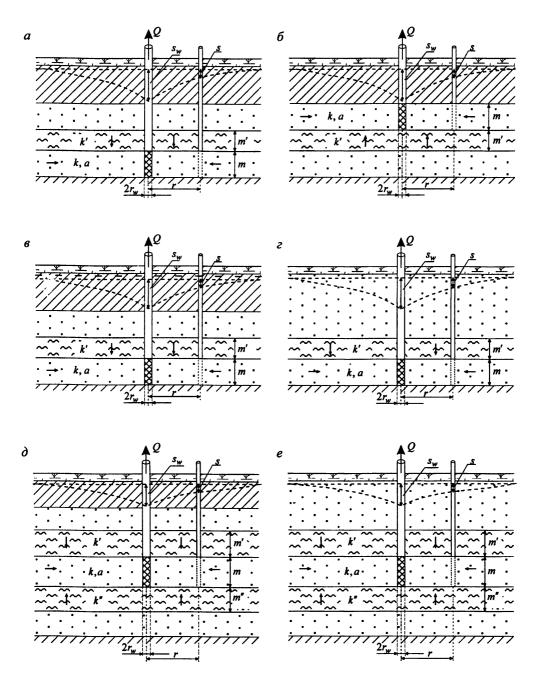


Рис. 9.1. Типовые схемы водоносного пласта с перетеканием (разрезы), уровень в смежных пластах не меняется в процессе опробования.

a — трехслойный напорный комплекс с перетеканием через кровлю, b — через подошву пласта; b — пример трехслойного напорного комплекса с различными начальными уровнями в хорошо проницаемых пластах; c — трехслойный безнапорный комплекс с перетеканием через кровлю пласта; b, c — пятислойные напорный (b) и безнапорный (c) комплексы с перетеканием через кровлю и через подошву пласта. Стрелками показаны направления потока в слоях.

Рассматривается пять вариантов:

- вариант 1: напорный водоносный комплекс состоит из трех слоев, перетекание осуществляется через кровлю основного пласта, смежный водоносный пласт напорный и находится в кровле водоносного комплекса (рис. 9.1, a);
- вариант 2: напорный водоносный комплекс состоит из трех слоев, перетекание осуществляется через подошву основного пласта, смежный водоносный пласт напорный и находится в подошве водоносного комплекса (рис. 9.1, 6);
- вариант 3: безнапорный водоносный комплекс состоит из трех слоев, перетекание осуществляется через кровлю основного пласта, смежный водоносный пласт безнапорный и находится в кровле водоносного комплекса (рис. 9.1, г);
- вариант 4: напорный водоносный комплекс состоит из пяти слоев, перетекание осуществляется через кровлю и через подошву основного пласта, смежные водоносные пласты напорные и находятся в кровле и подошве водоносного комплекса (рис. 9.1, ∂);
- вариант 5: безнапорный водоносный комплекс состоит из пяти слоев, перетекание осуществляется через кровлю и через подошву основного пласта, один смежный водоносный пласт безнапорный и находится в кровле водоносного комплекса, другой смежный водоносный пласт напорный и находится в подошве водоносного комплекса (рис. 9.1, e).

<u>Литература:</u> Jacob, 1946b; Аравин, Нумеров, 1953; Гиринский, 1954; Hantush, Jacob, 1955b; Hantush, 1956, 1959b, 1964c; Бочевер, Веригин, 1961; Walton, 1962; Cooper, 1963; Sternberg, 1969; Бабушкин и др., 1974; Lai, Chen-Wu Su, 1974; Шестаков, 1995.

Условные обозначения:

- A величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);
- A_{x} величина, которую отсекает прямая на оси абсцисс (для способа прямой линии);
- a пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;
- B параметр перетекания: определяется уравнением (9.1.2) или (9.1.3), м;
- С угол наклона прямой (для способа прямой линии);
- D расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;
- Е расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;
- erfc u дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);
- $F_L(u, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$ специальная функция: определяется уравнением (9.1.24);
- $F_{Lw}(u, \beta_2, \beta_3)$ специальная функция: определяется уравнением (9.1.26);
- $G(u,\beta)$ специальная функция (Приложение 16);
- $J_0(u)$ функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $J_1(u)$ функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- $I_0(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $K_0(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
- $K_1(\beta)$ модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
- k коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;
- k', k'' коэффициенты фильтрации разделяющих слоев, м/сут;
- т мощность основного водоносного пласта, м;
- m', m'' мощности разделяющих слоев, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 Q_1, Q_2 – расходы опытной скважины на два момента времени при откачке с постоянным понижением, м³/сут;

 Q_s – расход на период стационара при откачке с постоянным понижением, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_c – радиус обсадной трубы опытной скважины, м;

 r_{w} – радиус опытной скважины, м;

S – водоотдача основного водоносного пласта;

s – понижение в наблюдательной скважине основного пласта, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах основного пласта, м;

 s_{m} — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_{p} — понижение в точке перегиба, м;

 s_w — понижение в опытной скважине (постоянная величина для откачки с постоянным понижением), м:

T = km – проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 $t_{p}\,$ – время наступления точки перегиба, сут;

и – аргумент функций;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 $Z(u, \beta_1, \beta_2)$ – специальная функция (Приложение 31);

 β , β_1 , β_2 , β_3 – аргументы функций.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.1.1);
- понижение для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнения (9.1.4) и (9.1.5);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (9.1.6);
- альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации: уравнение (9.1.7);
- понижение на период стационара: уравнения (9.1.8) и (9.1.8а);
- понижение на период стационара для небольших расстояний от опытной скважины: уравнение (9.1.9);

- понижение в опытной скважине на период стационара: уравнение (9.1.10);
- понижение в наблюдательной скважине при откачке из опытной скважины большого диаметра для нестационарного периода: уравнение (9.1.23);
- понижение в опытной скважине большого диаметра для нестационарного периода: уравнение (9.1.25);
- понижение для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (9.1.27) – (9.1.29);
- альтернативная форма уравнения понижения для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнение (9.1.30);
- понижение для стационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (9.1.31) и (9.1.33);
- расход для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (9.1.34) – (9.1.36);
- альтернативная форма уравнения расхода для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (9.1.37) и (9.1.38);
- расход для стационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (9.1.39) и (9.1.40).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, Jacob, 1955b; Hantush, 1956]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B} \right), \tag{9.1.1}$$

где параметр перетекания B зависит от количества смежных водоносных пластов:

– при наличии одного питающего слоя, когда вода поступает в пласт только через слабопроницаемый слой, находящийся в кровле, или только через слой, находящийся в подошве основного водоносного пласта (см. рис. 9.1, $a-\varepsilon$),

$$B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}} \tag{9.1.2}$$

– при наличии двух питающих слоев, когда вода поступает через слабопроницаемые слои, находящиеся в кровле и подошве основного водоносного пласта (рис. 9.1, δ , e),

$$B = \sqrt{\frac{T}{k'/m' + k''/m''}} = \sqrt{T \frac{m'm''}{k'm' + k''m''}}.$$
 (9.1.3)

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для времени $t > \frac{2rB}{a}$ понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1956]

$$s = s_m - \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{at}{B^2}\right), \tag{9.1.4}$$

где s_m — понижение на период стационара, м.

2. Для времени $t > (2 \div 2.5) \frac{r^2}{a}$ и неравенстве $\frac{r}{B} \le 0.2$ понижение в наблюдательной скважине [Бочевер, Веригин, 1961]

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \left[2K_0 \left(\frac{r}{B} \right) - I_0 \left(\frac{r}{B} \right) W \left(\frac{at}{B^2} \right) \right]. \tag{9.1.5}$$

3. Для опытной скважины (когда имеет место неравенство $\frac{r_w}{B}$ << 1) [Бочевер, Веригин, 1961]

$$s_w \approx \frac{Q}{4\pi T} \left[2\ln \frac{1.123B}{r_w} - W\left(\frac{at}{B^2}\right) \right]. \tag{9.1.6}$$

Альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации [Sternberg, 1969] Аналог уравнения (9.1.1):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(r \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right). \tag{9.1.7}$$

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине [Jacob, 1946b]

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{9.1.8}$$

Время наступления стационара [Бочевер, Веригин, 1961; Шестаков, 1995] $t > (2.5 \div 3) \frac{B^2}{a}$.

Уравнение (9.1.8) с учетом емкости опытной скважины имеет вид [*Аравин*, *Нумеров*, 1953; *Гиринский*, 1954]

$$s_m = \frac{QB}{2\pi T r_w} \frac{K_0\left(\frac{r}{B}\right)}{K_1\left(\frac{r_w}{B}\right)}.$$
 (9.1.8a)

Частные случаи для стационарного периода

1. Для неравенства $r/B \le 0.05$ понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1956; Шестаков, 1995]

$$s_m \approx \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.123B}{r} \,. \tag{9.1.9}$$

2. Понижение в опытной скважине [Шестаков, 1995]

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.123B}{r} \,. \tag{9.1.10}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 9.1.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м	
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W\left(u, \frac{r}{B}\right) - \lg \frac{1}{u} \tag{1}$	$T = \frac{Q}{Q}$	$a = \frac{10^E}{4}$	Подбор при	
$\lg s - \lg t$		$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}r^2$	построении	
$\lg s_m - \lg r$	$\lg K_0(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	_	$B=10^{-E}$	
$\lg(s_m - s) - \lg t \ (2)$	$\lg W(u) - \lg u$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$\frac{a}{B^2}$	= 10 ^E	

Примечание. (1) — эталонная кривая строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания — подбором при построении эталонной кривой; (2) — пределы применимости см. из уравнения (9.1.4).

Способ прямой линии

Таблица 9.1.2 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Параметр перетекания, м
Площадное	a 1au	$_{T}$ = 0.366 Q	B = A/C - 0.05
прослеживание	$s_m - \lg r$	$I = \frac{1}{C}$	$B = 0.89A_{x}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{r_1}{B}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}, \frac{r_2}{B}\right)},\tag{9.1.11}$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{2K_0 \left(\frac{r_1}{B}\right) - I_0 \left(\frac{r_1}{B}\right) W \left(\frac{at}{B^2}\right)}{2K_0 \left(\frac{r_2}{B}\right) - I_0 \left(\frac{r_2}{B}\right) W \left(\frac{at}{B^2}\right)}.$$
 (9.1.12)

Подбор пьезопроводности и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара при заданном параметре перетекания (на основе уравнения (9.1.8)):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{9.1.13}$$

2. Определение проводимости по разности понижений для неравенства $r/B \le 0.05$ (на основе уравнения (9.1.9)):

$$T = \frac{Q}{2\pi (s_{m,1} - s_{m,2})} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (9.1.14)

3. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений на период стационара в двух наблюдательных скважинах (на основе уравнения (9.1.8)):

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{K_0(r_1/B)}{K_0(r_2/B)}. (9.1.15)$$

4. Определение проводимости по понижению в опытной скважине на период стационара при заданном параметре перетекания (на основе уравнения (9.1.10)):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \ln \frac{1.123B}{r_w} \,. \tag{9.1.16}$$

Подбор параметров

Таблица 9.1.3 Полбираемые параметры и рекоменлуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.1.1	T, a, B	$s - \lg t$
9.1.8	a, B	$s_m - \lg r$
9.1.11		$s_1/s_2 - \lg t$

Алгоритм определения параметров по точке перегиба [Hantush, 1956]

Алгоритм основан на том, что график временного прослеживания $s - \lg t$ имеет точку перегиба P . В этой точке меняется направление вогнутости кривой (рис. 9.2).

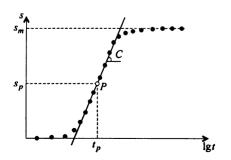


Рис. 9.2. График временного прослеживания для определения параметров по точке перегиба.

- 1. Построим график в координатах $s \lg t$.
- 2. По графику определим величину понижения на период стационара (s_m).
- 3. Рассчитаем понижение уровня в точке перегиба: $s_p = 0.5s_m$.
- 4. По графику определим время для точки перегиба (t_p).
- 5. По графику определим наклон графика (C) в точке перегиба по наклону касательной в этой точке.

6. Найдем величину отношения r/B (и, следовательно, параметр перетекания) из следующей зависимости:

$$\exp\left(\frac{r}{B}\right)K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{2.3s_p}{C}.$$
 (9.1.17)

Значения выражения в левой части уравнения (9.1.17) даны в Приложении 5.

7. Рассчитаем проводимость водоносного пласта. Из уравнения (9.1.8) следует, что

$$s_p = \frac{Q}{4\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{9.1.18}$$

Наклон графика в точке перегиба

$$C = \frac{2.3Q}{4\pi T} \exp\frac{r}{B} \,. \tag{9.1.19}$$

Из уравнений (9.1.18) или (9.1.19) определим проводимость:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_p} K_0 \left(\frac{r}{B}\right) = \frac{2.3Q}{4\pi C} \exp{\frac{r}{B}}.$$
 (9.1.20)

 Рассчитаем водоотдачу водоносного пласта. В точке перегиба соблюдается следующее соотношение:

$$\frac{r^2S}{4Tt_p} = \frac{r/B}{2},\tag{9.1.21}$$

откуда водоотдача равна:

$$S = \frac{2Tt_p}{Rr} \,. \tag{9.1.22}$$

Если полученные коэффициенты при подстановке в уравнение (9.1.1) дадут отклонение рассчитанных понижений от фактических значений, то процедуру необходимо повторить, уточнив значение понижения в точке перегиба (s_p) , время, которое соответствует этому понижению (t_p) , и наклон прямой (C).

Откачка с постоянным расходом из скважины большого диаметра

Рассматривается понижение в водоносном комплексе с перетеканием при откачке с постоянным расходом из опытной скважины большого диаметра (рис. 9.3) [Lai, Chen-Wu Su, 1974]. В решениях для понижения уровня учитывается разница в радиусе фильтра опытной скважины (r_w) и радиусе обсадной трубы (r_c).

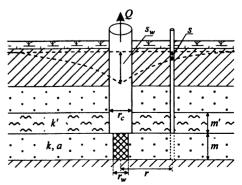


Рис. 9.3. Типовая схема (разрез) водоносного комплекса с перетеканием при откачке из скважины большого диаметра.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F_L \left(\frac{r_w^2}{4at}, \frac{r}{r_w}, \frac{r_w}{B}, S \frac{r_w^2}{r_c^2} \right), \tag{9.1.23}$$

где

$$F_{L}(u, \beta_{1}, \beta_{2}, \beta_{3}) = 8 \frac{\beta_{3}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}{4u}\right) \right] \frac{\tau}{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}} \times \left\{ \int_{0}^{2} \left[\left(\beta_{1} \tau \right) \left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2} \right) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3} \tau Y_{1}(\tau) \right] - \left[-\frac{Y_{0}(\beta_{1} \tau) \left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2} \right) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3} \tau J_{1}(\tau) \right] \right]}{\left[\left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2} \right) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3} \tau J_{1}(\tau) \right]^{2} + \left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2} \right) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3} \tau Y_{1}(\tau) \right]^{2} \right\}} d\tau .$$

$$(9.1.24)$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

Понижение в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi T} F_{Lw} \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{B}, S \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}} \right), \tag{9.1.25}$$

где

$$F_{Lw}(u,\beta_{2},\beta_{3}) = 32 \frac{\beta_{3}^{2}}{\pi^{2}} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}{4u}\right)\right] \frac{\tau}{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}}{\left[\left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2}\right)J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau J_{1}(\tau)\right]^{2} + \left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2}\right)Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau Y_{1}(\tau)\right]^{2}\right\}} d\tau .$$
 (9.1.26)

Способы обработки откачки из скважины большого диаметра

Подбор параметров

Таблица 9.1.4 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.1.23	T, S, B	$s-\lg t$
9.1.25		$s_w - \lg t$

Откачка с постоянным понижением

Базовые аналитические зависимости

Решения для понижения

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1959b, 1964c]

$$s = s_w Z \left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \frac{r_w}{B} \right). \tag{9.1.27}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для малых значений времени или для неравенства $\frac{r^2}{at} > 25$ понижение в наблюдательной скважине

$$s \approx s_w \sqrt{\frac{r_w}{4r}} \left[\exp\left(\frac{r_w - r}{B}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{\sqrt{at}}{B} - \frac{r_w - r}{2\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{r - r_w}{B}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{at}}{B} + \frac{r - r_w}{2\sqrt{at}}\right) \right]. \quad (9.1.28)$$

2. Для больших значений времени или для неравенства $\frac{at}{B^2} > 5$ понижение в наблюдательной скважине

$$s \approx \frac{s_w W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r_w}{B}\right)}{2K_0\left(\frac{r_w}{B}\right)}.$$
 (9.1.29)

Альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации для понижения [Sternberg, 1969]

Аналог уравнения (9.1.27):

$$s = s_{w} \frac{K_{0} \left(r \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^{2}}} \right)}{K_{0} \left(r_{w} \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^{2}}} \right)}.$$
 (9.1.30)

Уравнения стационарного периода

1. Понижение на период стационара в наблюдательной скважине

$$s_m = s_w \frac{K_0(r/B)}{K_0(r_w/B)}. (9.1.31)$$

2. Определение постоянного понижения (s_w) в опытной скважине по расходу на период стационара (для неравенства $r_w/B < 0.01$):

$$s_w = \frac{Q_s}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r_w}{B}\right) = -\frac{Q_s}{2\pi T} \ln \frac{0.89 r_w}{B},$$
 (9.1.32)

где Q_s – расход на период стационара, м³/сут

Частный случай для стационарного периода (для неравенства r/B < 0.05)

$$s_m \approx s_w \frac{\ln \frac{0.89r}{B}}{\ln \frac{0.89r_w}{B}} \approx -\frac{Q_s}{2\pi T} \ln \frac{0.89r}{B}$$
 (9.1.33)

Решения для расхода

Уравнения нестационарной фильтрации

Расход из опытной скважины

$$Q = 2\pi T s_w G\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r_w}{B}\right). \tag{9.1.34}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для малых значений времени или для неравенства $\frac{r^2}{at} > 25$ расход из опытной скважины

$$Q = 2\pi T s_w \left[0.5 + \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \exp\left(-\frac{at}{B^2}\right) \right]. \tag{9.1.35}$$

2. Для больших значений времени или для неравенства $at/B^2 > 5$ расход из опытной скважины

$$Q \approx \frac{4\pi T s_w}{W\left(\frac{r_w^2}{4at}, \frac{r_w}{B}\right)}.$$
 (9.1.36)

Альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации [Sternberg, 1969] Аналог уравнения (9.1.34):

$$Q = 2\pi T s_w r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \frac{K_1 \left(r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right)}{K_0 \left(r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right)}.$$
 (9.1.37)

Для малых значений $r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}}$ уравнение (9.1.37) записывается в виде

$$Q = \frac{2\pi T s_w}{K_0 \left(r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right)}.$$
 (9.1.38)

Уравнения стационарного периода

Расход из опытной скважины

$$Q_s = 2\pi T s_w \left(\frac{r_w}{B}\right) \frac{K_1(r/B)}{K_0(r_w/B)}.$$
 (9.1.39)

Частный случай для стационарного периода (для неравенства $r_w/B < 0.05$)

$$Q_s = \frac{2\pi T s_w}{K_0(r_w / B)}. (9.1.40)$$

Способы обработки откачки с постоянным понижением

Способ эталонной кривой

Таблица 9.1.5

Расчетные формулы для определения параметров

	1 1 4			
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезо- проводность, м ² /сут	Параметр перетекания, м
$\lg Q - \lg t$	$\lg G\left(u, \frac{r_w}{B}\right) - \lg u$	$T = \frac{10^D}{2\pi s_w}$	$a = \frac{10^E}{r_w^2}$	Подбор при построении

 Π р и м е ч а н и е . Параметр перетекания определяется подбором при построении эталонной кривой.

Точечные способы

1. Способ отношения понижений (определение подбором пьезопроводности и параметра перетекания по отношению расходов опытной скважины на два момента времени):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{G\left(\frac{at_1}{r_w^2}, \frac{r_w}{B}\right)}{G\left(\frac{at_2}{r_w^2}, \frac{r_w}{B}\right)}.$$
(9.1.41)

- 2. Определение подбором параметра перетекания по понижению на период стационара: на основе уравнения (9.1.31).
- 3. Определение параметра перетекания по понижению в опытной скважине и расходу на период стационара (для неравенства $r_w / B < 0.01$):

$$B = \exp\left[\frac{2\pi T s_w}{Q_s} + \ln(0.89r_w)\right]. \tag{9.1.42}$$

4. Определение параметра перетекания по понижению в наблюдательной скважине и расходу на период стационара (для неравенства r/B < 0.05):

$$B \approx \exp\left[\frac{2\pi T s_m}{Q_s} + \ln(0.89r_w)\right]. \tag{9.1.43}$$

Подбор параметров

Таблица 9.1.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.1.27	a, B	$s-\lg t$
9.1.34	T, a, B	$Q - \lg t$

9.1.2. Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из трех слоев два хорошо проницаемых изотропных пласта разделены слабопроницаемым слоем;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой (пласт 2), в котором находится опытная скважина;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой (пласт 1), в котором отсутствует опытная скважина; при откачке из двух пластов смежный пласт находится сверху;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в одном из хорошо проницаемых пластов или в двух пластах одновременно, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в хорошо проницаемых пластах;

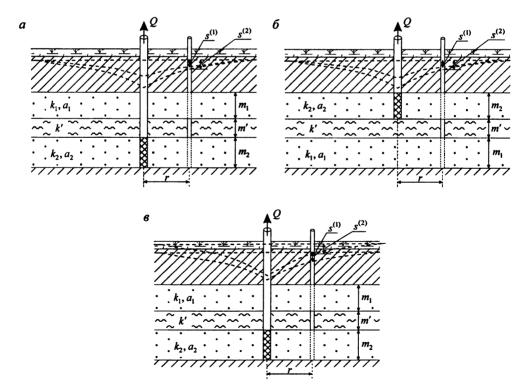


Рис. 9.3. Типовые схемы водоносного комплекса с перетеканием (разрезы) при откачке из основного пласта, уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования.

a — основной пласт находится в подошве, δ — в кровле водоносного комплекса;

в – пример водоносного комплекса с различными напорами в хорошо проницаемых пластах.

- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое не учитывается;
- типовая схема: рис. 9.3.

Рассматривается три варианта:

вариант 1: опытная скважина находится в нижнем водоносном пласте;

вариант 2: опытная скважина находится в верхнем водоносном пласте;

вариант 3: опытная скважина находится в обоих водоносных пластах.

<u>Литература:</u> Hantush, 1967с; Бабушкин и др., 1974; Шестаков, 2000.

Условные обозначения:

A – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

a – пьезопроводность водоносных пластов при $a_1 = a_2$, м²/сут;

 a_1, a_2 – пьезопроводности 1-го и 2-го водоносных пластов, м²/сут;

 a^* — приведенная пьезопроводность водоносных пластов: определяется уравнением (9.1.78), м²/сут;

B – параметр перетекания при $B_1 = B_2$, м;

 B_1 — параметр, характеризующий перетекание в 1-й пласт: определяется уравнением (9.1.56), м;

 $B_2\,$ – параметр, характеризующий перетекание во 2-й пласт: определяется уравнением (9.1.57), м;

 B^* – параметр перетекания: определяется уравнением (9.1.53) или (9.1.54), м;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 f_1, f_2 – вспомогательные функции: определяются уравнениями (9.1.65) – (9.1.68);

 $I(u, \beta)$ – специальная функция (см. уравнение (9.1.70) и Приложение 18);

 $J_0(u)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации 1-го и 2-го водоносных пластов, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

 m_1, m_2 — мощности 1-го и 2-го водоносных пластов, м;

m' – мощность разделяющего слоя, м;

Q – расход опытной скважины при откачке из одного пласта, м³/сут;

 Q_1, Q_2 – расходы опытных скважин в 1-м и 2-м водоносных пластах (при откачке из обоих пластов), м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1 , r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, находящихся в одном пласте или в разных пластах. При откачке из обоих пластов одновременно, когда опытные скважины находятся не на одной оси (рис. 9.5, 6): r_1 , r_2 — расстояния от опытной скважины, находящейся соответственно в первом и втором пласте до наблюдательной скважины, находящейся в любом пласте, м; S_1 , S_2 — водоотдачи 1-го и 2-го водоносных пластов;

 $s^{(1)}$, $s^{(2)}$ – понижения в 1-м и 2-м водоносных пластах, м;

- $s_1^{(1)}, s_2^{(1)}$ понижения в 1-м водоносном пласте для первой и второй наблюдательных скважин (или для двух моментов времени в одной наблюдательной скважине для точечных способов обработки), м;
- $s_1^{(2)}$, $s_2^{(2)}$ понижения во 2-м водоносном пласте для первой и второй наблюдательных скважин (или для двух моментов времени в одной наблюдательной скважине для точечных способов обработки), м;
- T проводимость водоносных пластов при $T_1 = T_2$, м²/сут;
- $T_1 = k_1 m_1$, $T_2 = k_2 m_2$ проводимости 1-го и 2-го водоносных пластов, м²/сут;
- T^* приведенная проводимость водоносных пластов: определяется уравнением (9.1.55), м²/сут; t время от начала откачки, сут;
- t_1, t_2 время двух замеров для периода квазистационарного режима (для точечных способов обработки), сут;
- t' интервал времени между началом работы опытных скважин в пластах 1 и 2, сут;
- u аргумент функций;
- W(u) функция влияния скважины (Приложение 26);
- $W(u,\beta)$ функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);
- $W_1(u,\beta)$ специальная функция (см. уравнение (9.1.73) и Приложение 28);
- $W'(u,\beta)$ вспомогательная функция для построения эталонной кривой;
- β аргумент функций;
- σ см. уравнение (9.1.69);
- $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ определяются уравнениями (9.1.50) (9.1.52);
- $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ определяются уравнениями (9.1.46) (9.1.49).

Список решений

Откачка из 2-го пласта:

- понижения в смежном и основном пластах для нестационарного периода: уравнения (9.1.44) и (9.1.45);
- понижения в смежном и основном пластах при равных пьезопроводностях пластов для нестационарного периода: уравнения (9.1.58) и (9.1.59);
- понижения в смежном и основном пластах для начальных интервалов времени нестационарного периода: уравнения (9.1.63) и (9.1.64);
- понижения в смежном и основном пластах при равных проводимостях пластов для начальных интервалов времени нестационарного периода: уравнения (9.1.71) и (9.1.72);
- понижение в смежном пласте для начальных моментов времени: уравнение (9.1.74);
- понижения в смежном и основном пластах для больших интервалов времени нестационарного периода: уравнения (9.1.76) и (9.1.77);
- понижения в смежном и основном пластах для квазистационарного периода: уравнения (9.1.79) и (9.1.80).

Откачка из 1-го и 2-го пластов:

- понижения в 1-м и 2-м пластах при равных пьезопроводностях водоносных пластов для нестационарного периода: уравнения (9.1.92) и (9.1.93);
- понижения в 1-м и 2-м пластах для квазистационарного периода: уравнения (9.1.96) и (9.1.97).

Откачка с постоянным расходом из 2-го пласта

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации [Hantush, 1967c]

Понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в первом и втором водоносных пластах,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} (\psi_1 - \psi_2), \qquad (9.1.44)$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} (\psi_1 - \psi_2 + \psi_3 - \psi_4), \qquad (9.1.45)$$

где

$$\psi_1 = \frac{a_2}{a_1} \frac{r^2}{B^{*2}} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\varphi_3 \frac{a_1 t}{r^2}\right) \right] \frac{\tau}{\varphi_1^2 \varphi_3} J_0(\tau) d\tau , \qquad (9.1.46)$$

$$\psi_2 = \frac{a_2}{a_1} \frac{r^2}{B^{*2}} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\varphi_2 \frac{a_1 t}{r^2}\right) \right] \frac{\tau}{\varphi_1^2 \varphi_2} J_0(\tau) d\tau , \qquad (9.1.47)$$

$$\psi_{3} = \frac{a_{2}}{a_{1}} \left(1 + \frac{T_{1}}{T_{2}} \right) \int_{0}^{\infty} \left[\left(\varphi_{3} - \tau^{2} \right) \exp \left(-\varphi_{3} \frac{a_{1}t}{r^{2}} \right) \right] \frac{\tau}{\varphi_{1}^{2} \varphi_{3}} J_{0}(\tau) d\tau , \qquad (9.1.48)$$

$$\psi_4 = \frac{a_2}{a_1} \left(1 + \frac{T_1}{T_2} \right) \int_0^{\infty} \left[\frac{\varphi_1^2 \tau^2}{\varphi_3} - \left(\varphi_2 - \tau^2 \right) \exp \left(-\varphi_2 \frac{a_1 t}{r^2} \right) \right] \frac{\tau}{\varphi_1^2 \varphi_2} J_0(\tau) d\tau , \qquad (9.1.49)$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\left(1 - \frac{a_2}{a_1}\right)r^2 + \left(\frac{r}{B_1}\right)^2 - \frac{a_2}{a_1}\left(\frac{r}{B_2}\right)^2\right)^2 + 4\frac{a_2}{a_1}\left(\frac{r^2}{B_1B_2}\right)^2},$$
 (9.1.50)

$$\varphi_2 = 0.5 \left[\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) r^2 + \left(\frac{r}{B_1} \right)^2 + \frac{a_2}{a_1} \left(\frac{r}{B_2} \right)^2 + \varphi_1^2 \right],$$
 (9.1.51)

$$\varphi_3 = 0.5 \left[\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) \tau^2 + \left(\frac{r}{B_1} \right)^2 + \frac{a_2}{a_1} \left(\frac{r}{B_2} \right)^2 - \varphi_1^2 \right]; \tag{9.1.52}$$

$$B^* = \sqrt{T^* \frac{m'}{k'}} \tag{9.1.53}$$

или в другой форме

$$\frac{1}{R^{*2}} = \frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2}; (9.1.54)$$

$$T^{\bullet} = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}; \tag{9.1.55}$$

 B_1 – параметр, характеризующий перетекание в 1-й пласт,

$$B_1 = \sqrt{T_1 \frac{m'}{k'}} \,; \tag{9.1.56}$$

 B_2 – параметр, характеризующий перетекание во 2-й пласт,

$$B_2 = \sqrt{T_2 \frac{m'}{k'}} \,; \tag{9.1.57}$$

Частные случаи для нестационарного периода

1. Понижение в водоносных пластах при равных пьезопроводностях водоносных пластов $a_1 = a_2 = a$

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[W \left(\frac{r^2}{4at} \right) - W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B^*} \right) \right], \tag{9.1.58}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \frac{T_1}{T_2} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B^*}\right) \right]. \tag{9.1.59}$$

Комбинируя уравнения (9.1.58) и (9.1.59), получим

$$s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 = \frac{Q}{4\pi}W\left(\frac{r^2}{4a^*t}\right)$$
 (9.1.60)

или

$$s^{(1)} - s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} W \left(\frac{r^2}{4a^* t}, \frac{r}{B^*} \right). \tag{9.1.61}$$

Наблюдательные скважины в основном и смежном пластах для решений по уравнениям (9.1.60) и (9.1.61) должны находиться на одинаковом расстоянии от опытной скважины (рис. 9.4, 6).

2. Для малых значений времени

$$t < 0.2 \frac{|a_2 - a_1|}{a_1 a_2} \frac{T_2}{T_1} B_1^2 = 0.2 \frac{1}{|a_1|} - \frac{1}{|a_2|} \frac{T_2}{T_1} B_1^2$$
 (9.1.62)

уравнения понижений в наблюдательных скважинах следующие:

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \left[W \left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \frac{r}{B_2} \right) - W \left(\frac{r^2}{4a_1 t}, \frac{r}{B_1} \right) + f_1 + f_2 \right], \tag{9.1.63}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} W \left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \frac{r}{B_2} \right). \tag{9.1.64}$$

Функции f_1 и f_2 в уравнении (9.1.63) для параметра $\sigma \neq 0$ (см. уравнение (9.1.69)) определяются следующим образом:

при
$$\frac{\sigma B_1^2}{a_1} < 1$$
 или $S_1 > S_2$

$$f_1 = \exp(-\sigma t)W\left(\frac{r^2}{4a_1t}, \frac{r}{B_1}\sqrt{1-\sigma\frac{r^2}{B_1^2a_1}}\right),$$
 (9.1.65)

при
$$\frac{\sigma B_1^2}{a_1} > 1$$
 или $S_1 < S_2$

$$f_1 = \exp\left(-\frac{a_1 t}{B_1^2}\right) I\left(\frac{r^2}{4a_1 t}, \sigma t - \frac{a_1 t}{B_1^2}\right),$$
 (9.1.66)

при $\frac{\sigma B_2^2}{a_2} < 1$ или $S_1 > S_2$

$$f_2 = \exp(-\sigma t)W\left(\frac{r^2}{4a_2t}, \frac{r}{B_2}\sqrt{1-\sigma\frac{r^2}{B_2^2a_2}}\right),$$
 (9.1.67)

при $\frac{\sigma B_2^2}{a_2} > 1$ или $S_1 < S_2$

$$f_2 = \exp\left(-\frac{a_2 t}{B_2^2}\right) I\left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \sigma t - \frac{a_2 t}{B_2^2}\right),\tag{9.1.68}$$

где

$$\sigma = \frac{a_1 a_2}{a_2 - a_1} \left(\frac{1}{B_1^2} - \frac{1}{B_2^2} \right) = \frac{k' (T_2 - T_1)}{m' (T_2 S_1 - T_1 S_2)},$$
(9.1.69)

$$I(u,\beta) = e^{-\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-u\tau + \frac{\beta}{\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau}.$$
 (9.1.70)

3. Для малых значений времени (неравенство (9.1.62)) при равных проводимостях водоносных пластов $T_1 = T_2 = T$ и, следовательно, при равных параметрах перетекания $B_1 = B_2 = B$ понижение в пластах

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T} \frac{a_1 a_2 t}{(a_2 - a_1)B^2} \begin{vmatrix} W\left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \frac{r}{B}\right) - \frac{rB}{2a_2 t} W_1\left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \frac{r}{B}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a_1 t}, \frac{r}{B}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a_1 t}, \frac{r}{B}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a_1 t}, \frac{r}{B}\right) \end{vmatrix},$$
(9.1.71)

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4a_2 t}, \frac{r}{B} \right), \tag{9.1.72}$$

$$W_1(u,\beta) = \frac{\beta}{2} \int_{u}^{\infty} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^2}.$$
 (9.1.73)

4. Для малых значений времени при расположении наблюдательной скважины в смежном пласте над опытной скважиной ($r \to 0$) (см. рис. 9.4, e) [Шестаков, 2000]

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi} \frac{k't}{m'(S_1T_2 + S_2T_1)}. (9.1.74)$$

5. Для больших значений времени

$$t > 5 \frac{|a_2 - a_1|}{a_1 a_2} \frac{T_2}{T_1} B_1^2 = 5 \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \frac{T_2}{T_1} B_1^2$$
 (9.1.75)

уравнения понижений в наблюдателовных скважинах следующие:

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[W \left(\frac{r^2}{4a^* t} \right) - W \left(\frac{r^2}{4a^* t}, \frac{r}{B^*} \right) \right], \tag{9.1.76}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^2}{4a^*t}\right) + \frac{T_1}{T_2} W\left(\frac{r^2}{4a^*t}, \frac{r}{B^*}\right) + \\ + \left(\frac{1}{a^*} - \frac{1}{a_2}\right) \frac{B_1^2}{t} \exp\left(-\frac{r^2}{4a^*t}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{a^*t}{B^{*2}}\right)\right) \end{bmatrix}, \tag{9.1.77}$$

где a^* – приведенная пьезопроводность:

$$a^* = \frac{2a_1a_2}{a_1 + a_2} \,. \tag{9.1.78}$$

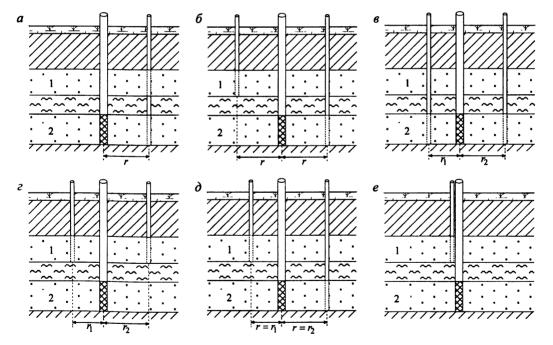


Рис. 9.4. Примеры расположения наблюдательных скважин в основном и смежных пластах.

Уравнения для квазистационарного периода

Понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в первом и втором водоносных пластах,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*t}{r^2} - 2K_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) \right], \tag{9.1.79}$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*t}{r^2} + 2\frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) \right]. \tag{9.1.80}$$

Комбинируя уравнения (9.1.79) и (9.1.80), получим

$$s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 = \frac{Q}{4\pi} \ln \frac{2.25a^*t}{r^2}$$
 (9.1.81)

или

$$s^{(2)} - s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_2} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{9.1.82}$$

Наблюдательные скважины в основном и смежном пластах для решений по уравнениям (9.1.81) и (9.1.82) должны находиться на одинаковом расстоянии от опытной скважины (см. рис. 9.4, 6).

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 9.1.7

подопрасмые параметры и рекомендуемые графики				
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
9.1.44	T T a a k'	$s^{(1)} - \lg t$		
9.1.45	T_1, T_2, a_1, a_2, k'	$s^{(2)} - \lg t$		

Обработка малых интервалов времени

Временной диапазон замеров, которые можно применять для обработки, определяется неравенством (9.1.62).

Способ эталонной кривой (на основе уравнения (9.1.64) или (9.1.72))

Таблица 9.1.8 Расчетные формулы для определения параметров основного пласта

- ac to the property of the pr				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м
$\frac{\lg s^{(2)} - \lg \frac{t}{r^2}}{\lg s^{(2)} - \lg t}$	$ \lg W \left(u, \frac{r}{B} \right) - \lg \frac{1}{u} $	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a_2 = \frac{10^E}{4}$ $a_2 = \frac{10^E}{4}r^2$	Подбор при построении

Примечание. График эталонной кривой строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания — подбором при построении эталонной кривой. При обработке на основе уравнения (9.1.64) в табл. 9.1.8 необходимо сделать замену: $T = T_2$, $B = B_2$.

<u>Способ отношения понижений</u> (для основного пласта на основе уравнений (9.1.64) и (9.1.72))

$$\frac{s_1^{(2)}}{s_2^{(2)}} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4a_2t}, \frac{r_1}{B_2}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4a_2t}, \frac{r_2}{B_2}\right)},\tag{9.1.83}$$

$$\frac{s_1^{(2)}}{s_2^{(2)}} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4a_2t}, \frac{r_1}{B}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4a_2t}, \frac{r_2}{B}\right)}.$$
(9.1.84)

Подбор пьезопроводности основного пласта (a_2) и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации разделяющего слоя по начальным понижениям при расположении наблюдательной скважины в смежном пласте над опытной скважиной (определение осуществляется при известных фильтрационных параметрах водоносных пластов):

$$k' = \frac{2\pi s^{(1)} m' (S_1 T_2 + S_2 T_1)}{Ot}.$$
 (9.1.85)

Подбор параметров

Таблица 9.1.9 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
	$T_1 \neq T_2$	
9.1.63	$T_1, T_2, a_1, a_2, S_1, S_2, k'$	$s^{(1)}-\lg t$
9.1.64	T_2, a_2, k'	$s^{(2)} - \lg t$
9.1.83	T_2, a_2, k' или a_2, B_2	$s_1^{(2)}/s_2^{(2)}-\lg t$
	$T=T_1=T_2$	
9.1.71	T, a_1, a_2, k'	$s^{(1)} - \lg t$
9.1.72	T, a_2, k'	$s^{(2)} - \lg t$
9.1.84	T, a_2, k' или a_2, B	$s_1^{(2)}/s_2^{(2)}-\lg t$

Обработка больших интервалов времени

Временной диапазон замеров, которые можно применять для обработки, определяется неравенством (9.1.75).

Способ эталонной кривой (на основе уравнения (9.1.76))

Таблица 9.1.10 Расчетные формулы для определения параметров смежного пласта

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м
$\lg s^{(1)} - \lg \frac{t}{r^2}$	$\log W^{\prime}(u^{r}) - \log \frac{1}{r}$	$T \perp T = Q$	$a^* = \frac{10^E}{4}$	<i>B</i> [*]
$\lg s^{(1)} - \lg t$	$ \lg W' \left(u, \frac{r}{B^*} \right) - \lg \frac{1}{u} $	$\frac{1}{4\pi \cdot 10^D}$	$a^* = \frac{10^E}{4}r^2$	B*

Примечание.
$$W'(u,r/B^*) = W(u) - W(u,r/B^*)$$
.

График эталонной кривой строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания – подбором при построении эталонной кривой.

Способ отношения понижений (на основе уравнения (9.1.76))

$$\frac{s_1^{(1)}}{s_2^{(1)}} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4a^*t}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a^*t}, \frac{r_1}{B^*}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4a^*t}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a^*t}, \frac{r_2}{B^*}\right)}.$$
(9.1.86)

Подбор приведенной пьезопроводности (a^*) и параметра перетекания (B^*) осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 9.1.11 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.1.76	T_1, T_2, a^*, k' или T_1, T_2, a_1, a_2, k'	$s^{(1)} - \lg t$
9.1.77	T_1, T_2, a_1, a_2, k'	$s^{(2)} - \lg t$
9.1.86	T_1, T_2, a^*, k' или a^*, B^*	$s_1^{(1)}/s_2^{(1)}-\lg t$

Обработка квазистационарного периода

Способ прямой линии

1. На основе уравнений (9.1.79) и (9.1.80)

Таблица 9.1.12 Расчетные формулы для определения параметров

	гасчетные формулы дл	я определения пар	ламет ров
Способ обработки	График	Суммарная проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное	$s^{(1)} - \lg t$		$a^{\bullet} = 10^{A/C + \lg \frac{r^2 \exp(-2K_0(r/B^{\bullet}))}{2.25}}$
прослеживание	$s^{(2)} - \lg t$		_
Площадное прослеживание	$s^{(1)} - \lg \frac{\exp\left[2K_0\left(\frac{r}{B^*}\right)\right]}{r^2}$	$T_1 + T_2 = \frac{0.183Q}{C}$	$a^* = 10^{A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$s^{(1)} - \lg \frac{\exp\left[2K_0\left(\frac{r}{B^*}\right)\right]t}{r^2}$		$a^* = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Примечание. Пьезопроводность по графику временного прослеживания определяется при заданном параметре перетекания. Графики площадного и комбинированного прослеживания строятся при заданном параметре перетекания.

2. На основе уравнения (9.1.81)

Таблица 9.1.13 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2) - \lg t$		$a^* = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$\left(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2\right) - \lg r$	T_1, T_2	$a^* = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$\left(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2\right) - \lg\frac{t}{r^2}$		$a^* = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Примечание. Графики строятся при заданных проводимостях основного и смежного пластов.

Точечные способы

Способ разности понижений

1. По понижениям в одной скважине на разные моменты времени на основе уравнений (9.1.79) и (9.1.80):

$$s_1^{(1)} - s_2^{(1)} = \frac{Q}{4\pi(T_1 + T_2)} \ln \frac{t_1}{t_2}, \qquad (9.1.87)$$

$$s_1^{(2)} - s_2^{(2)} = \frac{Q}{4\pi(T_1 + T_2)} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (9.1.88)

Понижения берутся на период квазистационарного режима. Из уравнений (9.1.87) и (9.1.88) определяется суммарная проводимость ($T_1 + T_2$) основного и смежного пластов:

$$T_1 + T_2 = \frac{Q}{4\pi \left(s_1^{(1)} - s_2^{(1)}\right)} \ln \frac{t_1}{t_2} \,. \tag{9.1.89}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{Q}{4\pi \left(s_1^{(2)} - s_2^{(2)}\right)} \ln \frac{t_1}{t_2}.$$
 (9.1.90)

2. По понижениям в двух наблюдательных скважинах, находящихся в разных водоносных пластах, но на одном расстоянии от опытной скважины (рис. 9.4, δ); на основе уравнения (9.1.82) определяется проводимость основного пласта (T_2) при известном параметре перетекания:

$$T_2 = \frac{Q}{2\pi \left(s^{(2)} - s^{(1)}\right)} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{9.1.91}$$

Одновременная откачка из двух пластов

Две опытные скважины находятся в пластах 1 и 2 на одной оси (рис. 9.5, a) или на некотором расстоянии друг от друга (рис. 9.5, b). Опробование осуществляется с постоянным, но разным в каждой скважине расходом. Допускается асинхронное начало в работе опытных скважин.

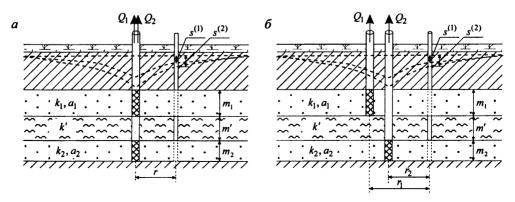


Рис. 9.5. Типовые схемы водоносного комплекса с перетеканием при откачке из обоих пластов (разрез). a – опытные скважины в 1-м и 2-м пластах находятся на одной оси, 6 – не на одной оси.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в 1-м и 2-м водоносных пластах,

для времени $t > 5 \frac{{m'}^2}{a'}$ [Бабушкин и др., 1974]

$$s^{(1)} = \frac{1}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[(Q_1 + Q_2) W \left(\frac{r^2}{4a^* t} \right) + \left(Q_1 \frac{T_2}{T_1} - Q_2 \right) W \left(\frac{r^2}{4a^* t}, \frac{r}{B^*} \right) \right], \quad (9.1.92)$$

$$s^{(2)} = \frac{1}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[(Q_1 + Q_2) W \left(\frac{r^2}{4a^* t} \right) + \left(Q_2 \frac{T_1}{T_2} - Q_1 \right) W \left(\frac{r^2}{4a^* t}, \frac{r}{B^*} \right) \right]. \tag{9.1.93}$$

Комбинируя уравнения (9.1.92) и (9.1.93), получим

$$s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi}W\left(\frac{r^2}{4a^*t}\right)$$
(9.1.94)

или

$$s^{(2)} - s^{(1)} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \right) W \left(\frac{r^2}{4a^*t}, \frac{r}{B^*} \right). \tag{9.1.95}$$

Уравнения квазистационарного периода [Hantush, 1967c]

1. Понижения в наблюдательных скважинах, находящихся в 1-м и 2-м водоносных пластах, с учетом асинхронного начала работы опытных скважин и их пространственного положения, когда допускается расположение опытных скважин не на одной оси (см. рис. 9.5, 6),

$$s^{(1)} = \begin{cases} \frac{Q_2}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*t}{r_2^2} - 2K_0 \left(\frac{r_2}{B^*} \right) \right] + \\ + \frac{Q_1}{4\pi (T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*(t - t')}{r_1^2} + 2\frac{T_2}{T_1} K_0 \left(\frac{r_1}{B^*} \right) \right] \end{cases}, \tag{9.1.96}$$

$$s^{(2)} = \begin{cases} \frac{Q_2}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*t}{r_2^2} + 2\frac{T_1}{T_2} K_0 \left(\frac{r_2}{B^*} \right) \right] + \\ + \frac{Q_1}{4\pi(T_1 + T_2)} \left[\ln \frac{2.25a^*(t - t')}{r_1^2} - 2K_0 \left(\frac{r_1}{B^*} \right) \right] \end{cases}, \tag{9.1.97}$$

где t' – интервал времени между началом работы опытных скважин в пластах 1 и 2, сут; r_1, r_2 – горизонтальные расстояния от опытной скважины, находящейся соответственно в первом и втором пласте, до наблюдательной скважины, находящейся в любом пласте (рис. 9.5, δ), м.

Комбинируя уравнения (9.1.96) и (9.1.97), получим

$$s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 = \frac{Q_2}{4\pi} \ln \frac{2.25a^*t}{r_2^2} + \frac{Q_1}{4\pi} \ln \frac{2.25a^*(t-t')}{r_1^2}$$
(9.1.98)

или

$$s^{(2)} - s^{(1)} = \frac{Q_2}{2\pi T_2} K_0 \left(\frac{r_2}{B^*}\right) - \frac{Q_1}{2\pi T_1} K_0 \left(\frac{r_1}{B^*}\right). \tag{9.1.99}$$

2. При значениях $r = r_1 = r_2$ и t' = 0 (т.е. наблюдательные скважины в основном и смежном пластах находятся на одинаковом расстоянии от опытной скважины и время начала откачки из двух пластов одинаковое) уравнения (9.1.98) и (9.1.99) упрощаются:

$$s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2 = \frac{(Q_2 + Q_1)}{4\pi} \ln \frac{2.25a^*t}{r^2}$$
 (9.1.100)

или

$$s^{(2)} - s^{(1)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \right) K_0 \left(\frac{r}{B^*} \right). \tag{9.1.101}$$

Способы обработки откачки из двух пластов

Способ прямой линии (на основе уравнения (9.1.100)

Таблица 9.1.14 Расчетные формулы для определения параметров

	·	-	-
Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2) - \lg t$		$a^* = 10^{A/C + \lg \frac{r^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2) - \lg r$	T_1, T_2	$a^* = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$\left(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2\right) - \lg\frac{t}{r^2}$		$a^* = 10^{A/C - \lg 2.25}$

Примечание. Графики строятся при заданных проводимостях основного и смежного пластов.

Подбор параметров

Таблица 9.1.15 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.1.92, 9.1.96	T_1, T_2, a^*, k' или T_1, T_2, a_1, a_2, k'	$s^{(1)} - \lg t$
9.1.93, 9.1.97	I_1, I_2, a, k или I_1, I_2, a_1, a_2, k	$s^{(2)} - \lg t$
9.1.94, 9.1.98, 9.1.100	T_1, T_2, a^* или T_1, T_2, a_1, a_2	$(s^{(1)}T_1 + s^{(2)}T_2) - \lg t$
9.1.95	$T_1, T_2, a^{\bullet}, k'$ или T_1, T_2, a_1, a_2, k'	$\left(s^{(2)}-s^{(1)}\right)-\lg t$
9.1.99, 9.1.101	T_1, T_2, k'	$(s^{(2)}-s^{(1)})-\lg r$

9.2. Перетекание с учетом емкости разделяющего слоя

В данном разделе рассматривается пять задач:

- 1) трехслойные системы: хорошо проницаемый слой и два слабопроницаемых слоя;
- 2) двухслойные системы: хорошо проницаемый и слабопроницаемый слои;
- трехслойные системы: два хорошо проницаемых слоя разделены слабопроницаемым слоем;
- трехслойные системы (незначительное перетекание): два хорошо проницаемых слоя разделены слабопроницаемым слоем;
- 5) двухслойные системы (незначительное перетекание): хорошо проницаемый слой и слабопроницаемый полуограниченной мощности.

9.2.1. Трехслойные системы: хорошо проницаемый слой и два слабопроницаемых слоя

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из изотропного хорошо проницаемого слоя, в кровле и подошве которого находятся слабопроницаемые слои;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;
- смежные водоносные пласты: хорошо проницаемые слои, которые могут находиться в кровле и подошве водоносного комплекса; смежный водоносный пласт, который находится в кровле водоносного комплекса, может быть напорным или безнапорным;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- поток в слабопроницаемых слоях вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемых слоях учитывается;
- типовые схемы: рис. 9.6.

Рассматривается три варианта:

- вариант 1: водоносный комплекс подстилает и перекрывает хорошо проницаемые водоносные пласты, напоры в которых остаются постоянными (рис. 9.6, a, δ);
- вариант 2: водоносный комплекс подстилает и перекрывает непроницаемые слои (рис. 9.6, ∂);
- вариант 3: подошву водоносного комплекса подстилает непроницаемый слой, а кровлю перекрывает хорошо проницаемый водоносный пласт, напор в котором остается постоянным (рис. 9.6, в, г), или, наоборот, подошву водоносного комплекса подстилает хорошо проницаемый водоносный пласт с постоянным напором, а кровлю перекрывает непроницаемый слой (рис. 9.6, е).

Литература: Hantush, 1960.

Условные обозначения:

- a пьезопроводность основного водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;
- B_1, B_2 параметры, характеризующие перетекание соответственно через кровлю (уравнение (9.2.2)) и через подошву (уравнение (9.2.3)) водоносного пласта, м;
- $D\,$ расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

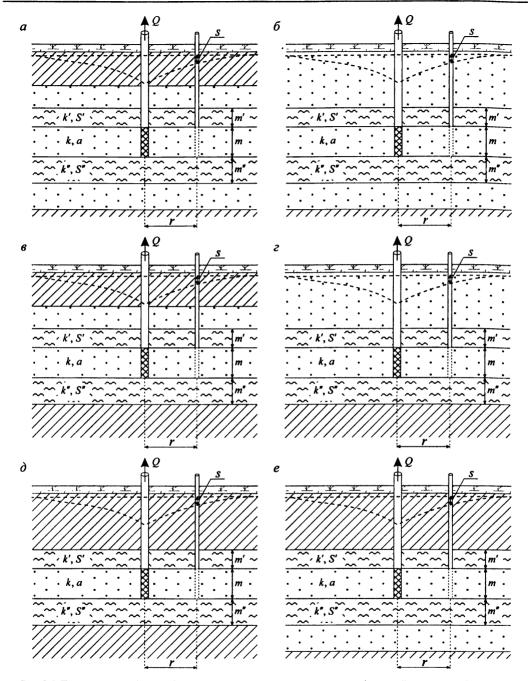


Рис. 9.6. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (трехслойные системы) с учетом емкости слабопроницаемых слоев.

В зависимости от граничных условий на кровле и подошве водоносного комплекса рассматриваются следующие варианты: a, b – в кровле и подошве находятся водоносные пласты с постоянным уровнем, водоносный пласт в кровле иапорный (a) или безнапорный (b); a, c – в кровле находится водоносный пласт с постоянным уровнем, напорный (a) или безнапорный (a), а в подошве – непроницаемый слой; a – в кровле и подошве находятся непроницаемые слои; a – в кровле и подошве находятся непроницаемый слой, a в подошве – водоносный пласт с постоянным уровнем.

 $H(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 17);

k – коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

k', k'' – коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего разделяющих слоев, м/сут;

m - мощность основного водоносного пласта, м;

m', m'' — мощности верхнего и нижнего разделяющих слоев, м;

Q — расход опытной скважины, м³/сут;

r — горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

S – водоотдача основного водоносного пласта;

S', S" - водоотдачи верхнего и нижнего разделяющих слоев;

s — понижение в основном водоносном пласте, м;

T = km – проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 β – ар умент функций.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение для малых интервалов времени (для всех трех вариантов): уравнение (9.2.1);
- понижение для 1-го, 2-го и 3-го вариантов для больших интервалов времени: уравнения (9.2.4), (9.2.5) и (9.2.6).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Для малых значений времени $t < 0.1 \frac{m'S'}{k'}$ и $t < 0.1 \frac{m''S''}{k''}$ решения для всех трех вариантов совпадают:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{4} \left(\frac{1}{B_1} \sqrt{\frac{S'}{S}} + \frac{1}{B_2} \sqrt{\frac{S''}{S}} \right) \right], \tag{9.2.1}$$

$$B_1 = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}, (9.2.2)$$

$$B_2 = \sqrt{T \frac{m''}{k''}} \,. \tag{9.2.3}$$

2. Для больших значений времени

Вариант 1. Для времени $t > 5 \frac{m'S'}{k'}$ и $t > 5 \frac{m''S''}{k''}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2}{4at} \left(1 + \frac{S' + S''}{3S} \right), r \sqrt{\left(\frac{1}{B_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{B_2} \right)^2} \right]. \tag{9.2.4}$$

Вариант 2. Для времени $t > 10 \frac{m'S'}{k'}$ и $t > 10 \frac{m''S''}{k''}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2}{4at} \left(1 + \frac{S' + S''}{S} \right) \right]. \tag{9.2.5}$$

Вариант 3. Для времени $t > 5 \frac{m'S'}{k'}$ и $t > 10 \frac{m''S''}{k''}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2}{4at} \left(1 + \frac{S'' + S'/3}{S} \right), \frac{r}{B_1} \right]. \tag{9.2.6}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой (на основе уравнения (9.2.5) для 2-го варианта)

Таблица 9.2.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$
$\lg s - \lg t$	u l	4 <i>n</i> ·10

Подбор параметров

Таблица 9.2.2 Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
9.2.1	T, S, S', S'', k', k''	- las	
9.2.4	T, S, S', S", k', k"		
9.2.5	T, S, S', S"	$s - \lg t$	
9.2.6	T, S, S', S'', k'		

Алгоритм определения параметров Hantush [1960]

Применяется для любого из трех вариантов для начальных моментов времени: время действия уравнения (9.2.1).

- 1. Построим семейство типовых кривых $\lg H(u,\beta) \lg \frac{1}{u}$ для различных значений аргумента β .
- 2. Построим график по фактическим данным: $\lg s \lg t$.
- 3. График фактических данных совместим с наиболее подходящей типовой кривой, которой будет соответствовать значение β .
- 4. На совмещенных графиках возьмем произвольную точку P, которой будут соответствовать следующие значения: $\lg H(u,\beta)$, $\lg \frac{1}{u}$, $\lg s$, $\lg t$.

5. Определим проводимость водоносного пласта по уже известным значениям $\lg H(u,\beta)$ и $\lg s$:

$$\lg T = \lg \frac{Q}{4\pi} - \lg s + \lg H(u, \beta). \tag{9.2.7}$$

6. Определим пьезопроводность водоносного пласта по уже известным значениям $\lg \frac{1}{u}$ и $\lg t$:

$$\lg a = \lg \frac{1}{u} - 2\lg \frac{2}{r} + \lg t . \tag{9.2.8}$$

По вычисленным параметрам проводимости и пьезопроводности определим водоотдачу водоносного пласта:

$$S = T/a. (9.2.9)$$

8. По значению аргумента β и вычисленным параметрам проводимости и водоотдачи определим обобщенный параметр:

$$k'S'm'' + k''S''m'' = \frac{16\beta^2}{r^2}TSm'm''. \qquad (9.2.10)$$

Замечания

- 1. Определение понижений на временном участке, не входящем в диапазоны времен уравнения (9.2.1) и уравнений (9.2.4), (9.2.5) или (9.2.6), осуществляется приближенно на графике $S\frac{4\pi T}{Q} \lg t$ после нахождения фильтрационных параметров. Рисуются кривые для малых значений времени по уравнению (9.2.1) и на большие моменты времени по уравнению (9.2.4), (9.2.5) или (9.2.6). Затем соединяются два участка кривых прямой линией.
- 2. Если $\frac{S'}{S} \le 0.01$ и $\frac{S''}{S} \le 0.01$, то влиянием объема воды в слабопроницаемых пластах можно пренебречь. Обработка в этом случае производится по схемам с перетеканием без учета емкости разделяющих слоев (см. раздел 9.1).

9.2.2. Двухслойные системы: хорошо проницаемый и слабопроницаемый слои

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из изотропного хорошо проницаемого слоя, в кровле или подошве которого находится слабопроницаемый слой;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, который может находиться в кровле или подошве водоносного комплекса; смежный водоносный пласт, который находится в кровле водоносного комплекса, может быть напорным или безнапорным;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте;

- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое учитывается;
- типовые схемы: рис. 9.7.

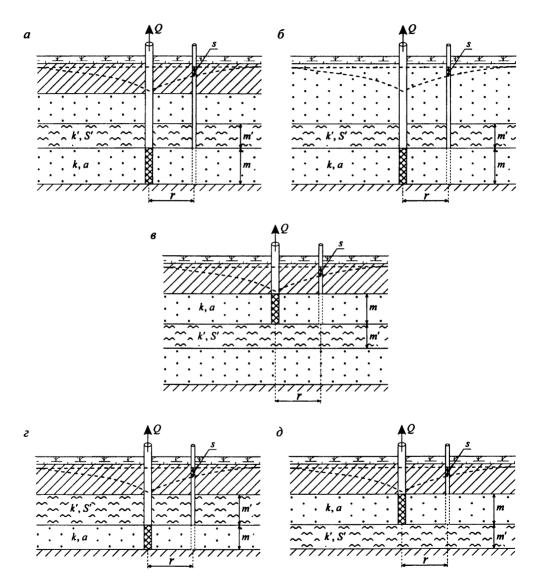


Рис. 9.7. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (двухслойные системы) с учетом смкости слабопроницаемого слоя.

В зависимости от граничных условий на кровле и подошве водоносного комплекса рассматриваются следующие варианты: a, b – в кровле водоносного комплекса находится напорный (a) или безнапорный (b) водоносный пласт с постоянным уровнем; b – в подошве водоносного комплекса находится напорный водоносный пласт с постоянным уровнем; b – кровля и подошва водоносного комплекса непроницаемые, слабопроницаемый слой перекрывает (b) или подстиласт (b) основной водоносный пласт.

Рассматривается два варианта:

вариант 1: к слабопроницаемому слою примыкает водоносный пласт, напор в котором остается постоянным (рис. 9.7, a-6);

вариант 2: водоносный комплекс подстилает и перекрывает непроницаемые слои (рис. 9.7, z, d).

Литература: *Hantush*, 1960.

Условные обозначения:

a – пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

 $B = \sqrt{Tm'/k'}$ — параметр перетекания, м;

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

 $H(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 17);

k – коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, м/сут;

т – мощность основного водоносного пласта, м;

m' – мощность слабопроницаемого слоя, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

S — водоотдача основного водоносного пласта;

S' – водоотдача слабопроницаемого слоя;

 S'_{s} – удельная водоотдача слабопроницаемого слоя, 1/м;

s — понижение в основном водоносном пласте, м;

T – проводимость основного водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26);

 β – аргумент функции.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение для малых интервалов времени (для двух вариантов): уравнение (9.2.11);
- понижение для 1-го и 2-го вариантов для больших интервалов времени: уравнения (9.2.12) и (9.2.13);
- понижение для 2-го варианта при полуограниченном в разрезе слабо проницаемом слое: уравнение (9.2.14).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Для малых значений времени $t \le 0.1 \frac{m'S'}{k'}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{4B} \sqrt{\frac{S'}{S}} \right]. \tag{9.2.11}$$

Уравнение (9.2.11) совпадает для двух вариантов.

2. Для больших значений времени

Вариант 1. Для времени $t \ge 5 \frac{m'S'}{k'}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[\frac{r^2}{4at} \left(1 + \frac{S'}{3S} \right), \frac{r}{B} \right]. \tag{9.2.12}$$

Вариант 2. Для времени $t \ge 10 \frac{m'S'}{k'}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2}{4at} \left(1 + \frac{S'}{S} \right) \right]. \tag{9.2.13}$$

Пля двухслойного комплекса, когда хорошо проницаемый водоносный пласт слабопроницаемый подстилает пласт. полуограниченный в разрезе (рис. 9.8), уравнение временном понижения всем интервале следующее:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{4} \sqrt{\frac{k'S_s'}{TS}} \right]. \tag{9.2.14}$$

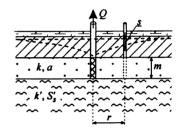


Рис. 9.8. Типовая схема (разрез) водоносного комплекса со слабопроницаемым слоем, полуограниченным в разрезе.

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой (на основе уравнения (9.2.14) для 2-го варианта)

Таблица 9.2.3 Расчетные формулы для определения параметров

 График фактической кривой
 График эталонной кривой
 Проводимость, м²/сут

 $\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$ $\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$ $T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$

Подбор параметров

Таблица 9.2.4

Подопраемые параметры и рекомендуемый график			
мер уравнения	Подбираемые параметры	Γ	

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
9.2.11	T, S, S', k'		
9.2.12	T, S, S', k'	a la.	
9.2.13	T, S, S'	$s-\lg t$	
9.2.14	T, S, S'_s, k'		

Алгоритм определения параметров [Hantush, 1960]

Применяется для любого из двух вариантов для начальных моментов времени: время действия уравнения (9.2.11).

- 1. Построим семейство типовых кривых $\lg H(u,\beta) \lg \frac{1}{u}$ для различных значений аргумента β .
- 2. Построим график по фактическим данным: $\lg s \lg t$.
- 3. График фактических данных совместим с наиболее подходящей типовой кривой, которой будет соответствовать значение β .
- 4. На совмещенных графиках возьмем произвольную точку P, которой будут соответствовать следующие значения: $\lg H(u,\beta)$, $\lg \frac{1}{u}$, $\lg s$, $\lg t$.
- 5. Определим проводимость водоносного пласта по уже известным значениям $\lg H(u,\beta)$ и $\lg s$:

$$\lg T = \lg \frac{Q}{4\pi} - \lg s + \lg H(u, \beta). \tag{9.2.15}$$

6. Определим пьезопроводность водоносного пласта по уже известным значениям $\lg \frac{1}{u}$ и $\lg t$:

$$\lg a = \lg \frac{1}{u} - 2\lg \frac{2}{r} + \lg t . \tag{9.2.16}$$

7. По вычисленным параметрам проводимости и пьезопроводности определим водоотдачу водоносного пласта:

$$S = T/a$$
. (9.2.17)

8. По значению аргумента β и вычисленным параметрам проводимости и водоотдачи определим обобщенный параметр:

$$k'S' = \frac{16\beta^2}{r^2} TSm'. {(9.2.18)}$$

9.2.3. Трехслойные системы: два хорошо проницаемых слоя разделены слабопроницаемым слоем

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: напорный комплекс состоит из трех слоев двух изотропных хорошо проницаемых, разделенных слабопроницаемым слоем;
- основной водоносный пласт (1-й пласт): хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;
- смежный водоносный пласт (2-й пласт): хорошо проницаемый слой, из которого происходит перетекание в основной водоносный пласт;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, который находится между двумя хорошо проницаемыми слоями и через который осуществляется перетекание;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном и смежном пластах, а также в любой точке слабопроницаемого слоя;

- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое учитывается;
- типовые схемы: рис. 9.9.

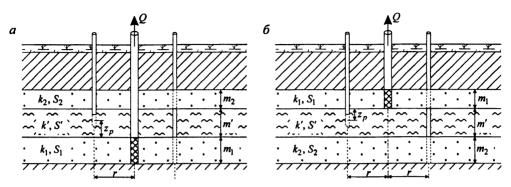


Рис. 9.9. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (трехслойные системы) с учетом емкости слабопроницаемого слоя.

a – опытная скважина находится в подошве водоносного комплекса, δ – в кровле водоносного комплекса.

Литература: Hantush, 1960; Neuman, Witherspoon, 1969a, b, 1972.

Условные обозначения:

 a_1 – пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

 B_1 , B_2 — параметры перетекания: определяются уравнениями (9.2.29) и (9.2.30), м;

erfc u - дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $F(\tau)$ – определяется уравнением (9.2.24) или (9.2.34);

 $H(u, \beta)$ – специальная функция (Приложение 17);

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2).

 k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации основного и смежного водоносных пластов, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

 $M(\tau)$ – определяется уравнением (9.2.25);

 m_1, m_2 — мощности основного и смежного водоносных пластов, м;

m' – мощность разделяющего слоя, м;

 $N(\tau)$ – определяется уравнением (9.2.26) или (9.2.35);

n – номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r — горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной в основном, смежном пласте или в разделяющем слое, м;

 $S_1,\, S_2\,$ – водоотдачи основного и смежного водоносных пластов;

S' – водоотдача разделяющего слоя;

 S'_{s} – удельная водоотдача слабопроницаемого слоя, 1/м;

 $s^{(1)}, s^{(2)}$ — понижения в основном и смежном водоносных пластах, м;

s' – понижение в разделяющем слое, м;

 $T_1 = k_1 m_1$ – проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций, может определяться уравнением (9.2.41);

 z_p — вертикальное расстояние до точки наблюдения в разделяющем слое от кровли основного пласта (при его расположении в подошве комплекса) или от подошвы основного пласта (при его расположении в кровле комплекса), м;

 β – аргумент функций;

 λ_1, λ_2 – определяются уравнениями (9.2.27) и (9.2.28);

 ω_1 – определяется уравнением (9.2.22) или (9.2.38);

 ω_2 – определяется уравнением (9.2.23).

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение в основном пласте, разделяющем слое и смежном пласте: уравнения (9.2.19) (9.2.21);
- понижение в основном пласте, разделяющем слое и смежном пласте при одинаковых параметрах основного и смежного пластов: уравнения (9.2.31) – (9.2.33);
- понижение в основном пласте и в разделяющем слое при нулевом понижении в смежном пласте: уравнения (9.2.36) и (9.2.37);
- понижение в основном пласте и в разделяющем слое для малых моментов времени при нулевом понижении в смежном пласте: уравнения (9.2.39) и (9.2.40);
- понижение в разделяющем слое (полуограниченной мощности) для малых моментов времени при нулевом понижении в смежном пласте: уравнение (9.2.42).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Понижение в основном водоносном пласте

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_{0}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] \left[\left(1 + \frac{M(\tau)}{F(\tau)}\right) J_0(\omega_1) + \left(1 - \frac{M(\tau)}{F(\tau)}\right) J_0(\omega_2) \right] \frac{d\tau}{\tau} . (9.2.19)$$

2. Понижение в разделяющем слое

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) + \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right)}{1 - \tau^2 / (n^2 \pi^2)} \right\} \times \left\{ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{2(r/B_2)^2 (-1)^n \tau}{F(\tau) \sin \tau} - \frac{M(\tau)}{F(\tau)} - 1 \right\} J_0(\omega_1) - \left\{ \frac{2(r/B_2)^2 (-1)^n \tau}{F(\tau) \sin \tau} - \frac{M(\tau)}{F(\tau)} + 1 \right\} J_0(\omega_2) \right\} \right\}.$$
(9.2.20)

3. Понижение в смежном водоносном пласте

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] \frac{2(r/B_2)^2}{F(\tau)} \left[J_0(\omega_1) - J_0(\omega_2) \right] \frac{d\tau}{\sin \tau}, \qquad (9.2.21)$$

где

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{N(\tau) + F(\tau)}{2}}, \qquad (9.2.22)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{N(\tau) - F(\tau)}{2}}, \qquad (9.2.23)$$

$$F(\tau) = \sqrt{M^2(\tau) + \left[\frac{2(r/B_1)(r/B_2)\tau}{\sin \tau}\right]^2},$$
 (9.2.24)

$$M(\tau) = (\lambda_1 - \lambda_2)\tau^2 - \left[\left(\frac{r}{B_1} \right)^2 - \left(\frac{r}{B_2} \right)^2 \right] \tau \cot \tau , \qquad (9.2.25)$$

$$N(\tau) = (\lambda_1 + \lambda_2)\tau^2 - \left[\left(\frac{r}{B_1} \right)^2 + \left(\frac{r}{B_2} \right)^2 \right] \tau \cot \tau , \qquad (9.2.26)$$

$$\lambda_1 = \frac{r^2 S_1}{B_1^2 S'},\tag{9.2.27}$$

$$\lambda_2 = \frac{r^2 S_2}{B_2^2 S'},\tag{9.2.28}$$

$$B_1 = \sqrt{\frac{k_1 m_1 m'}{k'}}, (9.2.29)$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{k_2 m_2 m'}{k'}} \ . \tag{9.2.30}$$

Если в правой части уравнения (9.2.22) или (9.2.23) выражение под корнем меньше нуля, то для $\omega_1^2 < 0$ устанавливаем $J_0(\omega_1) = 0$, а для $\omega_2^2 < 0$ — соответственно $J_0(\omega_2) = 0$.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. Фильтрационные свойства водоносных пластов одинаковые: $k_1 = k_2$, $S_1 = S_2$, $B_1 = B_2$. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной
 - в основном водоносном пласте,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] \left[J_0(\omega_1) + J_0(\omega_2) \right] \frac{d\tau}{\tau}; \tag{9.2.31}$$

- в разделяющем слое,

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) + \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right)}{1 - \frac{\tau^2}{n^2 \pi^2}} \right\} \times \left\{ \frac{d\tau}{\tau} \right\}; (9.2.32)$$

- в смежном водоносном пласте.

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_{0}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] \left[J_0(\omega_1) - J_0(\omega_2) \right] \frac{d\tau}{\tau}, \tag{9.2.33}$$

где $F(\tau)$ и $N(\tau)$ для данных частных решений упрощаются:

$$F(\tau) = \frac{2(r/B_1)^2 \tau}{\sin \tau},$$
 (9.2.34)

$$N(\tau) = 2\lambda_1 \tau^2 - \left(\frac{r}{B_1}\right)^2 \tau \cot(\tau). \tag{9.2.35}$$

- 2. Уровень в смежном пласте не меняется: $s^{(2)} = 0$. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной
 - в основном водоносном пласте,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_1} \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] J_0(\omega_1) \frac{d\tau}{\tau}; \qquad (9.2.36)$$

в разделяющем слое.

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{\infty} \left[\exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) - 1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) - \exp\left(-\tau^2 \frac{a_1 t}{r^2} \lambda_1\right) \right] J_0(\omega_1) \frac{d\tau}{\tau} \right\}, (9.2.37)$$

где ω_1 упрощается:

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1 \tau^2 - (r/B_1)^2 \tau \cot n \tau} . \qquad (9.2.38)$$

- 3. Решения для малых значений времени $t \le 0.1m'S'/k'$ (предполагается, что в смежном водоносном пласте понижение равно нулю: $s^{(2)} = 0$). Понижение в наблюдательной скважине, расположенной
 - в основном водоносном пласте,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} H \left[\frac{r^2}{4a_1 t}, \frac{r}{4B_1} \sqrt{\frac{S'}{S_1}} \right]; \tag{9.2.39}$$

в разделяющем слое,

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \begin{bmatrix} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau - u)}} \left(1 + 4\tau \frac{z_p}{m'} \frac{B_1^2}{r^2} \right) \frac{r}{4B_1} \sqrt{\frac{S'}{S_1}} \right) - \\ - \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau - u)}} \left(1 + 4\tau \left(2 - \frac{z_p}{m'} \right) \frac{B_1^2}{r^2} \right) \frac{r}{4B_1} \sqrt{\frac{S'}{S_1}} \right) \end{bmatrix} d\tau, \qquad (9.2.40)$$

где

$$u = \frac{r^2}{4a_1t} \,. \tag{9.2.41}$$

4. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в полуограниченном в разрезе слабопроницаемом слое (рис. 9.10), записывается в следующей форме:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau - u)}} \left(\frac{r}{4} \sqrt{\frac{k'}{k_1 m_1}} + \tau \frac{z_p}{r} \sqrt{\frac{k_1 m_1}{k'}}\right) \sqrt{\frac{S_s'}{S_1}}\right) d\tau . \tag{9.2.42}$$

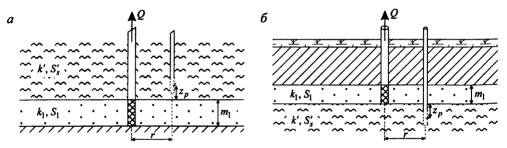


Рис. 9.10. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием с учетом емкости полуограниченного в разрезе слабопроницаемого разделяющего слоя. a — слабопроницаемый слой находится в кровле, δ —в подошве основного пласта.

🌣 Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 9.2.5 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.2.19		$s^{(1)} - \lg t$
9.2.20	$T_1, a_1, S_1, S_2, S', B_1, B_2$	$s'-\lg t$
9.2.22		$s^{(2)} - \lg t$
9.2.31		$s^{(1)} - \lg t$
9.2.32	T_1, a_1, S, S', B	$s'-\lg t$
9.2.33		$s^{(2)} - \lg t$
9.2.36	T_1, a_1, S_1, S', B_1	$s^{(1)} - \lg t$
9.2.37	1, 4, 5, 5, 5	$s'-\lg t$

			Таблица 9.2.5 (окончание)
Номер ураз	внения	Подбираемые параметры	График
9.2.39)		$s^{(1)} - \lg t$
9.2.40)	T_1, a_1, S_1, S', B_1	$s'-\lg t$
9.2.42	2	7	3 - 1g t

9.2.4. Трехслойная система с незначительным перетеканием: два хорошо проницаемых слоя разделены слабопроницаемым слоем

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: напорный, состоит из трех слоев двух изотропных хорошо проницаемых, разделенных слабопроницаемым слоем;
- первый пласт: нижний хорошо проницаемый;
- второй пласт: верхний хорошо проницаемый;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, который находится между двумя хорошо проницаемыми пластами и через который осуществляется перетекание;

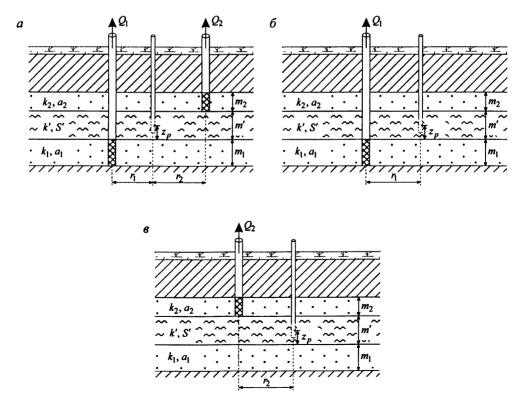


Рис. 9.11. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с незначительным перетеканием (трехслойные системы) с учетом смкости слабопроницаемого слоя.

- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в одном из хорошо проницаемых пластов или в двух пластах одновременно;
- понижение определяется в любой точке слабопроницаемого слоя;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое учитывается;
- перетекание незначительное, так что понижение в опробуемых пластах можно рассматривать как понижение в однородных напорных изолированных пластах;
- типовая схема: рис. 9.11.

Рассматривается два варианта:

вариант 1: откачка из двух водоносных пластов одновременно;

вариант 2: откачка из верхнего или нижнего водоносного пласта (при этом понижение уровня в смежном пласте равно нулю).

Литература: Neuman, Witherspoon, 1968.

Условные обозначения:

 a_1, a_2 — пьезопроводности нижнего и верхнего водоносных пластов, м²/сут;

 $a' = \frac{k'm'}{S'}$ — пьезопроводность разделяющего слоя, м²/сут;

 k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации нижнего и верхнего водоносных пластов, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

 m_1, m_2 — мощности нижнего и верхнего водоносных пластов, м;

m' – мощность разделяющего слоя, м;

n - номер суммы;

 Q_1, Q_2 — расходы опытных скважин, находящихся в нижнем и верхнем водоносных пластах, м³/сут;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытных скважин в нижнем и верхнем водоносных пластах до наблюдательной скважины в разделяющем слое, м;

S' – водоотдача разделяющего слоя;

 $s^{(1)}$, $s^{(2)}$ — понижения в нижнем и верхнем водоносных пластах, м;

s' – понижение в разделяющем слое, м;

время от начала откачки, сут;

 t_1 , t_2 — время задержки в начале работы опытной скважины, расположенной соответственно в нижнем и в верхнем водоносном пласте, сут;

 $T_1 = k_1 m_1$, $T_2 = k_2 m_2$ – проводимости нижнего и верхнего водоносных пластов, м²/сут;

и – верхний предел интегрирования (уравнение (9.2.44)) или аргумент функции;

 u_1 , u_2 – определяются уравнениями (9.2.46) и (9.2.47);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 z_p — вертикальное расстояние от подошвы разделяющего слабопроницаемого слоя до точки наблюдения, м.

<u>Список решений</u> (решения даются для понижения в наблюдательной скважине, расположенной в слабопроницаемом разделяющем слое):

- одновременная откачка из двух водоносных пластов: уравнение (9.2.43);
- разновременная откачка из двух водоносных пластов: уравнение (9.2.45);
- откачка из двух водоносных пластов для больших интервалов времени: уравнения (9.2.48) и (9.2.49);
- откачка из нижнего (первого) водоносного пласта: уравнение (9.2.50);
- откачка из верхнего (второго) водоносного пласта: уравнение (9.2.51);
- откачка из одного водоносного пласта для больших интервалов времени: уравнения (9.2.52) и (9.2.54).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Вариант 1: откачка из двух водоносных пластов <u>Уравнения нестационарной фильтрации</u>

1. При одновременном начале откачки

$$s' = \begin{cases} \frac{Q_1}{\pi^2 T_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_0^u W \left(\frac{n^2 r_1^2 \pi^2 a'}{4 \left(n^2 \pi^2 a' t - m'^2 \tau^2 \right) a_1} \right) \tau \exp \left(-\tau^2 \right) d\tau \right] + \\ + \frac{Q_2}{\pi^2 T_2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi \left(m' - z_p \right)}{m'} \int_0^u W \left(\frac{n^2 r_2^2 \pi^2 a'}{4 \left(n^2 \pi^2 a' t - m'^2 \tau^2 \right) a_2} \right) \tau \exp \left(-\tau^2 \right) d\tau \right] \end{cases}, (9.2.43)$$

где u — верхний предел интегрирования:

$$u = \frac{n\pi\sqrt{a't}}{m'}. (9.2.44)$$

2. При разновременном начале работы откачивающих скважин

$$s' = \begin{cases} \frac{Q_1}{\pi^2 T_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_0^{u_1} W \left(\frac{n^2 r_1^2 \pi^2 a'}{4 \left(n^2 \pi^2 a' (t - t_1) - m'^2 \tau^2 \right) a_1} \right) \tau \exp \left(-\tau^2 \right) d\tau \right] + \\ + \frac{Q_2}{\pi^2 T_2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi (m' - z_p)}{m'} \times \right] \\ \times \int_0^{u_2} W \left(\frac{n^2 r_2^2 \pi^2 a'}{4 \left(n^2 \pi^2 a' (t - t_2) - m'^2 \tau^2 \right) a_1} \right) \tau \exp \left(-\tau^2 \right) d\tau \end{cases} \end{cases} , (9.2.45)$$

где u_1 — верхний предел интегрирования для первого интеграла:

$$u_1 = \frac{n\pi\sqrt{a'(t-t_1)}}{m'},$$
 (9.2.46)

 u_2 — верхний предел интегрирования для второго интеграла:

$$u_2 = \frac{n\pi\sqrt{a'(t-t_2)}}{m'}. (9.2.47)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для больших интервалов времени уравнение (9.2.43) упрощается:

$$s' = \frac{Q_1}{4\pi T_1} W \left(\frac{r_1^2}{4a_1 t} \right) \left(1 - \frac{z_p}{m'} \right) + \frac{Q_2}{4\pi T_2} W \left(\frac{r_2^2}{4a_2 t} \right) \frac{z_p}{m'}. \tag{9.2.48}$$

2. Для больших интервалов времени уравнение (9.2.45) упрощается:

$$s' = \frac{Q_1}{4\pi T_1} W \left(\frac{r_1^2}{4a_1(t - t_1)} \right) \left(1 - \frac{z_p}{m'} \right) + \frac{Q_2}{4\pi T_2} W \left(\frac{r_2^2}{4a_2(t - t_2)} \right) \frac{z_p}{m'}. \tag{9.2.49}$$

Замечани**е**

Если $t_1 = 0$, то второе слагаемое в уравнениях (9.2.45) и (9.2.49) равняется нулю в течение времени t_2 . И наоборот, если $t_2 = 0$, то первое слагаемое в уравнениях (9.2.45) и (9.2.49) равняется нулю в течение времени t_1 .

Вариант 2: откачка из одного водоносного пласта

Уравнения нестационарной фильтрации

1. При откачке из нижнего водоносного пласта

$$s' = \frac{Q_1}{4\pi T_1} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_0^u W \left(\frac{n^2 r_1^2 \pi^2 a'}{4(n^2 \pi^2 a' t - m'^2 \tau^2) a_1} \right) \tau \exp(-\tau^2) d\tau \right]. \tag{9.2.50}$$

2. При откачке из верхнего водоносного пласта

$$s' = \frac{Q_2}{4\pi T_2} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \frac{n\pi (m' - z_p)}{m'} \int_{0}^{u} W \left(\frac{n^2 r_2^2 \pi^2 a'}{4(n^2 \pi^2 a' t - m'^2 \tau^2) a_2} \right) \tau \exp(-\tau^2) d\tau \right]. \quad (9.2.51)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации Для больших интервалов времени уравнения (9.2.50) и (9.2.51) упрощаются:

- при откачке из нижнего водоносного пласта

$$s' = \frac{Q_1}{4\pi T_1} \left(1 - \frac{z_p}{m'} \right) W \left(\frac{r_1^2}{4a_1 t} \right), \tag{9.2.52}$$

отсюда

$$\frac{s'}{s^{(1)}} = 1 - \frac{z_p}{m'}; (9.2.53)$$

при откачке из верхнего водоносного пласта

$$s' = \frac{Q_2}{4\pi T_2} \left(\frac{z_p}{m'}\right) W \left(\frac{r_2^2}{4a_2t}\right), \tag{9.2.54}$$

отсюда

$$\frac{s'}{s^{(2)}} = \frac{z_p}{m'} \,. \tag{9.2.55}$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Табл**и**ца 9.2.6

Номер уравнения		Подбираемые параметры	График
	9.2.43, 9.2.45	T_1, T_2, a_1, a_2, a'	
	9.2.48, 9.2.49	T_1, T_2, a_1, a_2	
	9.2.50	T_1, a_1, a'	$s' - \lg t$
	9.2.51	T_2, a_2, a'	$s - \lg t$
	9.2.52	T_1, a_1	
	9.2.54	T_2, a_2	
		· ·	

Замечания

- 1. Для уравнений (9.2.52) и (9.2.54) применимы также все способы обработки для однородного напорного изолированного пласта (см. раздел 2.1) с получением параметров проводимости и пьезопроводности хорошо проницаемых пластов, где вместо проводимости нижнего пласта вычисляется обобщенный параметр $\frac{T_1m'}{m'-z_p}$, а вместо проводимости верхнего пласта T_2m'/z_p .
- 2. Для обработки начального периода откачки в слабопроницаемом слое можно использовать схему с полуограниченной мощностью этого слоя (см. следующий раздел).

9.2.5. Двухслойная система с незначительным перетеканием: хорошо проницаемый слой и слабопроницаемый полуограниченной мощности

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: напорный, состоит из двух слоев изотропного хорошо проницаемого слоя и слабопроницаемого;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;
- слабопроницаемый слой: находится в кровле или подошве основного водоносного пласта, имеет полуограниченную мощность;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в хорошо проницаемом пласте;
- понижение определяется в любой точке слабопроницаемого слоя;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое учитывается;
- перетекание из смежного водоносного пласта незначительное, так что понижение в опробуемом пласте можно рассматривать как понижение в однородном напорном изолированном пласте;
- типовые схемы: рис. 9.12.

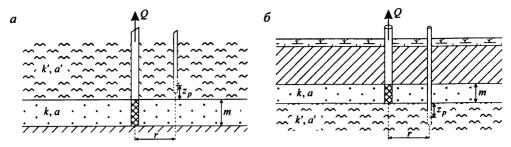


Рис. 9.12. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с незначительным перетеканием (двухслойные системы) с учетом емкости слабопроницаемого слоя.

a – слабо проницаемый слой находится в кровле, δ – в подошве водоносного пласта.

Литература: Neuman, Witherspoon, 1968.

Условные обозначения:

a — пьезопроводность хорошо проницаемого водоносного пласта, M^2 /сут;

a' – пьезопроводность слабопроницаемого слоя, M^2 /сут;

k-коэффициент фильтрации хорошо проницаемого водоносного пласта, м/сут;

m – мощность хорошо проницаемого водоносного пласта, м;

Q – расход опытной скважины, м 3 /сут;

r — горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины в слабопроницаемом слое, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

s — понижение в хорошо проницаемом водоносном пласте, м;

s' — понижение в слабопроницаемом слое, м;

 s_1', s_2' — понижения в слабопроницаемом слое для первой и второй наблюдательных скважин, м;

T = km — проводимость хорошо проницаемого водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций, может определяться уравнением (9.2.58);

u' – определяется уравнением (9.2.59);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W_{NW}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 30);

 z_p — вертикальное расстояние от линии соединения слабопроницаемого слоя и хорошо проницаемого до точки наблюдения, м;

 $z_{p,1}, z_{p,2}$ — вертикальные расстояния от линии соединения слабопроницаемого слоя и хорошо проницаемого до первой и второй точек наблюдения, м;

 β – аргумент функции.

Список решений:

- понижение в слабопроницаемом слое: уравнение (9.2.56);
- понижение в слабопроницаемом слое для больших интервалов времени: уравнение (9.2.60).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в слабопроницаемом слое,

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W_{NW} \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{z_p^2}{4a't} \right), \tag{9.2.56}$$

$$W_{NW}(u,u') = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u'}^{\infty} W\left(\frac{u\tau^2}{\tau^2 - u'}\right) \exp\left(-\tau^2\right) d\tau$$
, (9.2.57)

где

$$u = \frac{r^2}{4at},$$
 (9.2.58)

$$u' = \frac{z_p^2}{4a't} \,. \tag{9.2.59}$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

Для больших интервалов времени уравнение (9.2.56) упрощается:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2}{4at}\right),\tag{9.2.60}$$

отсюда

$$\frac{s'}{s} = 1$$
. (9.2.61)

Из зависимости (9.2.61) следует, что для данной схемы понижение в слабопроницаемом слое сравнивается с понижением в хорошо проницаемом водоносном пласте.

Способы обработки откачки

Способ отношения понижений

1. По отношению понижений в слабопроницаемом слое и в водоносном пласте (наблюдательные скважины могут находиться на разном расстоянии от опытной скважины):

$$\frac{s'}{s} = W_{NW} \left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{z_{p,1}^2}{4a't} \right) / W \left(\frac{r_2^2}{4at} \right). \tag{9.2.62}$$

2. По понижениям в двух наблюдательных скважинах, находящихся в слабопроницаемом слое:

$$\frac{s_1'}{s_2'} = W_{NW} \left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{z_{p,1}^2}{4a't} \right) / W_{NW} \left(\frac{r_2^2}{4at}, \frac{z_{p,2}^2}{4a't} \right). \tag{9.2.63}$$

Подбор пьезопроводностей водоносного пласта и разделяющего слоя осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 9.2.7

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.2.56	T, a, a'	$s'-\lg t$
9.2.60	T, a	5 – ig <i>t</i>
9.2.62	a, a'	$s'/s - \lg t$
9.2.63	a, a'	$s_1'/s_2'-\lg t$

Замечание

Для уравнения (9.2.60) применимы также все способы обработки для однородного напорного изолированного пласта (см. раздел 2.1) с получением параметров проводимости и пьезопроводности хорошо проницаемого пласта.

9.3. Несовершенная по степени вскрытия скважина в водоносном пласте с перетеканием

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых изотропных слоев;
- основной водоносный пласт: напорный хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: напорный или безнапорный хорошо проницаемый слой, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, который находится между водоносными пластами и через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс неограничен в плане;
- опытная скважина: находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется в любой точке (середина фильтра наблюдательной скважины)
 основного хорошо проницаемого пласта;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое не учитывается.

Рассматривается две задачи в зависимости от мощности основного водоносного пласта:

- 1) основной пласт ограничен в разрезе;
- 2) основной пласт полуограничен в разрезе.

Условные обозначения:

a – пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

 $B = \sqrt{Tm'/k'}$ – параметр перетекания, м;

 $b = km'/k' = B^2/m$ — аналог параметра перетекания, м;

erfcu – интеграл вероятностей (Приложение 4);

```
K_0(\beta) — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
```

k – коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, м/сут;

 l_w – длина фильтра опытной скважины, м;

 $M(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 24);

m – мощность основного водоносного пласта, м:

m' – мощность слабопроницаемого слоя, м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 R_n – безразмерный параметр: определяется уравнение (9.3.2);

 R'_n – безразмерный параметр: определяется уравнение (9.3.13);

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

s — понижение в основном водоносном пласте, м;

 s_m – понижение в водоносном пласте на период стационара, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

T = km -проводимость основного водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций, может определяться уравнением (9.3.26);

 $W(u,\beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 $z_p\,$ – вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта до точки наблюдения, м;

 $z_w = (z_{w1} + z_{w2})/2$ — расстояние от кровли водоносного пласта до середины фильтра опытной скважины, м;

 z_{wl} — глубина вскрытия опытной скважины (расстояние от кровли водоносного пласта до низа фильтра опытной скважины), м;

 z_{w2} – расстояние от кровли водоносного пласта до верха фильтра опытной скважины, м;

 β – аргумент функций;

 β_n – корни уравнения (9.3.3) (Приложение 32).

9.3.1. Несовершенная по степени вскрытия скважина в ограниченном в разрезе водоносном пласте с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для несовершенной скважины (см. начало раздела 9.3);
- основной водоносный пласт: ограничен в разрезе;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия;
- типовые схемы: рис. 9.13 9.16.

Рассматривается четыре варианта:

- вариант 1: фильтр опытной скважины примыкает к подошве слабопроницаемого пласта, длина фильтра равна глубине вскрытия водоносного пласта (рис. 9.13);
- вариант 2: фильтр опытной скважины находится между кровлей и подошвой водоносного пласта (рис. 9.14);

вариант 3: дно опытной скважины находится на границе подошвы слабопроницаемого слоя и кровли водоносного пласта, вода поступает в скважину только через дно скважины (рис. 9.15); вариант 4: длина фильтра равна мощности водоносного пласта (рис. 9.16). Более подробно см. решения для совершенной по степени вскрытия скважины.

Литература: *Hantush*, 1957, 1967b.

Список решений

Вариант 1:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.3.1);
- понижение для нестационарного периода (частные случаи): уравнения (9.3.4) (9.3.6);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнения (9.3.7) и (9.3.8);
- понижение на период стационара: уравнение (9.3.9);
- понижение на период стационара (частные случаи): уравнения (9.3.10) и (9.3.11).

Вариант 2:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.3.12);
- понижение для нестационарного периода (частные случаи): уравнения (9.3.14) и (9.3.15);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнения (9.3.16) и (9.3.17);
- среднее понижение в наблюдательной скважине, перфорированной на всю мощность водоносного пласта: уравнение (9.3.18);
- понижение на период стационара: уравнение (9.3.19);
- понижение для больших расстояний от опытной скважины на период стационара: уравнение (9.3.20).

Вариант 3:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.3.21);
- понижение на период стационара: уравнение (9.3.22).

Вариант 4:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.3.23);
- понижение для больших расстояний от опытной скважины для нестационарного периода: уравнение (9.3.24).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Вариант 1 (рис. 9.13)

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{\pi k l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_n W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_n \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_n \right) \right], \tag{9.3.1}$$

$$R_n = \frac{\sin \beta_n - \sin \left(\frac{m - l_w}{m} \beta_n\right)}{2\beta_n + \sin(2\beta_n)},$$
(9.3.2)

$$\beta_n \tan \beta_n = (m/B)^2. \tag{9.3.3}$$

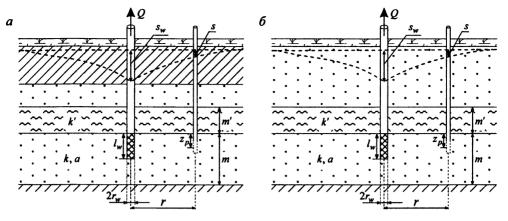


Рис. 9.13. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием, опытная скважина примыкает к кровле водоносного пласта (вариант 1). Смежный водоносный пласт: *а* – напорный, *б* – безнапорный.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Аппроксимация для неравенства $m/B \le 0.1$ (наиболее распространенный на практике случай). Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W\left(\frac{r^2}{4at}, \sqrt{\left(\frac{r}{B}\right)^2 + \left(\frac{n\pi r}{m}\right)^2}\right) \cos\frac{n\pi z_p}{m} \sin\frac{n\pi l_w}{m} \right] \right\}. (9.3.4)$$

2. Для больших значений времени $t > \frac{5m^2}{a\beta_2^2}$ (где β_2 – второй корень уравнения (9.3.3))

уравнение (9.3.1) несколько упрощается:

$$s = \frac{Q}{\pi k l_w} \left\{ R_1 W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_1 \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_1 \right) + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[R_n K_0 \left(\frac{r}{m} \beta_n \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_n \right) \right] \right\}. (9.3.5)$$

3. Для расстояния от опытной скважины $r > \frac{4m}{\beta_2}$ вместо уравнений (9.3.1) и (9.3.5) используется уравнение

$$s = \frac{Q}{\pi k l_w} \left[R_1 W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_1 \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_1 \right) \right]. \tag{9.3.6}$$

4. Понижение в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi k l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n} W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos(\beta_{n}) \right]. \tag{9.3.7}$$

Для больших значений времени $t > \frac{5m^2}{a\beta_2^2}$ уравнение (9.3.7) упрощается:

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi k l_{w}} \left\{ R_{1} W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4 a t}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{1} \right) \cos(\beta_{1}) + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[R_{n} K_{0} \left(\frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos(\beta_{n}) \right] \right\}. \tag{9.3.8}$$

Уравнения стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{2Q}{\pi k l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n} K_{0} \left(\frac{r}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{p}}{m} \beta_{n} \right) \right]. \tag{9.3.9}$$

Частные случаи для стационарного периода

1. Аппроксимация для неравенства $m/B \le 0.1$ (наиболее распространенный на практике случай). Понижение в наблюдательной скважине

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_0 \left(\sqrt{\left(\frac{r}{B} \right)^2 + \left(\frac{n\pi r}{m} \right)^2} \right) \cos \frac{n\pi z_p}{m} \sin \frac{n\pi l_w}{m} \right] \right\}. \quad (9.3.10)$$

2. Для расстояния от опытной скважины $r > 4m/\beta_2$ вместо уравнения (9.3.9) используется уравнение

$$s_m = \frac{2Q}{\pi k l_w} \left[R_1 K_0 \left(\frac{r}{m} \beta_1 \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_1 \right) \right]. \tag{9.3.11}$$

Вариант 2 (рис. 9.14)

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{\pi k l_{w}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n} W \left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{p}}{m} \beta_{n} \right) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left[R'_{n} W \left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{p}}{m} \beta_{n} \right) \right] \right\},$$

$$(9.3.12)$$

$$R'_{n} = \frac{\sin \beta_{n} - \sin \left(\frac{m - z_{w2}}{m} \beta_{n}\right)}{2\beta_{n} + \sin(2\beta_{n})}.$$
(9.3.13)

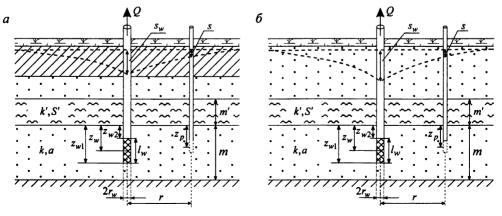


Рис. 9.14. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием, опытная скважина находится между кровлей и подошвой водоносного пласта (вариант 2). Смежный водоносный пласт: a – напорный, δ – безнапорный.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для больших значений времени $t > \frac{5m^2}{a\beta_2^2}$ уравнение (9.3.12) записывается в виде

$$s = \frac{Q}{nkl_{w}} \begin{cases} R_{1}W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{m}\beta_{1}\right)\cos\left(\frac{m-z_{p}}{m}\beta_{1}\right) + \\ +2\sum_{n=2}^{\infty} \left[R_{n}K_{0}\left(\frac{r}{m}\beta_{n}\right)\cos\left(\frac{m-z_{p}}{m}\beta_{n}\right)\right] - \\ -R_{1}'W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{m}\beta_{1}\right)\cos\left(\frac{m-z_{p}}{m}\beta_{1}\right) + \\ +2\sum_{n=2}^{\infty} \left[R_{n}'K_{0}\left(\frac{r}{m}\beta_{n}\right)\cos\left(\frac{m-z_{p}}{m}\beta_{1}\right)\right] \end{cases}$$
(9.3.14)

2. Для понижений на расстоянии от опытной скважины $r > 4m/\beta_2$ вместо уравнений (9.3.12) и (9.3.14) используется уравнение

$$s = \frac{Q}{\pi k l_w} \left\{ R_1 W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_1 \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_1 \right) - R_1' W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_1 \right) \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_1 \right) \right\}. (9.3.15)$$

3. Понижение в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi k l_{w}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n} W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{n} \right) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n}' W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{n} \right) \right] \right\}.$$

$$(9.3.16)$$

Для больших значений времени $t > \frac{5m^2}{a\beta_2^2}$ уравнение (9.3.16) записывается в виде

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi k l_{w}} \begin{cases} R_{1} \overline{W} \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{1} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{1} \right) + \\ + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[R_{n} K_{0} \left(\frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{n} \right) \right] - \\ - R_{1}' \overline{W} \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{m} \beta_{1} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{1} \right) + \\ + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[R_{n}' K_{0} \left(\frac{r_{w}}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m - z_{w}}{m} \beta_{n} \right) \right] \end{cases}$$

$$(9.3.17)$$

4. Среднее понижение в наблюдательной скважине, перфорированной на всю мощность основного водоносного пласта,

$$s = \frac{Q}{\pi k l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_n W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_n \right) \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \right]. \tag{9.3.18}$$

Уравнения стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{2Q}{\pi k l_{w}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[R_{n} K_{0} \left(\frac{r}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m-z_{p}}{m} \beta_{n} \right) \right] - \left\{ -\sum_{n=1}^{\infty} \left[R'_{n} K_{0} \left(\frac{r}{m} \beta_{n} \right) \cos \left(\frac{m-z_{p}}{m} \beta_{n} \right) \right] \right\}.$$
(9.3.19)

Частный случай для стационарного периода

Для понижений на расстоянии от опытной скважины $r > \frac{4m}{\beta_2}$ вместо уравнения (9.3.19)

используется уравнение

$$s_{m} = \frac{2Q}{\pi k l_{w}} \left\{ R_{1} K_{0} \left(\frac{r}{m} \beta_{1} \right) \cos \left(\frac{m - z_{p}}{m} \beta_{1} \right) - R'_{1} K_{0} \left(\frac{r}{m} \beta_{1} \right) \cos \left(\frac{m - z_{p}}{m} \beta_{1} \right) \right\}. \quad (9.3.20)$$

Вариант 3 (рис. 9.15)

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W \left(\frac{r^2}{4at}, \sqrt{\left(\frac{r}{B} \right)^2 + \left(\frac{n\pi r}{m} \right)^2} \right) \cos \frac{n\pi z_p}{m} \right] \right\}. \tag{9.3.21}$$

Уравнение стационарного периода

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[K_0 \left(\sqrt{\left(\frac{r}{B} \right)^2 + \left(\frac{n\pi r}{m} \right)^2} \right) \cos \frac{n\pi z_p}{m} \right] \right\}. \tag{9.3.22}$$

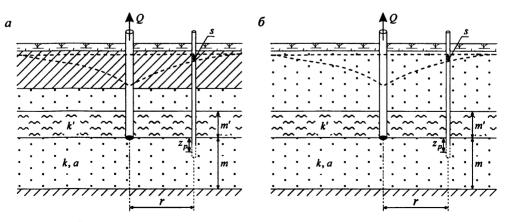


Рис. 9.15. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием, опытная скважина дном вскрывает водоносный пласт (вариант 3). Смежный водоносный пласт: a — напорный, δ — безнапорный.

Вариант 4 (рис. 9.16)

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin \beta_n \cos \left(\frac{m - z_p}{m} \beta_n \right)}{2\beta_n + \sin(2\beta_n)} W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_n \right) \right]. \tag{9.3.23}$$

Частный случай для нестационарного периода

Для расстояния от опытной скважины $r > 4\frac{m}{\beta_2}$ вместо уравнения (9.3.23) используется уравнение

$$s = \frac{Q}{\pi T} \left[\frac{\sin \beta_1 \cos \left(\frac{m-z}{m} \beta_1 \right)}{2\beta_1 + \sin(2\beta_1)} W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{m} \beta_1 \right) \right]. \tag{9.3.24}$$

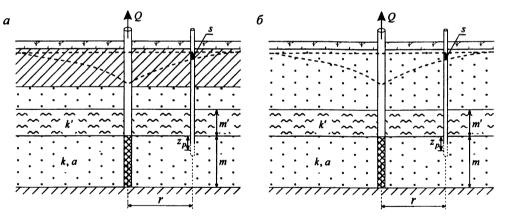


Рис. 9.16. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием, опытная скважина совершенная по степени вскрытия (вариант 4). Смежный водоносный пласт: *a* – напорный, *б* – безнапорный.

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Таблица 9.3.1

 Номер уравнения
 Вариант
 Подбираемые параметры
 График

 9.3.1, 9.3.4, 9.3.6
 1
 k, a, B
 s-lg t

 9.3.12, 9.3.15, 9.3.17
 2
 s-lg t

Номер уравнения	Вариант	Подбираемые параметры	График
9.3.21	3	T, a, B	$s-\lg t$
9.3.23, 9.3.24	4] '',","	3 – 1g t
9.3.7	1	k, a, B	s _lat
9.3.16	2	, , u, b	$s_w - \lg t$
9.3.9, 9.3.10, 9.3.11	1	k, B	
9.3.19, 9.3.20	2] •, b	$s_m - \lg r$
9.3.22	3	T, B	

9.3.2. Несовершенная по степени вскрытия скважина в полуограниченном в разрезе водоносном пласте с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для несовершенной скважины (см. начало раздела 9.3);
- основной водоносный пласт: полуограничен в разрезе;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия;
- типовые схемы: рис. 9.17 9.20.

Рассматривается четыре варианта:

- вариант 1: фильтр опытной скважины примыкает к подошве слабопроницаемого пласта, длина фильтра равна глубине вскрытия водоносного пласта (рис. 9.17);
- вариант 2: опытная скважина вскрывает водоносный пласт, вода поступает в скважину только через дно (рис. 9.18);
- вариант 3: дно опытной скважины находится на границе подошвы слабопроницаемого слоя и кровли водоносного пласта, вода поступает в скважину только через дно скважины (рис. 9.19);
- вариант 4: фильтр опытной скважины находится ниже кровли водоносного пласта (рис. 9.20).

<u>Литература:</u> Halepaska, 1972; Шестаков, Невечеря, 1998.

Список решений (для понижения в наблюдательной скважине):

- период нестационарной фильтрации для первого варианта: уравнение (9.3.25);
- период стационара для первого варианта: уравнение (9.3.27);
- период нестационарной фильтрации для второго варианта: уравнение (9.3.28);
- период стационара для второго варианта: уравнение (9.3.29);
- период нестационарной фильтрации для третьего варианта: уравнение (9.3.30);
- период стационара для третьего варианта: уравнение (9.3.31);
- период нестационарной фильтрации для четвертого варианта: уравнение (9.3.32);
- период стационара для четвертого варианта: уравнение (9.3.33).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Вариант 1 (рис. 9.17)

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi k z_{w}} \begin{cases} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{z_{p}}{b} + \frac{r^{2}}{4b^{2}\tau}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{z_{p}\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau - \\ -\int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{l_{w} + z_{p}}{b} + \frac{r^{2}}{4b^{2}\tau}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{(l_{w} + z_{p})\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau + \\ +M\left(u, \frac{z_{p}}{r}\right) + \frac{1}{2}M\left(u, \frac{l_{w} - z_{p}}{r}\right) - \frac{1}{2}M\left(u, \frac{l_{w} + z_{p}}{r}\right) \end{cases}$$
(9.3.25)

где

$$u = \frac{r^2}{4at} \,. \tag{9.3.26}$$

Для данного варианта $z_w = l_w$.

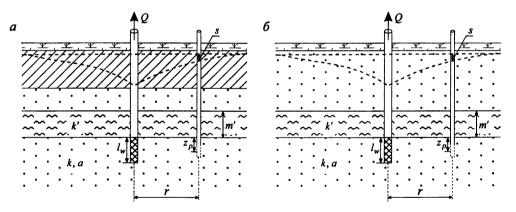


Рис. 9.17. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (основной пласт полуограничен в разрезе, вариант 1), опытная скважина примыкает к кровле водоносного пласта.

Смежный водоносный пласт: *a* – напорный, *б* – безнапорный.

Уравнение стационарного периода

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k z_{w}} \left\{ arcsinh\left(\frac{l_{w} - z_{p}}{r}\right) - arcsinh\left(\frac{l_{w} + z_{p}}{r}\right) + 2 arcsinh\left(\frac{z_{p}}{r}\right) + \\ + 2 exp\left(\frac{z_{p}}{b}\right) \int_{\frac{z_{p}}{b}}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\sqrt{(r/b)^{2} + \tau^{2}}} d\tau - 2 exp\left(\frac{l_{w} + z_{p}}{b}\right) \int_{\frac{l_{w} + z_{p}}{b}}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\sqrt{(r/b)^{2} + \tau^{2}}} d\tau \right\}. (9.3.27)$$

Вариант 2 (рис. 9.18)

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z_w + z_p)^2}} \left[\frac{1}{erfc} \left(\sqrt{\frac{r^2 + (z_w + z_p)^2}{4at}} \right) + \frac{1}{erfc} \left(\sqrt{\frac{r^2 + (z_w - z_p)^2}{4at}} \right) - \frac{1}{erfc} \left(\sqrt{\frac{r^2 + (z_w - z_p)^2}{4at}} \right) \right] - \frac{1}{erfc} \left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{r^2}{r} \right) \left[-\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{r}{r} \right] d\tau \right\}.$$
 (9.3.28)

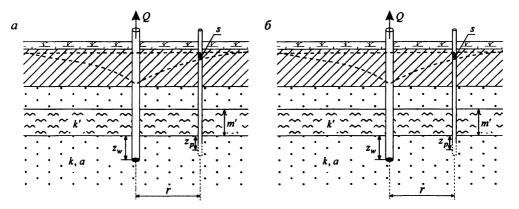


Рис. 9.18. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (основной пласт полуограничен в разрезе, вариант 2), вода в опытную скважину поступает через дно.

Смежный водоносный пласт: а – напорный, б – безнапорный.

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^{2} + (z_{w} + z_{p})^{2}}} + \frac{1}{\sqrt{r^{2} + (z_{w} - z_{p})^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{r^{2} + (z_{w} - z_{p})^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{(r/b)^{2} + \tau^{2}}} d\tau \right\}.$$
(9.3.29)

Вариант 3 (рис. 9.19)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + z_p^2}} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{r^2 + z_p^2}{4at}} - b \int_u^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{z_p}{b} + \frac{r^2}{4b^2\tau}\right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{z_p\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau \right\}. (9.3.30)$$

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^{2} + z_{p}^{2}}} - \frac{1}{b} \exp\left(\frac{z_{p}}{b}\right) \int_{\frac{z_{p}}{b}}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\sqrt{(r/b)^{2} + \tau^{2}}} d\tau \right\}.$$
 (9.3.31)

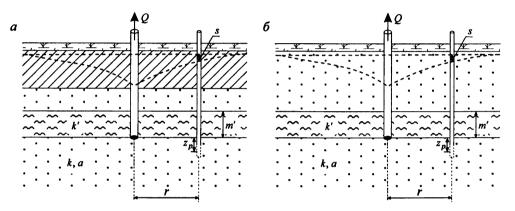


Рис. 9.19. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (основной пласт полуограничен в разрезе, вариант 3), опытная скважина дном вскрывает водоносный пласт. Смежный водоносный пласт: а – напорный, б – безнапорный.

Вариант 4 (рис. 9.20)

Уравнение нестационарной фильтрации

$$S = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ -\frac{1}{z_{wl}} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{z_{p}}{b} + \frac{r^{2}}{4b^{2}\tau}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{z_{p}\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau - \frac{1}{z_{wl}} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{z_{wl} + z_{p}}{b} + \frac{r^{2}}{4b^{2}\tau}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{(z_{wl} + z_{p})\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau + \frac{1}{z_{w2}} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \exp\left(\frac{z_{w2} + z_{p}}{b} + \frac{r^{2}}{4b^{2}\tau}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2b\sqrt{\tau}} + \frac{(z_{w2} + z_{p})\sqrt{\tau}}{r}\right) d\tau + \frac{1}{l_{w}} M\left(u, \frac{z_{p}}{r}\right) + \frac{1}{2z_{wl}} M\left(u, \frac{z_{wl} - z_{p}}{r}\right) - \frac{1}{2z_{w2}} M\left(u, \frac{z_{w2} - z_{p}}{r}\right) - \frac{1}{2z_{wl}} M\left(u, \frac{z_{wl} + z_{p}}{r}\right) + \frac{1}{2z_{w2}} M\left(u, \frac{z_{w2} + z_{p}}{r}\right) \right\}$$

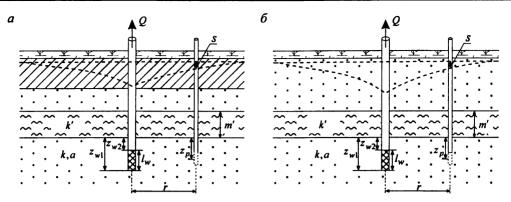


Рис. 9.20. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (основной пласт полуограничен в разрезе, вариант 4), опытная скважина находится между кровлей и подошвой водоносного пласта.

Смежный водоносный пласт: *а* – напорный, *б* – безнапорный.

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k} \begin{cases} \frac{1}{z_{w1}} \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{z_{w1} - z_{p}}{r} \right) - \operatorname{arcsinh} \left(\frac{z_{w2} + z_{p}}{r} \right) \right] - \frac{1}{z_{w2}} \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{z_{w2} - z_{p}}{r} \right) - \operatorname{arcsinh} \left(\frac{z_{w2} + z_{p}}{r} \right) \right] + \frac{2}{l_{w}} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{z_{p}}{r} \right) + \frac{2}{l_{w}} \operatorname{arcsi$$

💠 Способы обработки откачки

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

 Номер уравнения
 Подбираемые параметры
 График

 9.3.25, 9.3.28, 9.3.30, 9.3.32
 k, k', a
 s - lg t

 9.3.27, 9.3.29, 9.3.31, 9.3.33
 k, k'
 s_m - lg r

Таблица 9.3.2

9.4. Анизотропный водоносный пласт в водоносном комплексе с перетеканием

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых слоев;
- основной водоносный пласт: анизотропный хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, через который происходит перетекание;
- опытная скважина: находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- поток в слабопроницаемых слоях вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемых слоях не учитывается;
- здесь можно рассматривать любое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев, которые показаны на рис. 9.1.

В данном разделе рассматривается две задачи:

- 1) профильно-анизотропный основной водоносный пласт;
- 2) планово-анизотропный основной водоносный пласт.

9.4.1. Профильно-анизотропный пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для анизотропного водоносного пласта с перетеканием (см. начало раздела 9.4);
- основной водоносный пласт: профильно-анизотропный;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия;
- понижение определяется в любой точке основного хорошо проницаемого пласта;
- типовая схема: рис. 9.21.

<u>Литература:</u> Hantush, 1964c, 1966b; Kabala et al., 1985; Kruseman, Ridder, 1994.

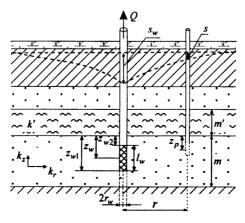


Рис. 9.21. Типовая схема (разрез) профильно-анизотропного водоносного пласта с перетеканием.

Условные обозначения:

а' – обобщенный параметр, определенный по первому и второму лучам;

а" - обобщенный параметр, определенный по первому и третьему лучам;

 a_r – горизонтальная пьезопроводность основного водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

 $a_r = \frac{T_r}{S}$ — пьезопроводность водоносного пласта по направлению от опытной скважины до наблюдательной, м²/сут;

 $a_{ri} = \frac{T_{ri}}{S}$ — пьезопроводность водоносного пласта по *i*-му лучу скважин, м²/сут;

 $a_z\,$ – вертикальная пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

 B_r — параметр перетекания для анизотропного водоносного пласта: определяется уравнением (9.4.2), м;

 B_{ri} – параметр перетекания по *i*-му лучу скважин, м;

i = 1, 2, 3 – номер луча;

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k' – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, м/сут;

k_r – горизонтальный коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

 k_z – вертикальный коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

 $l_{\rm w}$ – длина фильтра опытной скважины или длина открытого интервала при дуплетном опробовании, м;

т - мощность основного водоносного пласта, м;

m' - мощность слабопроницаемого слоя, м;

n – номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

S – водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в водоносном пласте, м;

 s_m — понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

T – проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

 $T_e = \sqrt{T_x T_y} - эффективная проводимость водоносного пласта, м²/сут;$

 T_{ei} — эффективная проводимость водоносного пласта, определенная по i-му лучу, м 2 /сут;

 T_r — проводимость водоносного пласта в направлении от опытной скважины до наблюдательной: определяется уравнением (9.4.17), м²/сут;

 T_{ri} – проводимость водоносного пласта по *i*-му лучу, м²/сут;

 T_x , T_y — проводимости водоносного пласта в направлении координатных осей x и y , м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_s — время наступления стационара, сут;

и – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

x, y — координаты наблюдательной скважины, м;

 $z_w = (z_{w1} + z_{w2})/2$ — расстояние от кровли водоносного пласта до середины фильтра опытной скважины, м;

 z_{w1} — глубина вскрытия опытной скважины (расстояние от кровли водоносного пласта до низа фильтра опытной скважины или до низа второго открытого интервала при дуплетном опробовании), м; z_{w2} — расстояние от кровли водоносного пласта до верха фильтра опытной скважины или до верха первого открытого интервала при дуплетном опробовании, м;

 β – аргумент функций;

 $\Gamma(\beta)$ – гамма-функция (Приложение 40);

 θ — угол между координатной осью x и лучом, направленным от опытной скважины до наблюдательной, градус;

 θ_1 – угол между координатной осью x и первым лучом, градус;

 θ_2 – угол между координатной осью x и вторым лучом, градус;

 θ' – угол между первым лучом и вторым, градус;

 θ'' –угол между первым лучом и третьим, градус;

 χ — коэффициент профильной анизотропии;

 χ_{XY} — коэффициент плановой анизотропии;

 $\pm\,$ — знак при дуплетном опробовании: «+» — для понижения уровня, «—» — для повышения уровня.

Список решений:

- понижение в наблюдательной скважине для нестационарного периода: уравнение (9.4.1);
- понижение в наблюдательной скважине для нестационарного периода, частные случаи: уравнения (9.4.3) и (9.4.4);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода: уравнения (9.4.5) (9.4.7);
- понижение в наблюдательной скважине для стационарного периода: уравнение (9.4.8);
- понижение (повышение) в опытной скважине при дуплетном опробовании для нестационарного и стационарного периодов: уравнения (9.4.9) и (9.4.10).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \left\{ W \left(\frac{r^2 S}{4k_r m t}, \frac{r}{B_r} \right) + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W \left(\frac{r^2 S}{4k_r m t}, \sqrt{\left(\frac{r}{B_r}\right)^2 + \chi^2 \left(\frac{n\pi r}{m}\right)^2} \right) \times \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \cos \frac{n\pi z_{w}}{m} \right] \right\}, \quad (9.4.1)$$

$$B_r = \sqrt{\frac{k_r m m'}{m}}. \quad (9.4.2)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Понижение в наблюдательной скважине для времени $t > \frac{mS}{2k}$

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \left\{ W \left(\frac{r^2 S}{4k_r m t}, \frac{r}{B_r} \right) + \frac{4m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_0 \left(\sqrt{\left(\frac{r}{B_r} \right)^2 + \chi^2 \left(\frac{n\pi r}{m} \right)^2} \right) \times \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \cos \frac{n\pi z_w}{m} \right] \right\}. \tag{9.4.3}$$

2. Для расстояний $r > 1.5 m/\chi$ понижение в наблюдательной скважине определяется так же, как понижение от действия совершенной опытной скважины в изотропном водоносном пласте с проводимостью $k = k_r$:

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} W \left(\frac{r^2 S}{4k_r mt}, \frac{r}{B_r} \right) = \frac{Q}{4\pi T_r} W \left(\frac{r^2}{4a_r mt}, \frac{r}{B_r} \right). \tag{9.4.4}$$

- 3. Понижение в опытной скважине:
 - для времени t > 0.5 mS/k,

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi k_{r}m} \left\{ W \left(\frac{r_{w}^{2}S}{4k_{r}mt} \right) + \frac{4m}{\pi l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_{0} \left(\frac{n\pi r_{w}}{m} \chi \right) \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \right] \right\}; \quad (9.4.5)$$

- для малых значений выражения $\frac{r_w}{m}\sqrt{\frac{k_z}{k_r}}$

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi k_{r}m} \left\{ W \left(\frac{r_{w}^{2}S}{4k_{r}mt}, \frac{r_{w}}{B_{r}} \right) - \ln \frac{\Gamma \left(1 + \frac{z_{wl}}{2m} \right)}{\Gamma \left(1 - \frac{z_{wl}}{2m} \right)} + \frac{2m}{z_{wl}} \left(\operatorname{arcsinh} \frac{z_{wl}}{\chi r_{w}} - \frac{z_{wl}}{m} \ln \frac{4m}{\chi r_{w}} \right) \right\}; \quad (9.4.6)$$

— для неравенств $\frac{z_{wl}}{r_w} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} > 10$ и $0 \le \frac{z_{wl}}{m} \le 0.5$

$$s_{w} \approx \frac{Q}{4\pi k_{r}m} \left\{ W \left(\frac{r_{w}^{2}S}{4k_{r}mt}, \frac{r_{w}}{B_{r}} \right) + \frac{2m}{z_{wl}} \left[\left(1 - \frac{z_{wl}}{m} \right) \ln \frac{2z_{wl}}{\chi r_{w}} - \frac{1}{z_{wl}} \left[-\frac{z_{wl}}{m} \ln \frac{2m}{z_{wl}} - \frac{0.423z_{wl}}{m} + \ln \frac{2m + z_{wl}}{2m - z_{wl}} \right] \right\}. \quad (9.4.7)$$

Уравнение для стационарного периода

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi k_{r}m} \left\{ K_{0} \left(\frac{r}{B_{r}} \right) + \frac{2m}{\pi l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} K_{0} \left(\sqrt{\left(\frac{r}{B_{r}} \right)^{2} + \chi^{2} \left(\frac{n\pi r}{m} \right)^{2}} \right) \times \left(\sin \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin \frac{n\pi z_{w2}}{m} \right) \cos \frac{n\pi z_{w}}{m} \right] \right\}.$$
(9.4.8)

❖ Способы обработки откачки

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Таблица 9.4.1

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.4.1	k_r, k_z, S, B_r	$s - \lg t$
9.4.4	k_r, S, B_r	3 – 1g t

Замечание

По уравнению (9.4.4), которое используется для расстояний $r>1.5m\sqrt{k_r/k_z}$, определяются проводимость по горизонтали T_r , пьезопроводность a_r и параметр перетекания B_r . Для расчета этих параметров можно воспользоваться всеми возможными способами обработки откачки в изотропном водоносном пласте с перетеканием (см. раздел 9.1.1), где $T_r=T$, $a_r=a$ и $B_r=B$.

Дуплетное опробование

Схема проведения опыта:

- общие условия для анизотропного водоносного пласта с перетеканием (см. начало раздела 9.4);
- основной водоносный пласт: профильно-анизотропный;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия, в которой с помощью пакеров выделяются два интервала. Из верхнего (первого) интервала откачивается вода с постоянным расходом, а в нижний (второй) интервал с таким же расходом закачивается вода;
- понижение определяется в опытной скважине;
- типовая схема [Kabala, et al., 1985]: рис. 9.22.

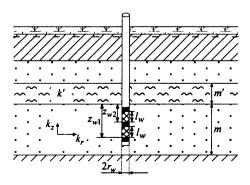


Рис. 9.22. Типовая схема (разрез) профильно-анизотропного водоносного комплекса с перетеканием при дуплетном опробовании.

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в верхнем интервале и повышение в нижнем интервале опытной скважины

$$s_{w} = \frac{Q}{\pi k_{r} m} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin \frac{n\pi l_{w}}{2m}}{\frac{n\pi l_{w}}{2m}} \right\}^{2} \sin \left(n\pi \frac{z_{w1} + z_{w2}}{2m} \right) \sin \left(n\pi \frac{z_{w1} - z_{w2} - l_{w}}{2m} \right) \times \left\{ \cos \left(n\pi \frac{2z_{w2} \pm l_{w}}{2m} \right) W \left[\frac{r_{w}^{2}}{4a_{r}t}, \sqrt{\left(\frac{r_{w}}{B_{r}} \right)^{2} + \left(\frac{\chi n\pi r_{w}}{m} \right)^{2}} \right] \right\}, \quad (9.4.9)$$

где \pm – знак при определении понижения в верхнем интервале «—», а при определении повышения в нижнем интервале — « \pm ».

Уравнение для периода стационара

Максимальное понижение в верхнем интервале и повышение в нижнем интервале опытной скважины

$$s_{mw} = \frac{2Q}{\pi k_{r} m} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin \frac{n\pi l_{w}}{2m}}{\frac{n\pi l_{w}}{2m}} \right\}^{2} \sin \left(n\pi \frac{z_{w1} + z_{w2}}{2m} \right) \sin \left(n\pi \frac{z_{w1} - z_{w2} - l_{w}}{2m} \right) \times \left\{ \cos \left(n\pi \frac{2z_{w2} + l_{w}}{2m} \right) K_{0} \left[\sqrt{\left(\frac{r_{w}}{B_{r}} \right)^{2} + \left(\frac{\chi n \pi r_{w}}{m} \right)^{2}} \right] \right\}. \quad (9.4.10)$$

Время наступления стационарного периода

$$t_s = 5 \frac{m^2}{\pi^2 \chi^2 a_r} = 5 \frac{mS}{\pi^2 k_z} = 5 \frac{m^2}{\pi^2 a_z}.$$
 (9.4.11)

***** Способы обработки дуплетного опробования

Точечные способы

По времени наступления стационарного периода:

определение вертикальной пьезопроводности:

$$a_z = \frac{5m^2}{\pi^2 t_-},\tag{9.4.12}$$

 определение горизонтальной пьезопроводности при известном коэффициенте анизотропии:

$$a_r = 5 \frac{m^2}{\pi^2 \, v^2 t} \,. \tag{9.4.13}$$

Подбор параметров

Таблица 9.4.2

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.4.9	k_r, k_z, a_r, B_r	$s_w - \lg t$

9.4.2. Планово-анизотропный пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для анизотропного водоносного пласта с перетеканием (см. начало раздела 9.4);
- основной водоносный пласт: планово-анизотропный;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- типовая схема: рис. 9.23.

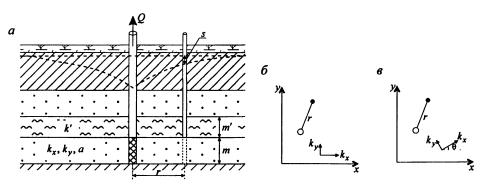


Рис. 9.23. Типовая схема планово-анизотропного водоносного комплекса с перетеканием. a – разрез; b, b – план при совпадении (b) и несовпадении (b) координатных осей с направлением анизотропии.

<u>Литература:</u> Hantush, 1966a; Kruseman, Ridder, 1994.

Список решений:

понижение для нестационарного периода: уравнение (9.4.14).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q}{4\pi T_{\bullet}} W \left(\frac{r^2}{4a_{\bullet}t}, \frac{r}{B_{\bullet}} \right), \tag{9.4.14}$$

$$T_e = \sqrt{T_x T_y} , \qquad (9.4.15)$$

$$a_r = \frac{T_r}{S},\tag{9.4.16}$$

$$T_r = \frac{T_x T_y}{T_v \cos^2 \theta + T_x \sin^2 \theta} = r^2 \frac{T_x T_y}{T_v x^2 + T_x y^2}.$$
 (9.4.17)

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 9.4.3 Полбираемые параметры и рекоменлуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
9.4.14	T_e, a_r, B_r	$s - \lg t$	

Алгоритм определения параметров Hantush [1966a]

Обработка основана на схожести уравнений (9.4.14) и (9.1.1) для схемы изотропного водоносного пласта с перетеканием (см. раздел 9.1.1), где вместо проводимости пласта определяется эффективная проводимость T_{ei} , а вместо пьезопроводности y пласта – пьезопроводность по лучу a_{ri} .

Рассматривается два варианта: 1) направление анизотропии известно заранее и 2) направление анизотропии неизвестно.

Вариант 1. Направление анизотропии известно заранее, и имеются два луча наблюдательных скважин (рис. 9.24).

1. По схеме изотропного водоносного пласта с перетеканием (см. раздел 9.1.1) определим эффективную проводимость T_{ei} для каждого

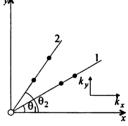


Рис. 9.24. Схема расположения наблюдательных скважин по двум лучам.

луча по уравнению (9.4.14) и вычислим эффективную проводимость для водоносного пласта как среднее значение:

$$T_e = \frac{T_{e1} + T_{e2}}{2} \ . \tag{9.4.18}$$

- 2. По схеме изотропного водоносного пласта с перетеканием (раздел 9.1.1) на основе уравнения (9.4.14) определим пьезопроводности a_{r1} , a_{r2} и параметры перетекания B_{r1} , B_{r2} по скважинам, находящимся соответственно на первом и на втором луче.
- 3. Обобщенный параметр a' по двум лучам равен:

$$a' = 0.5 \left(\frac{a_{r1}}{a_{r2}} + \frac{B_{r1}^2}{B_{r2}^2} \right). \tag{9.4.19}$$

4. Используя (9.4.17) и (9.4.19), определим проводимость по оси y:

$$T_{y} = T_{e} \sqrt{\frac{\sin^{2} \theta_{2} - a' \sin^{2} \theta_{1}}{a' \cos^{2} \theta_{1} - \cos^{2} \theta_{2}}},$$
 (9.4.20)

где θ_1 – угол между координатной осью x и первым лучом, градус; θ_2 – угол между координатной осью x и вторым лучом, градус.

5. Определим проводимость по оси x на основе (9.4.15):

$$T_x = \frac{T_e^2}{T_y} \,. {(9.4.21)}$$

6. По уравнению (9.4.17) определим проводимость для каждого луча:

$$T_{r1} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta_1 + T_x \sin^2 \theta_1},$$
 (9.4.22)

$$T_{r2} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta_2 + T_x \sin^2 \theta_2} \,. \tag{9.4.23}$$

7. Определим водоотдачу как среднее значение параметров по двум лучам:

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{r1}}{a_{r1}} + \frac{T_{r2}}{a_{r2}} \right). \tag{9.4.24}$$

8. Определим коэффициент фильтрации разделяющего слоя:

$$k' = \frac{1}{2} Sm' \left(\frac{a_{r1}}{B_{r1}^2} + \frac{a_{r2}}{B_{r2}^2} \right). \tag{9.4.25}$$

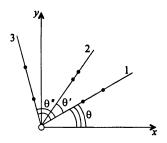


Рис. 9.25. Схема расположения наблюдательных скважин по трем лучам.

Вариант 2. Направление анизотропии неизвестно, и имеются три луча наблюдательных скважин (рис. 9.25).

 По схеме изотропного водоносного пласта с перетеканием (см. раздел 9.1.1) на основе уравнения (9.4.14) определим эффективную проводимость Т_{еі} для каждого луча и вычислим эффективную проводимость для водоносного пласта как среднее значение:

$$T_e = \frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3}}{3}. (9.4.26)$$

- 2. По схеме изотропного водоносного пласта с перетеканием (раздел 9.1.1) на основе уравнения (9.4.14) определим пьезопроводности a_{r1} , a_{r2} , a_{r3} и параметры перетекания B_{r1} , B_{r2} , B_{r3} по скважинам, находящимся соответственно на первом, втором и третьем луче.
- 3. Обобщенный параметр a' по первому и второму лучам равен:

$$a' = 0.5 \left(\frac{a_{r1}}{a_{r2}} + \frac{B_{r1}^2}{B_{r2}^2} \right). \tag{9.4.27}$$

4. Обобщенный параметр a'' по первому и третьему лучам равен:

$$a'' = 0.5 \left(\frac{a_{r1}}{a_{r3}} + \frac{B_{r1}^2}{B_{r3}^2} \right). \tag{9.4.28}$$

5. Делая небольшие преобразования, получим выражения для определения неизвестного угла $\, heta$

$$\tan(2\theta_1) = -2\frac{(a''-1)\sin^2\theta' - (a'-1)\sin^2\theta''}{(a''-1)\sin(2\theta') - (a'-1)\sin(2\theta'')}$$
(9.4.29)

и коэффициента плановой анизотропии $\chi_{XY} = \sqrt{\frac{T_x}{T_y}}$

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{\cos^2(\theta + \theta'') - a'\cos^2\theta}{a'\sin^2\theta - \sin^2(\theta + \theta'')}}$$
(9.4.30)

или

$$\chi_{XY} = \sqrt{\frac{\cos^2(\theta + \theta'') - a''\cos^2\theta}{a''\sin^2\theta - \sin^2(\theta + \theta'')}},$$
 (9.4.31)

гле

 θ — заранее неизвестный угол между координатной осью x и первым лучом, градус; θ' — известный угол между первым лучом и вторым, градус;

 θ'' – известный угол между первым лучом и третьим, градус.

6. Определим проводимость по оси у:

$$T_{y} = \frac{T_{e}}{\chi_{yy}}. (9.4.32)$$

7. Определим проводимость по оси x:

$$T_x = \frac{T_e^2}{T_v} \,. \tag{9.4.33}$$

8. По уравнению (9.4.17) определим T_r для каждого луча:

$$T_{r1} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2 \theta_1 + T_x \sin^2 \theta_1},$$
 (9.4.34)

$$T_{r2} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2(\theta + \theta') + T_x \sin^2(\theta + \theta')},$$
 (9.4.35)

$$T_{r3} = \frac{T_x T_y}{T_y \cos^2(\theta + \theta'') + T_x \sin^2(\theta + \theta'')}.$$
 (9.4.36)

9. Определим водоотдачу как среднее значение этих параметров по трем лучам:

$$S = \frac{1}{3} \left(\frac{T_{r1}}{a_{r1}} + \frac{T_{r2}}{a_{r2}} + \frac{T_{r3}}{a_{r3}} \right). \tag{9.4.37}$$

10. Определим коэффициент фильтрации разделяющего слоя:

$$k' = \frac{1}{2} Sm' \left(\frac{a_{r1}}{B_{r1}^2} + \frac{a_{r2}}{B_{r2}^2} + \frac{a_{r3}}{B_{r3}^2} \right). \tag{9.4.38}$$

Замечание

По уравнению (9.4.14) определяются эффективная проводимость T_e , пьезопроводность a_r и параметр перетекания B_r . Для расчета этих параметров можно воспользоваться всеми возможными способами обработки откачки в изотропном водоносном пласте с перетеканием (см. раздел 9.1.1), где $T_e = T$, $a_r = a$ и $B_r = B$.

9.5. Ограниченные в плане водоносные комплексы с перетеканием (прямолинейные границы)

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых слоев;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: проницаемый, через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс ограничен в плане одной или несколькими прямолинейными границами обеспеченного питания или непроницаемыми границами;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое не учитывается;
- здесь можно рассматривать любое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев, которые показаны в разделе 9.1.1 на рис. 9.1.
- В данном разделе рассматриваются следующие четыре разновидности ограниченных в плане водоносных пластов с перетеканием:
- 1) полуограниченные пласты;
- 2) ограниченные двумя параллельными границами (пласт-полоса);
- 3) ограниченные двумя пересекающимися границами (пласт-квадрант);
- 4) ограниченные двумя параллельными границами пласты, которые пересекает третья граница (U-образные пласты).

Условные обозначения:

a – пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

$$B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}$$
 — параметр перетекания: см. уравнения (9.1.2) и (9.1.3), м;

erfcu – интеграл вероятностей (Приложение 4);

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $F_{\nu}(u, \beta)$ — специальная функция (функция Ванденберга) для пласта-полосы с учетом перетекания (Приложение 14)

f — см. уравнения (9.5.31) и (9.5.32) для пласта-полосы или (9.5.63) и (9.5.64) для U-образного пласта;

 f_1 , f_2 — см. уравнения (9.5.30) и (9.5.33) для пласта-полосы или (9.5.62) и (9.5.65) для U-образного пласта;

 $I_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

i=1,2 — индекс отражения с левой стороны (i=1) и с правой (i=2) для пласта-полосы и U-образного пласта;

j = 1, 2, 3, ..., n — номер фиктивной (отраженной) скважины для пласта-полосы и U-образного пласта; для пласта-квадранта j = 1, 2, 3;

 j_0 – номер суммы;

 $K_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0'(\beta)$ – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

k — коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

L — ширина пласта-полосы и расстояние между параллельными границами U-образного пласта, м;

 L_p — расстояние от наблюдательной скважины до границы в пласте-полосе, до параллельной границы в U-образном пласте и до первой границы в пласте-квадранте, м;

 L_{p}^{\prime} – расстояние от наблюдательной скважины до второй границы в пласте-квадранте, м.

 L_w – расстояние от опытной скважины до границы, м;

 $L_w' = (L - L_w)$ — расстояние от опытной скважины до второй границы для пласта-полосы и до параллельной границы для U-образного пласта; для пласта-квадранта — расстояние до второй границы м; L_{Up} — расстояние от наблюдательной скважины до перпендикулярной границы в U-образном пласте, м;

 L_{Uw} — расстояние от опытной скважины до перпендикулярной границы в U-образном пласте, м;

m - мощность основного водоносного пласта, м;

m' – мощность разделяющего слоя, м;

N — максимальное число суммирования (в уравнениях (9.5.18) и (9.5.20));

n — количество отражений от одной границы в пласте-полосе и в U-образном пласте; номер суммы;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r — горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

$$r' = (\rho/r)^2$$
, $r_i^{\prime j} = (\rho_i^{j}/r)^2$, $r_i^{\prime} = (\rho_i/r)^2$, $r_{Ui}^{\prime j} = (\rho_U^{j}/r)^2$, $r_U^{\prime} = r_U/r$;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_{m} – понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 $s_{m,1},\,s_{m,2}\,$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

T = km — проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

время от начала откачки, сут;

и – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $\textit{W}(\textit{u}, \beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 $W'(u, \beta)$ — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $y = \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$ — проекция расстояния от опытной скважины до наблюдательной на линию границы, м;

 β – аргумент функций;

 $\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p}$ — горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной в полуограниченном пласте, м;

 ρ_1 , ρ_2 — горизонтальные расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной в полуограниченном пласте, м;

 ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 – горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой, второй и третьей фиктивных скважин в пласте-квадранте: определяются уравнениями (9.5.34) – (9.5.36), м;

 ρ_i^j — горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до j-й фиктивной скважины, отраженной с левой (i=1) и с правой стороны (i=2), для пласта-полосы (уравнения (9.5.11) и (9.5.12)) или для 1-го ряда U-образного пласта (уравнения (9.5.46) и (9.5.47)), м; $\rho_{j,i}$ — горизонтальное расстояние от первой (j=1), второй (j=2) и третьей (j=3)

фиктивных скважин до первой (i=1) и второй (i=2) наблюдательных скважин, м;

 ρ_U — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы U-образного пласта: определяется уравнением (9.5.50), м;

 ρ_{Ui}^{j} — расстояния от наблюдательной скважины до j-х фиктивных скважин 2-го ряда, отраженных от левой (i=1) и от правой (i=2) границы: определяются уравнениями (9.5.48) и (9.5.49), м;

± — для полуограниченного пласта: знак «—» ставится в приведенных ниже уравнениях перед функциями при учете граничного условия І рода, знак «+» — при учете граничного условия ІІ рода; для U-образного пласта эти знаки соответствуют І роду («-») и ІІ роду («+») на перпендикулярной границе;

+ — знак перед функциями: верхний знак — для граничных условий 1-го варианта, средний — +

для 2-го, нижний – для 3-го варианта.

9.5.1. Полуограниченные в плане водоносные комплексы с перетеканием

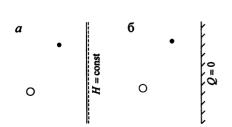


Рис. 9.26. Схематичный план границы обеспеченного питания (a) и непроницаемой границы (b).

Схема проведения опыта:

- общие условия для ограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием (см. начало раздела 9.5);
- граница: водоносный комплекс полуограничен в плане;
- типовые схемы: рис. 9.27.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 9.26):

вариант 1: водоносный комплекс полуограничен прямолинейной бесконечной границей обеспеченного питания (условие I рода);

вариант 2: водоносный комплекс полуограничен прямолинейной бесконечной непроницаемой границей (условие II рода).

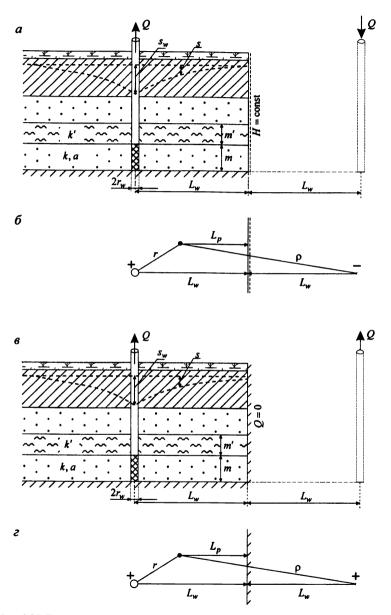


Рис. 9.27. Типовые схемы полуограниченного водоносного комплекса с перетеканием. а, б — соответственно разрез и план для схемы с границей обеспеченного питания; в, г — разрез и план для схемы с непроницаемой границей.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.1);
- понижение для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (9.5.2);
- понижение в опытной скважине для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (9.5.3);
- понижение на период стационара: уравнение (9.5.4);
- понижение в опытной скважине на период стационара: уравнение (9.5.5).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B} \right) \pm W \left(\frac{\rho^2}{4at}, \frac{\rho}{B} \right) \right], \tag{9.5.1}$$

где знак «+» ставится при граничном условии II рода, а «-» - при граничном условии I рода.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для больших интервалов времени $t > (2 \div 2.5) \frac{\rho^2}{a}$ и неравенства $\frac{\rho}{B} \le 0.2$ уравнение (9.5.1) упрощается [Бочевер, Веригин, 1961]:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B} \right) \pm K_0 \left(\frac{\rho}{B} \right) - \frac{1}{2} W \left(\frac{at}{B^2} \right) \left[I_0 \left(\frac{r}{B} \right) \pm I_0 \left(\frac{\rho}{B} \right) \right] \right\}. \tag{9.5.2}$$

2. Понижение в опытной скважине для времени $t > (8 \div 10) \frac{L_w^2}{a}$ и неравенства $\frac{r_w}{B} << 1$

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \ln \frac{1.123B}{r_{w}} \pm K_{0} \left(\frac{2L_{w}}{B} \right) - \frac{1}{2} W \left(\frac{at}{B^{2}} \right) \left[1 \pm I_{0} \left(\frac{2L_{w}}{B} \right) \right] \right\}. \tag{9.5.3}$$

Уравнения стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) \pm K_0 \left(\frac{\rho}{B} \right) \right]. \tag{9.5.4}$$

Время наступления стационарного периода [Бочевер, Веригин, 1961; Шестаков, 1973] $t \ge 3\frac{B^2}{a}$.

Частный случай для стационарного периода

Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{1.123B}{r_w} \pm K_0 \left(\frac{2L_w}{B} \right) \right]. \tag{9.5.5}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблиуа 9.5.1

гасчетные формулы для определения параметров					
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м	
$\frac{\lg s - \lg \frac{t}{r^2}}{\lg s - \lg t}$	$\lg W'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} \ (1)$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$ $a = \frac{10^E}{4}r^2$	Подбор при построении	
$\lg s_m - \lg r$	$\lg K_0'(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	_	$B = 10^{-E}$	

Примечание. $W'(u,\beta) = W(u,r/B) \pm W(ur',\rho/B)$; $K'_0(\beta) = K_0(\beta) \pm K_0(\beta\sqrt{r'})$; $r' = (\rho/r)^2$; (1) — график строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания — подбором при построении эталонной кривой.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{r_1}{B}\right) \pm W\left(\frac{\rho_1^2}{4at}, \frac{\rho_1}{B}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}, \frac{r_2}{B}\right) \pm W\left(\frac{\rho_2^2}{4at}, \frac{\rho_2}{B}\right)},$$
(9.5.6)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{K_0\left(\frac{r_1}{B}\right) \pm K_0\left(\frac{\rho_1}{B}\right) - \frac{1}{2}W\left(\frac{at}{B^2}\right)\left[I_0\left(\frac{r_1}{B}\right) \pm I_0\left(\frac{\rho_1}{B}\right)\right]}{K_0\left(\frac{r_2}{B}\right) \pm K_0\left(\frac{\rho_2}{B}\right) - \frac{1}{2}W\left(\frac{at}{B^2}\right)\left[I_0\left(\frac{r_2}{B}\right) \pm I_0\left(\frac{\rho_2}{B}\right)\right]}.$$
(9.5.7)

Подбор пьезопроводности и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

 Определение проводимости по понижению на период стационара при заданном параметре перетекания (на основе уравнения (9.5.4) или (9.5.5)):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} [K_0(r/B) \pm K_0(\rho/B)], \qquad (9.5.8)$$

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{min}} \left[\ln(1.123B/r_w) \pm K_0 (2L_w/B) \right]. \tag{9.5.9}$$

2. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара (на основе уравнения (9.5.4)):

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{K_0(r_1/B) \pm K_0(\rho_1/B)}{K_0(r_2/B) \pm K_0(\rho_2/B)}.$$
 (9.5.10)

Подбор параметров

Таблица 9.5.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.5.1	T, a, B	$s - \lg t$
9.5.3	T, a, B	$s_w - \lg t$
9.5.6, 9.5.7	a, B	$s_1/s_2 - \lg t$

9.5.2. Пласт-полоса в водоносном комплексе с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного в плане (см. начало раздела 9.5);
- границы: водоносный комплекс ограничен в плане двумя параллельными бесконечными границами;
- типовые схемы: рис. 9.30 9.32.

Рассматривается три варианта граничных условий (рис. 9.28):

вариант 1: две параллельные границы обеспеченного питания (условия І рода);

вариант 2: две параллельные непроницаемые границы (условия ІІ рода);

вариант 3: смещанные граничные условия на параллельных границах (условия I и II рода).

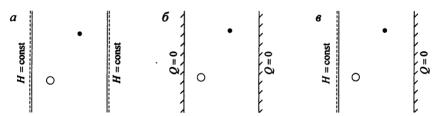


Рис. 9.28. Схематичный план пласта-полосы.

a – две границы обеспеченного питания; b – две непроницаемые границы; b – смещанные граничные условия.

<u>Литература:</u> Hantush, Jacob, 1954, 1955a; Bukhari et. al., 1969; Vandenberg, 1977, Kruseman, Ridder. 1994.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин (рис. 9.29), отраженных от левой (ρ_1^J) и от правой (ρ_2^J) границы, рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + y^2},$$
 (9.5.11)

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_p' + L_w' + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w'\right)^2 + y^2} . \tag{9.5.12}$$

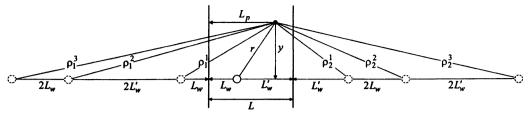


Рис. 9.29. Схематичный план пласта-полосы с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин.

Список решений

Граничные условия І рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (9.5.13) и (9.5.14);
- понижение для нестационарного периода в опытной скважине: уравнение (9.5.15);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.16) (9.5.18);
- понижение на период стационара в опытной скважине: уравнения (9.5.19) и (9.5.20).

Граничные условия II рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (9.5.21) –(9.5.23);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.25) и (9.5.26).

Граничные условия I и II рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.27);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.28) и (9.5.29).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Граничные условия I рода

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left(\frac{\left(\rho_i^j\right)^2}{4at}, \frac{\rho_i^j}{B}\right) \right\}. \tag{9.5.13}$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.13) – без использования специальных функций:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin \frac{n\pi (L_p - L/2)}{L} \sin \frac{n\pi (L_w - L/2)}{L}}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}} \times \left(\exp \left(-\frac{\pi y}{L} \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \pi \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2} \frac{\sqrt{at}}{L}\right) - \exp \left(\frac{\pi y}{L} \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \pi \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2} \frac{\sqrt{at}}{L}\right) \right) \right\}. (9.5.14)$$

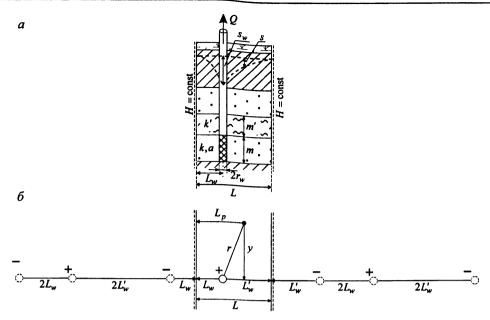


Рис. 9.30. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного двумя параллельными границами обеспеченного питания. a – разрез; δ – план.

Частный случай для нестационарной фильтрации

Понижение в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos \frac{n\pi r_{w}}{L} - (-1)^{n} \cos \frac{2n\pi L_{w}}{L}}{\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} \operatorname{erfc} \left(1 - \pi \sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}} \frac{\sqrt{at}}{L}\right) \right\}. \quad (9.5.15)$$

Уравнения стационарного периода

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 K_0 \left(\frac{\rho_i^j}{B} \right) \right\}. \tag{9.5.16}$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.16) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\exp\left(-\frac{\pi y}{L} \sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right)}{\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} \left[\cos\frac{n\pi (L_{p} - L_{w})}{L} - \frac{1}{L} + \cos\frac{n\pi (L_{p} + L_{w} - L)}{L} \right] \right\}.$$
(9.5.17)

Частные случаи для стационарного периода

1. Для малых значений выражения $\frac{y}{L}$ (и, следовательно, для неравенства r << L) из-за плохой сходимости бесконечного ряда в уравнении (9.5.17) рекомендуется использовать следующую аппроксимационную зависимость:

$$S_{m} \approx \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\cosh \frac{\pi y}{L} + \cosh \frac{\pi (L_{p} + L_{w})}{L}}{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cosh \frac{\pi (L_{p} - L_{w})}{L}} + \frac{1}{L} \left[\left(\cos \frac{n\pi (L_{p} - L_{w})}{L} - \cos \frac{n\pi (L_{p} + L_{w} - L)}{L} \right) \times \left(-\frac{n\pi y}{L} + \frac{1}{L} \right) \right] \right\}, \qquad (9.5.18)$$

где N — положительное целое число, такое, что приблизительно должно соблюдаться равенство $\sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2} \approx n$. Отсюда следует, что $N >> \frac{L}{\pi B}$.

2. Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi r_w}{L} - (-1)^n \cos \frac{2n\pi L_w}{L}}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}}.$$
 (9.5.19)

3. Аппроксимационная зависимость для уравнения (9.5.19)

$$s_{mw} \approx \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + \cosh \frac{2\pi L_w}{L}}{1 - \cosh \frac{\pi r_w}{L}} \right] + \sum_{n=1}^{N} \left(1 / \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2} - \frac{1}{n} \right) \left(\cos \frac{n\pi r_w}{L} - (-1)^n \cos \frac{2n\pi L_w}{L} \right) \right\}, \quad (9.5.20)$$

где N — положительное целое число, такое, что приблизительно должно соблюдаться равенство $\left(1/\sqrt{n^2+\left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}-\frac{1}{n}\right)\approx 0$. Отсюда следует, что $N>>\frac{L}{\pi B}$.

Граничные условия II рода Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{\left(\rho_i^{j}\right)^2}{4at}, \frac{\rho_i^{j}}{B}\right) \right\}. \tag{9.5.21}$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.21) – без использования специальных функций:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ -\frac{y}{B} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^{2}}{4at}} - \frac{\sqrt{at}}{2B}\right) - \exp\left(\frac{y}{B}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^{2}}{4at}} + \frac{\sqrt{at}}{2B}\right) \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[-\frac{\cos\frac{n\pi(L_{p} - L/2)}{L}\cos\frac{n\pi(L_{w} - L/2)}{L}}{\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{\pi y}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^{2}}{4at}} - \frac{\pi\sqrt{at}}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) - \left(-\exp\left(\frac{\pi y}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) - \left(-\exp\left(\frac{\pi y}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) - \left(-\frac{\pi\sqrt{at}}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) - \left(-$$

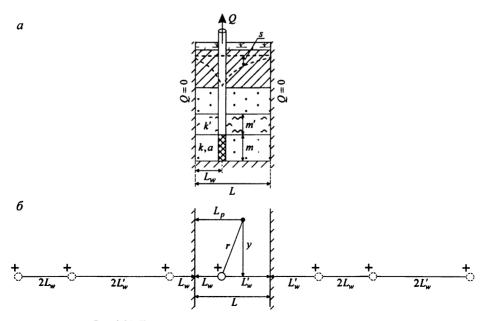


Рис. 9.31. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного двумя параллельными непроницаемыми границами. a – разрез; δ – план.

Частный случай для нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии $\sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2} > L$, (решение Vandenberg [1977; Kruseman, Ridder, 1994])

$$s = \frac{Q}{2TL} \left\{ y F_V \left(\frac{y^2}{4at}, \frac{y}{B} \right) \right\}, \tag{9.5.23}$$

$$F_V(u,\beta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} \tau^{-3/2} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) d\tau$$
 (9.5.24)

Уравнения стационарного периода

1. Решение, основанное на принципе суперпозиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 K_0 \left(\frac{\rho_i^j}{B} \right) \right\}. \tag{9.5.25}$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.25) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \frac{\pi B}{L} \exp\left(-\frac{y}{B}\right) + 2\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\exp\left(-\frac{\pi}{L}y\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right)}{\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} \times \left(9.5.26\right) \times \cos\frac{n\pi(L_{p} - L/2)}{L} \right] \right\}.$$

Граничные условия I и II рода

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{\left(\rho_{i}^{j}\right)^{2}}{4at}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} W\left(\frac{\left(\rho_{1}^{j}\right)^{2}}{4at}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} W\left(\frac{\left(\rho_{2}^{j}\right)^{2}}{4at}, \frac{\rho_{2}^{j}}{B}\right) \right] \right\}. \quad (9.5.27)$$

Уравнения стационарного периода

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} K_{0} \left(\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} K_{0} \left(\frac{\rho_{1}^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} K_{0} \left(\frac{\rho_{2}^{j}}{B}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left(\frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \end{cases}$$
(9.5.28)

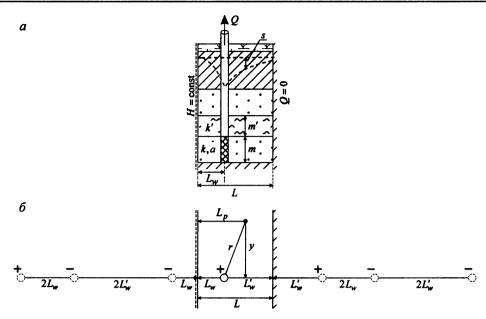


Рис. 9.32. Типовая схема водоиосного комплекса с перетеканием, ограниченного двумя параллельными границами, одна из которых – граница обеспеченного питания, а другая – непроницаемая.

а – разрез; б – план.

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.28) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{\pi y}{2L} \sqrt{(2n-1)^{2} + \left(\frac{2L}{\pi B}\right)^{2}}\right]}{\sqrt{(2n-1)^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} \times \left(-1\right)^{n} \sin\frac{(2n-1)\pi (L_{p}-L)}{2L} \cos\frac{(2n-1)\pi L_{w}}{2L} \right\}. \tag{9.5.29}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 9.5.3

	гасчетные формулы для определения параметров				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м	
$\frac{\lg s - \lg \frac{t}{r^2}}{\lg s - \lg t}$	$\lg W'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} \ (1)$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}$ $a = \frac{10^E}{4}r^2$	Подбор при построении	

Таблица 9.5.3 (окончание)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м
$\lg s_m - \lg r$	$\lg K_0'(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	_	$B = 10^{-E}$
$\lg s - \lg t$	$\lg F(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} \ (1)$	$T = \frac{Qy}{2L \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4} y^2$	Подбор при построении

Примечание.

Для граничных условий I рода

$$W'(u,\beta) = W\left(u,\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{i}^{\prime j},\frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right), K'_{0}(\beta) = K_{0}(\beta) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} K_{0}(\beta\sqrt{r_{i}^{\prime j}});$$

для граничных условий II рода

$$W'(u,\beta) = W\left(u,\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{i}^{'j},\frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right), K'_{0}(\beta) = K_{0}(\beta) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\beta\sqrt{r_{i}^{'j}}\right);$$

для граничных условий I и II рода

$$W'(u,\beta) = \begin{cases} W\left(u,\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} W\left(ur_1^{ij},\frac{\rho_1^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} W\left(ur_2^{ij},\frac{\rho_2^{j}}{B}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_i^{ij},\frac{\rho_i^{j}}{B}\right) \end{cases},$$

$$K_0'(\beta) = \begin{cases} K_0(\beta) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} K_0 \left(\beta \sqrt{r_1'^j} \right) + (-1)^{(j+3)/2} K_0 \left(\beta \sqrt{r_2'^j} \right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} K_0 \left(\beta \sqrt{r_i'^j} \right) \end{cases};$$

$$r_i^{\prime j} = \left(\rho_i^j / r\right)^2;$$

(1) — график строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания — подбором при построении эталонной кривой.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{9.5.30}$$

Подбор пьезопроводности и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы; f_1 , f_2 — выражение в фигурных скобках правой части уравнений (9.5.13), (9.5.14), (9.5.21), (9.5.22), (9.5.23) или (9.5.27) соответственно для первой и второй наблюдательной скважины.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара при заданном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} f, \qquad (9.5.31)$$

где f – выражение в фигурных скобках правой части уравнения (9.5.16), (9.5.17), (9.5.18), (9.5.25), (9.5.26), (9.5.28) или (9.5.29).

Определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине при заданном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} f , \qquad (9.5.32)$$

где f – выражение в фигурных скобках правой части уравнения (9.5.19) или (9.5.20).

2. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{f_1}{f_2} \,, \tag{9.5.33}$$

где f_1 , f_2 — выражение в фигурных скобках правой части уравнения (9.5.16), (9.5.17), (9.5.18), (9.5.25), (9.5.26), (9.5.28) или (9.5.29) соответственно для первой и второй наблюдательных скважин.

Подбор параметров

Таблица 9.5.4 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.5.13, 9.5.14, 9.5.21, 9.5.22, 9.5.27	T, a, B	$s - \lg t$
9.5.15	T, a, B	$s_w - \lg t$
9.5.30	а, В	$s_1/s_2 - \lg t$

9.5.3. Пласт-квадрант в водоносном комплексе с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного в плане (см. начало раздела 9.5);
- границы: водоносный комплекс ограничен двумя пересекающимися под прямым углом прямолинейными полубесконечными границами;
- типовая схема: рис. 9.35.

Рассматривается три варианта граничных условий (рис. 9.33):

вариант 1: две пересекающиеся границы обеспеченного питания (условия І рода);

вариант 2: две пересекающиеся непроницаемые границы (условия ІІ рода);

вариант 3: две пересекающиеся границы, одна из которых граница обеспеченного питания, а другая – непроницаемая (условия I и II рода).

<u>Литература:</u> Hantush, Jacob, 1954.

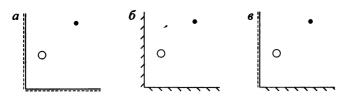


Рис. 9.33. Схематичный план пласта-квадранта.

a – границы обеспеченного питания; b – непроницаемые границы; b – смещанные граничные условия.

Определение расстояний до фиктивных скважин

Расстояния до фиктивных скважин (рис. 9.34) рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\rho_1 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' - L_p')^2} , \qquad (9.5.34)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} , \qquad (9.5.35)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(L_w + L_p)^2 + (L_w' + L_p')^2} \ . \tag{9.5.36}$$

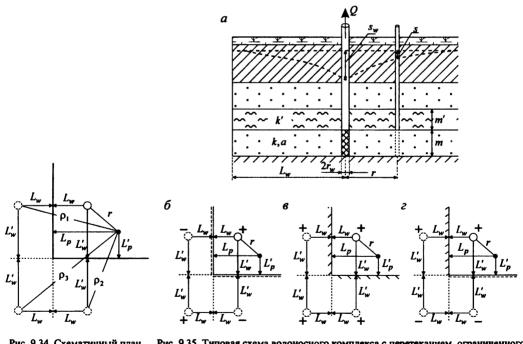


Рис. 9.34. Схематичный план пласта-квадранта с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин.

Рис. 9.35. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного двумя пересекающимися границами (пласт-квадрант).

a – разрез; δ , s, z – соответственно план для схемы с границами обеспеченного питания, с непроницаемыми границами и со смешанными граничными условиями.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.37);
- понижение для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (9.5.38);

- понижение в опытной скважине для нестационарного периода для больших интервалов времени: уравнение (9.5.39);
- понижение на период стационара: уравнение (9.5.40);
- понижение в опытной скважине на период стационара: уравнение (9.5.41).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B} \right)_{+}^{-} W \left(\frac{\rho_1^2}{4at}, \frac{\rho_1}{B} \right)_{-}^{-} W \left(\frac{\rho_2^2}{4at}, \frac{\rho_2}{B} \right)_{+}^{+} W \left(\frac{\rho_3^2}{4at}, \frac{\rho_3}{B} \right) \right\}, \qquad (9.5.37)$$

где верхний знак ставится перед функцией для граничных условий 1-го варианта, средний – для 2-го, нижний – для 3-го варианта.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для времени $t > (2 \div 2.5) \frac{\rho_3^2}{a}$ и неравенства $\frac{\rho_3}{B} \le 0.2$ уравнение (9.5.37) упрощается:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} K_0 \left(\frac{r}{B}\right)_+^- K_0 \left(\frac{\rho_1}{B}\right)_-^- K_0 \left(\frac{\rho_2}{B}\right)_+^+ K_0 \left(\frac{\rho_3}{B}\right) - \\ -\frac{1}{2} W \left(\frac{at}{B^2}\right) I_0 \left(\frac{r}{B}\right)_+^- I_0 \left(\frac{\rho_1}{B}\right)_-^- I_0 \left(\frac{\rho_2}{B}\right)_+^+ I_0 \left(\frac{\rho_3}{B}\right) \end{cases} \end{cases}$$
(9.5.38)

2. Понижение в опытной скважине для времени $t > (2 \div 2.5) \frac{\rho^2}{a}$ и неравенства $\frac{r_w}{B} << 1$

$$s_{w} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \ln \frac{1.123B}{r_{w}} + K_{0} \left(\frac{2L_{w}}{B}\right) + K_{0} \left(\frac{2L'_{w}}{B}\right) + K_{0} \left(\frac{2\rho_{3}}{B}\right) - \\ -\frac{1}{2}W \left(\frac{at}{B^{2}}\right) \left[1 + I_{0} \left(\frac{2L_{w}}{B}\right) + I_{0} \left(\frac{2L'_{w}}{B}\right) + I_{0} \left(\frac{2\rho_{3}}{B}\right)\right] \end{cases}.$$
(9.5.39)

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_{0} \left(\frac{r}{B} \right)_{+}^{-} K_{0} \left(\frac{\rho_{1}}{B} \right)_{-}^{-} K_{0} \left(\frac{\rho_{2}}{B} \right)_{-}^{+} K_{0} \left(\frac{\rho_{3}}{B} \right) \right]. \tag{9.5.40}$$

Время наступления стационара $t \ge 3\frac{B^2}{a}$.

Таблииа 9.5.5

Частный случай для стационарного периода

Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{1.123B}{r_w} + K_0 \left(\frac{2L_w}{B} \right) + K_0 \left(\frac{2L_w'}{B} \right) + K_0 \left(\frac{\rho_3}{B} \right) \right]. \tag{9.5.41}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

	- mo 10111111				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м	
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} $ (1)	r - Q	$a = \frac{10^E}{4}$	Подбор при	
$\lg s - \lg t$	$\int_{0}^{1} \frac{\mathrm{d} g''(u, p)^{-1} \mathrm{d} g^{-1}(1)}{u}$	$T = \frac{\mathcal{L}}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}r^2$	построении	
$\lg s_m - \lg r$	$\lg K_0'(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	_	$B=10^{-E}$	

Примечание.
$$W'(u,\beta) = W\left(u,\frac{r}{B}\right)^{-}_{+}W\left(ur'_{1},\frac{\rho_{1}}{B}\right)^{-}_{-}W\left(ur'_{2},\frac{\rho_{2}}{B}\right)^{+}_{+}W\left(ur'_{3},\frac{\rho_{3}}{B}\right),$$

$$K'_{0}(\beta) = K_{0}(\beta)^{-}_{+}K_{0}\left(\beta\sqrt{r'_{1}}\right)^{-}_{+}K_{0}\left(\beta\sqrt{r'_{2}}\right)^{+}_{+}K_{0}\left(\beta\sqrt{r'_{3}}\right); \ r'_{i} = (\rho_{i}/r)^{2}; \ i = 1,2,3;$$

(1) — график строится для заданного параметра перетекания, и, следовательно, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания — подбором при построении эталонной кривой.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_{1}}{s_{2}} = \frac{W\left(\frac{r_{1}^{2}}{4at}, \frac{r_{1}}{B}\right)_{+}^{-} W\left(\frac{\rho_{1,1}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{1,1}}{B}\right)_{-}^{-} W\left(\frac{\rho_{2,1}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{2,1}}{B}\right)_{+}^{+} W\left(\frac{\rho_{3,1}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{3,1}}{B}\right)}{W\left(\frac{r_{2}^{2}}{4at}, \frac{r_{2}}{B}\right)_{+}^{-} W\left(\frac{\rho_{1,2}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{1,2}}{B}\right)_{-}^{-} W\left(\frac{\rho_{2,2}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{2,2}}{B}\right)_{+}^{+} W\left(\frac{\rho_{3,2}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{3,2}}{B}\right)}.$$

$$(9.5.42)$$

Подбор пьезопроводности и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

 Определение проводимости по понижению на период стационара в наблюдательной и опытной скважинах при заданном параметре перетекания (на основе уравнений (9.5.40) или (9.5.41)):

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right)_+^- K_0 \left(\frac{\rho_1}{B} \right)_-^- K_0 \left(\frac{\rho_2}{B} \right)_-^+ K_0 \left(\frac{\rho_3}{B} \right) \right], \tag{9.5.43}$$

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \left[\ln \frac{1.123B}{r_w} + K_0 \left(\frac{2L_w}{B} \right) + K_0 \left(\frac{2L_w'}{B} \right) + K_0 \left(\frac{\rho_3}{B} \right) \right]. \tag{9.5.44}$$

2. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара (на основе уравнения (9.5.37) или (9.5.38)):

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{K_0 \left(\frac{r_1}{B}\right)_{+}^{-} K_0 \left(\frac{\rho_{1,1}}{B}\right)_{-}^{-} K_0 \left(\frac{\rho_{2,1}}{B}\right)_{+}^{+} K_0 \left(\frac{\rho_{3,1}}{B}\right)}{K_0 \left(\frac{r_2}{B}\right)_{+}^{-} K_0 \left(\frac{\rho_{1,2}}{B}\right)_{-}^{-} K_0 \left(\frac{\rho_{2,2}}{B}\right)_{+}^{+} K_0 \left(\frac{\rho_{3,2}}{B}\right)}.$$

$$(9.5.45)$$

Подбор параметров

Таблица 9.5.6 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.5.37, 9.5.38	T, a, B	$s - \lg t$
9.5.42	a, B	$s_1/s_2 - \lg t$

9.5.4. U-образный водоносный комплекс с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для водоносного пласта с перетеканием, ограниченного в плане (см. начало раздела 9.5);
- граница: водоносный комплекс ограничен двумя параллельными прямолинейными границами и одной границей, перпендикулярной к параллельным;
- типовые схемы: рис. 9.38 9.40.

Рассматривается шесть вариантов граничных условий (рис. 9.36):

- вариант 1: параллельные границы обеспеченного питания (условия I рода), перпендикулярная граница обеспеченного питания (условие I рода);
- вариант 2: параллельные границы обеспеченного питания (условия I рода), перпендикулярная граница непроницаемая (условие II рода);
- вариант 3: параллельные границы непроницаемые (условия II рода), перпендикулярная граница обеспеченного питания (условие I рода);
- вариант 4: параллельные границы непроницаемые (условия II рода), перпендикулярная граница непроницаемая (условие II рода);
- вариант 5: параллельные границы со смешанными условиями (условия I и II рода), перпендикулярная граница обеспеченного питания (условие I рода);
- вариант 6: параллельные границы со смешанными условиями (условия I и II рода), перпендикулярная граница непроницаемая (условие II рода).

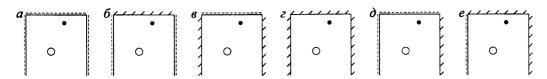


Рис. 9.36. Схематичный план U-образного пласта.

a, b – параллельные границы обеспеченного питания, e, e – непроницаемые, d, e – смешанные граничные условия.

Определение расстояний до фиктивных скважин (рис. 9.37):

— расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин первого ряда, отраженных от левой (ρ_1^j) и от правой (ρ_2^j) границ,

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0 = 2, 4, \dots}^{j} 2L_w' + \sum_{j_0 = 3, 5, \dots}^{j} 2L_w\right)^2 + \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^2},$$
 (9.5.46)

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_p' + L_w' + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_w + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_w'\right)^2 + \left(L_{Uw} - L_{Up}\right)^2}; \qquad (9.5.47)$$

– расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин второго ряда, отраженных от левой (ρ_{U1}^{j}) и от правой (ρ_{U2}^{j}) границ,

$$\rho_{U1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w}' + \sum_{j_{0}=3,5,...}^{j} 2L_{w}\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}},$$
 (9.5.48)

$$\rho_{U2}^{j} = \sqrt{\left(L_{p}' + L_{w}' + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,...}^{j} 2L_{w}'\right)^{2} + \left(L_{Uw} + L_{Up}\right)^{2}};$$
 (9.5.49)

– расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины, отраженной от перпендикулярной границы (ρ_U),

$$\rho_U = \sqrt{(L_w - L_p)^2 + (L_{Uw} + L_{Up})^2} . \tag{9.5.50}$$

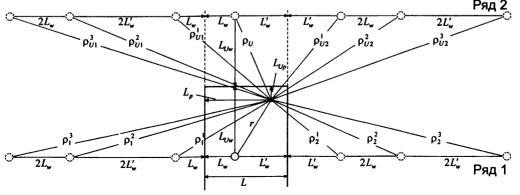


Рис. 9.37. Схематичный план U-образного пласта с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных скважин первого и второго ряда.

Список решений

Параллельные границы I рода, перпендикулярная граница I или II рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.51);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.52) и (9.5.53);
- понижение на период стационара в опытной скважине: уравнение (9.5.54).

Параллельные границы II рода, перпендикулярная граница I или II рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.55);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.56) и (9.5.57);
- понижение на период стационара в опытной скважине: уравнение (9.5.58).

Параллельные границы I и II рода, перпендикулярная граница I или II рода:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (9.5.59);
- понижение на период стационара: уравнения (9.5.60) и (9.5.61).

Откачка с постоянным расходом

❖ Базовые аналитические зависимости

Параллельные границы I рода Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \end{bmatrix} \pm \left\{ \frac{1}{2} \left[W\left(\frac{\rho_{U}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U}}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{U}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U_{i}}^{j}}{B}\right) \right] \right\},$$
(9.5.51)

где (\pm) — знак (-) ставится при граничном условии I рода на перпендикулярной границе и (+) — при граничном условии II рода.

Уравнения стационарного периода

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \left[K_{0} \left(\frac{r}{B} \right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left(\frac{\rho_{i}^{j}}{B} \right) \right] \pm \left[K_{0} \left(\frac{\rho_{U}}{B} \right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left(\frac{\rho_{U_{i}^{j}}}{B} \right) \right] \right\} . (9.5.52)$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.52) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin \frac{n\pi (L_{p} - L/2)}{L} \sin \frac{n\pi (L_{w} - L/2)}{L}}{\sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}}} + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) \pm \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \sqrt{n^{2} + (\frac{L}{\pi B})^{2}} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \right) + \exp \left(-\frac{\pi |L_{Up} - L_{Uw}|}{L} \right)$$

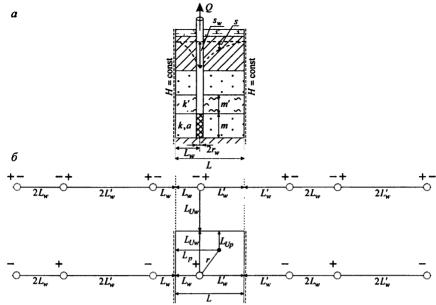


Рис. 9.38. Типовая схема U-образного водоносного комплекса с перетеканием с параллельными границами обеспеченного питания.

a – разрез; δ – план. Для второго ряда фиктивных скважин первый знак расхода дается для перпендикулярной границы обеспеченного питания, а второй – для перпендикулярной непроницаемой границы.

Частный случай для стационарного периода

Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos \frac{n\pi r_w}{L} - (-1)^n \cos \frac{2n\pi L_w}{L}}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}} \left(1 \pm \exp\left(-\frac{2\pi L_{Uw}}{L}\right) \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2} \right) \right\}. (9.5.54)$$

Параллельные границы II рода

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \end{bmatrix} \pm \left[W\left(\frac{\rho_{U}^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U}}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{U}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U}^{j}}{B}\right) \right] \right\}.$$
(9.5.55)

Уравнения стационарного периода

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ \left[K_{0} \left(\frac{r}{B} \right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left(\frac{\rho_{i}^{j}}{B} \right) \right] \pm \left[K_{0} \left(\frac{\rho_{U}}{B} \right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left(\frac{\rho_{Ui}^{j}}{B} \right) \right] \right\}. \quad (9.5.56)$$

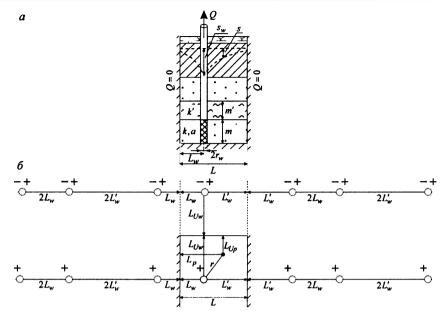


Рис. 9.39. Типовая схема U-образного водоносного комплекса с перетеканием с параллельными непроницаемыми границами.

a – разрез; δ – план. Для второго ряда фиктивных скважин первый знак расхода дается для перпендикулярной границы обеспеченного питания, а второй – для перпендикулярной непроницаемой границы.

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.56) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \frac{\pi B}{L} \left[\exp\left(-\frac{\left|L_{Up} - L_{Uw}\right|}{B}\right) \pm \exp\left(-\frac{\left|L_{Up} + L_{Uw}\right|}{B}\right) \right] + \\ \exp\left(-\frac{\pi \left|L_{Up} - L_{Uw}\right|}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) \pm \exp\left(-\frac{\pi \left|L_{Up} + L_{Uw}\right|}{L}\sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right) \times \\ \sqrt{n^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}} \times \cos\frac{n\pi \left(L_{p} - L/2\right)}{L}\cos\frac{n\pi \left(L_{w} - L/2\right)}{L} \end{cases}$$
(9.5.57)

Частный случай для стационарного периода

Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ -\frac{2L_{Uw}}{L} \left[1 \pm \exp\left(-\frac{2L_{Uw}}{B}\right) \right] + 2\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 \pm \exp\left(-\frac{2\pi L_{Uw}}{L} \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}\right)}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}} \left(\cos\frac{n\pi r_w}{L} + (-1)^n \cos\frac{2n\pi L_w}{L}\right) \right\} . (9.5.58)$$

Параллельные границы I и II рода

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} W\left(\frac{(\rho_{1}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{1}^{j}}{B}\right) + \right] + \\ + \left(-1\right)^{(j+3)/2} W\left(\frac{(\rho_{2}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{2}^{j}}{B}\right) + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \end{bmatrix} + \\ \pm \begin{bmatrix} W\left(\frac{r_{U}^{2}}{4at}, \frac{r_{U}}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} W\left(\frac{(\rho_{U1}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U1}^{j}}{B}\right) + \\ + (-1)^{(j+3)/2} W\left(\frac{(\rho_{U2}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{U2}^{j}}{B}\right) + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{U1}^{j})^{2}}{4at}, \frac{\rho_{Ui}^{j}}{B}\right) \end{bmatrix} \right\}$$

$$(9.5.59)$$

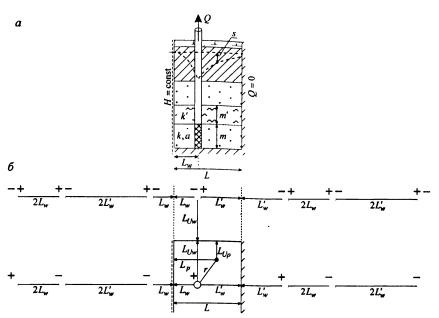


Рис. 9.40. Типовая схема U-образного водоносного комплекса с перетеканием со смещанными условиями на параллельных границах.

 а – разрез; б – план. Для второго ряда фиктивных скважин первый знак расхода дается для перпендикулярной границы обеспеченного питания, а второй – для перпендикулярной непроницаемой границы.

Уравнения стационарного периода

1. Решение для понижения в наблюдательной скважине, основанное на принципе суперпозиции:

уперпозиции:
$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{1}^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{2}^{j}}{B}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \\ \pm \left[K_{0}\left(\frac{r_{U}}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[(-1)^{(j+1)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{U1}^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{U2}^{j}}{B}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\frac{\rho_{Ui}^{j}}{B}\right) \end{cases} . \quad (9.5.60)$$

2. Упрощенная форма уравнения (9.5.60) – без использования специальных функций:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{\pi \left|L_{Up} - L_{Uw}\right|}{2L} \sqrt{(2n-1)^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}\right] \pm}{\sqrt{(2n-1)^{2} + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^{2}}} \pm \frac{\exp\left[-\frac{\pi \left|L_{Up} + L_{Uw}\right|}{2L} \sqrt{(2n-1)^{2} + \left(\frac{2L}{\pi B}\right)^{2}}\right]} \times \left(-1\right)^{n} \sin\frac{(2n-1)\pi (L_{p} - L)}{2L} \cos\frac{(2n-1)\pi L_{w}}{2L} \right\}$$

$$\times (-1)^{n} \sin\frac{(2n-1)\pi (L_{p} - L)}{2L} \cos\frac{(2n-1)\pi L_{w}}{2L}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 9.5.7
Расчетные формулы пла определения пяряметров

	т асчетные формулы для определения параметров				
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Параметр перетекания, м	
$\frac{\lg s - \lg \frac{t}{r^2}}{s}$	$\lg W'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u} $ (1)	T = <u>Q</u>	$a = \frac{10^E}{4}$	Подбор при	
$\lg s - \lg t$	15" (",P) 15 u	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = \frac{10^E}{4}r^2$	построении	
$\lg s_m - \lg r$	$\lg K_0'(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	-	$B=10^{-E}$	

Примечание ктабл. 9.5.7.

Для граничных условий I рода

$$W'(u,\beta) = \left\{ \left[W\left(u, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{i}^{\prime j}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \right] \pm \left[W\left(u, \frac{r_{U}^{\prime}}{B}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{Ui}^{\prime j}, \frac{\rho_{Ui}^{\prime j}}{B}\right) \right] \right\},$$

$$K'_{0}(\beta) = \left\{ \left[K_{0}(\beta) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\beta\sqrt{r_{i}^{\prime j}}\right) \right] \pm \left[K_{0}(\beta r_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\beta\sqrt{r_{Ui}^{\prime j}}\right) \right] \right\},$$
THE TREE PROPERTY IN PROPERTY IN THE PROPERTY.

$$W'(u,\beta) = \left\{ \left(W(u,r/B) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{i}^{\prime j}, \frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \right) \pm \left(W(u,r_{U}^{\prime}/B) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left(ur_{Ui}^{\prime j}, \frac{\rho_{Ui}^{j}}{B}\right) \right) \right\},$$

$$K'_{0}(\beta) = \left\{ \left(K_{0}(\beta) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\beta\sqrt{r_{i}^{\prime j}}\right) \right) \pm \left(K_{0}(\beta r_{U}^{\prime}) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\beta\sqrt{r_{Ui}^{\prime j}}\right) \right) \right\};$$

$$r_i^{\prime j} = (\rho_i^j / r)^2$$
, $r_{Ui}^{\prime j} = (\rho_{Ui}^j / r)^2$, $r_U^{\prime} = r_U / r$;

график строится для заданного параметра перетекания, и, проводимость и пьезопроводность водоносного пласта определяются графоаналитическим методом, а параметр перетекания – подбором при построении эталонной кривой.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,. \tag{9.5.62}$$

Подбор пьезопроводности и параметра перетекания осуществляется способом биссектрисы; f_1 , f_2 — выражение в фигурных скобках правой части уравнений (9.5.51), (9.5.55) или (9.5.59) соответственно для первой и второй наблюдательных скважин.

Точечные способы

1. Определение проводимости по понижению на период стационара при заданном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} f, \qquad (9.5.63)$$

где f – выражение в фигурных скобках правой части уравнений (9.5.52), (9.5.53), (9.5.56), (9.5.57), (9.5.60) или (9.5.61).

Определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине при заданном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} f, \qquad (9.5.64)$$

где f – выражение в фигурных скобках правой части уравнения (9.5.54) или (9.5.58).

3. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{f_1}{f_2},\tag{9.5.65}$$

где f_1 , f_2 — выражение в фигурных скобках правой части уравнения (9.5.52), (9.5.53), (9.5.56), (9.5.57), (9.5.60) или (9.5.61) соответственно для первой и второй наблюдательных скважин.

Подбор параметров

Таблица 9.5.8

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.5.51, 9.5.55, 9.5.59	T, a, B	$s-\lg t$
9.5.62	a, B	$s_1/s_2 - \lg t$

9.6. Круговой пласт с перетеканием

Водоносный комплекс с перетеканием ограничен в плане круговой границей обеспеченного питания или непроницаемой границей. В зависимости от изменения в процессе опробования напора в смежном водоносном пласте, из которого происходит перетекание, решаются две задачи:

- напор в смежном водоносном пласте остается постоянным (нулевое понижение);
- 2) напор в смежном водоносном пласте меняется в процессе опробования.

9.6.1. Перетекание из водоносного пласта с постоянным напором

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых слоев;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой, уровень в котором не меняется в процессе опробования;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс ограничен в плане круговой границей обеспеченного питания или непроницаемой границей;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;
- поток в слабопроницаемых слоях вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемых слоях не учитывается;
- здесь можно рассматривать любое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев, которые показаны в разделе 9.1 на рис. 9.1 и 9.3.

Рассматривается два варианта граничных условий (рис. 9.41):

вариант 1: водоносный комплекс ограничен круговой границей обеспеченного питания (условие I рода);

вариант 2: водоносный комплекс ограничен круговой непроницаемой границей (условие II рода).

Условные обозначения:

a – пьезопроводность основного водоносного пласта, м²/сут;

$$B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}$$
 – параметр перетекания: см. уравнения (9.1.2) и (9.1.3), м;

 $I_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $I_1(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 $I_m(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода *m*-го порядка (Приложение 19);

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $J_1(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 $J_m(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода *m*-го порядка (Приложение 21);

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_1(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 $K_m(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода *m*-го порядка (Приложение 22);

k – коэффициент фильтрации основного водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;

 L_{pc} — горизонтальное расстояние от центра водоносного пласта до наблюдательной скважины, м;

 $L_{wc}\,$ – горизонтальное расстояние от центра водоносного пласта до опытной скважины, м;

m — номер порядка функции Бесселя и номер суммы; мощность основного водоносного пласта, м;

m' – мощность разделяющего слоя, м;

n — номер корня и номер суммы;

Q – расход опытной скважины (переменная величина при откачке с постоянным понижением), м³/сут;

R — радиус кругового пласта, м;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_{w} – радиус опытной скважины, м;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_b — понижение на границе на период стационара, м;

 s_m – понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;

 $s_{m,1}, s_{m,2}$ — понижения на период стационара в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_{mw} — понижение в опытной скважине на период стационара, м;

 s_{w} – понижение в опытной скважине на период стационара, м;

T = km — проводимость основного водоносного пласта, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 x_n – корни уравнения $J_0(x_n) = 0$ (Приложение 33);

 $x_{n,1}$ – корни уравнения $J_1(x_{n,1}) = 0$ (Приложение 33);

 x_{nm} – корни уравнения $J_m(x_{nm}) = 0$ (Приложение 34);

 $Y_0(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $Y_1(\beta)$ – функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);

 y_{nm} – корни уравнения $J'_m(y_{nm}) = 0$; $J'_m(\beta) = J_{m-1}(\beta) - \frac{2}{\beta}J_m(\beta)$;

 β – аргумент функций;

 ΔH – разность напоров на начальный момент времени в основном пласте и в разделяющем слое, м;

 θ – угол между направлениями от центра водоносного пласта до опытной скважины и до наблюдательной, градус;

$$\varsigma_n$$
 – корни уравнения $J_0(\varsigma_n)Y_0\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right) - J_0\left(\varsigma_n\frac{R}{r_w}\right)Y_0(\varsigma_n) = 0$ (Приложение 35).

$$\xi_n$$
 – корни уравнения $J_0(\xi_n)Y_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right) - J_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right)Y_0(\xi_n) = 0$ (Приложение 39).

9.6.1.1. Круговой пласт с перетеканием: граница I рода

<u>Литература:</u> Jacob, 1946b; Hantush, 1959b; Hantush, Jacob, 1960; Бочевер, Веригин, 1961; De Wiest, 1961.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (9.6.1) и (9.6.2);
- понижение для нестационарного периода для разных начальных напоров в основном пласте и в разделяющем слое: уравнение (9.6.3);
- понижение на период стационара: уравнения (9.6.4) и (9.6.5);
- понижение на период стационара в опытной скважине: уравнения (9.6.6) и (9.6.7).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

1. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина находится в центре кругового пласта (рис. 9.41, a, δ),

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) - K_0 \left(\frac{R}{B} \right) \frac{I_0 \left(\frac{r}{B} \right)}{I_0 \left(\frac{R}{B} \right)} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left(x_n \frac{r}{R} \right) \exp \left[-\left(x_n^2 + \frac{R^2}{B^2} \right) \frac{at}{R^2} \right]}{J_1^2 \left(x_n \left(\frac{r}{B} \right)^2 \right)} \right]. \tag{9.6.1}$$

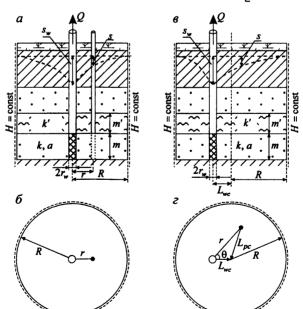


Рис. 9.41. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием (уровень в смежном пласте не меняется в процессе опробования), ограниченного круговой границей обеспеченного питания.

a, b – разрез и план при расположении опытной скважины в центре кругового пласта; b, c – разрез и план при смещении опытной скважины от центра кругового пласта.

2. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина смещена от центра кругового пласта (рис. 9.41, θ , ε),

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} K_0 \left(\frac{R}{B}\right) I_0 \left(\frac{L_{wc}}{B}\right) I_0 \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) - I_0 \left(\frac{R}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) - I_m \left(\frac{R}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) - I_m \left(\frac{R}{B}\right) I_m \left(\frac{R}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) - I_m \left(\frac{R}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{p$$

3. Решение для понижения в наблюдательной скважине, когда начальные уровни в основном хорошо проницаемом водоносном пласте и в слабопроницаемом слое отличаются на величину ΔΗ [De Wiest, 1961]; опытная скважина находится в центре кругового пласта (рис. 9.41, a, 6):

$$s = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{Q}{\pi T} + 2\Delta H x_n J_1(x_n) \right) \frac{J_0\left(x_n \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(x_n) \left[x_n^2 + \left(\frac{R}{B}\right)^2\right]} + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{Q}{\pi T} + \frac{2\Delta H R^2 J_1(x_n)}{B^2 x_n} \right) \frac{J_0\left(x_n \frac{r}{R}\right) \exp\left[-\left(x_n^2 + \frac{R^2}{B^2}\right) \frac{at}{R^2}\right]}{J_1^2(x_n) \left[x_n^2 + \left(\frac{R}{B}\right)^2\right]} \end{cases}$$
(9.6.3)

Уравнение (9.6.1) является частным случаем уравнения (9.6.3).

Уравнения стационарного периода

1. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина находится в центре кругового пласта (рис. 9.41, a, δ),

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) - K_0 \left(\frac{R}{B} \right) I_0 \left(\frac{r}{B} \right) \middle/ I_0 \left(\frac{R}{B} \right) \right]. \tag{9.6.4}$$

2. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина смещена от центра кругового пласта (рис. 9.41, e, e),

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_{0} \left(\frac{r}{B} \right) - \frac{K_{0} \left(\frac{R}{B} \right) I_{0} \left(\frac{L_{wc}}{B} \right) I_{0} \left(\frac{L_{pc}}{B} \right)}{I_{0} \left(\frac{R}{B} \right)} - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_{m} \left(\frac{R}{B} \right) I_{m} \left(\frac{L_{wc}}{B} \right) I_{m} \left(\frac{L_{pc}}{B} \right)}{I_{m} \left(\frac{R}{B} \right)} \cos(m\theta) \right]. (9.6.5)$$

Частные случаи для стационарного периода

1. Понижение в опытной скважине, расположенной в центре кругового пласта (рис. 9.41, a, 6),

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r_w}{B} \right) - \frac{K_0 \left(\frac{R}{B} \right)}{I_0 \left(\frac{R}{B} \right)} \right]. \tag{9.6.6}$$

2. Понижение в опытной скважине, смещенной от центра кругового пласта (рис. $9.41, s, \varepsilon$),

$$s_{mw} = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r_w}{B} \right) - \frac{K_0 \left(\frac{R}{B} \right) I_0^2 \left(\frac{L_{wc}}{B} \right)}{I_0 \left(\frac{R}{B} \right)} - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_m \left(\frac{R}{B} \right) I_m^2 \left(\frac{L_{wc}}{B} \right)}{I_m \left(\frac{R}{B} \right)} \right]. \tag{9.6.7}$$

Способы обработки откачки

Точечные способы

- 1. Опытная скважина находится в центре кругового пласта; определение проводимости по понижению на период стационара при заданном параметре перетекания
 - по понижению в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) - I_0 \left(\frac{r}{B} \right) K_0 \left(\frac{R}{B} \right) \middle/ I_0 \left(\frac{R}{B} \right) \right]; \tag{9.6.8}$$

- по понижению в опытной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \left[K_0 \left(\frac{r_w}{B} \right) - K_0 \left(\frac{R}{B} \right) \middle/ I_0 \left(\frac{R}{B} \right) \right]. \tag{9.6.9}$$

Опытная скважина находится в центре кругового пласта; определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{K_0 \left(\frac{r_1}{B}\right) - I_0 \left(\frac{r_1}{B}\right) K_0 \left(\frac{R}{B}\right) / I_0 \left(\frac{R}{B}\right)}{K_0 \left(\frac{r_2}{B}\right) - I_0 \left(\frac{r_2}{B}\right) K_0 \left(\frac{R}{B}\right) / I_0 \left(\frac{R}{B}\right)}.$$

$$(9.6.10)$$

Опытная скважина смещена от центра кругового пласта; определение проводимости по понижению на период стационара в опытной скважине при заданном параметре перетекания:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{mw}} \left[K_0 \left(\frac{r_w}{B} \right) - K_0 \left(\frac{R}{B} \right) I_0^2 \left(\frac{L_{wc}}{B} \right) / I_0 \left(\frac{R}{B} \right) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} K_m \left(\frac{R}{B} \right) I_m^2 \left(\frac{L_{wc}}{B} \right) / I_m \left(\frac{R}{B} \right) \right]. (9.6.11)$$

Подбор параметров

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Таблица 9.6.1

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.1, 9.6.2, 9.6.3	T, a, B	$s - \lg t$
9.6.4	T, B	$s_m - \lg r$

Откачка с постоянным понижением

Базовые аналитические зависимости

Решения даны для случая, когда опытная скважина находится в центре кругового пласта (см. рис. 9.41, a, 6).

Решения для понижения

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1959b]

$$s = s_{w} \left\{ \frac{K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right)/I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)} + \frac{1}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)}{\left[\varsigma_{n}^{2}J_{0}(\varsigma_{n})J_{0}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)\exp\left[-\left(\varsigma_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right)\frac{at}{r_{w}^{2}}\right]} \times \left[\frac{s_{0}^{2}J_{0}(\varsigma_{n})J_{0}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n}J_{0}-J_{0}^{2}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)J_{0}\left(\varsigma_{n}\frac{r$$

где
$$\varsigma_n$$
 – корни уравнения $J_0(\varsigma_n)Y_0\left(\varsigma_n\frac{R}{r_m}\right)-J_0\left(\varsigma_n\frac{R}{r_m}\right)Y_0(\varsigma_n)=0$.

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = s_{w} \frac{K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right)/I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)}.$$

$$(9.6.13)$$

Решения для расхода

Уравнение нестационарной фильтрации

Расход из опытной скважины

$$Q = 2\pi T s_{w} \left\{ \frac{r_{w}}{B} \frac{K_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) + K_{0}\left(\frac{R}{B}\right) I_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) / I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - K_{0}\left(\frac{R}{B}\right) I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) / I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)} + \frac{2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varsigma_{n}^{2} J_{0}^{2}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right) \exp\left[-\left(\varsigma_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right) \frac{at}{r_{w}^{2}}\right]}{\left[\varsigma_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right] \left[J_{0}^{2}(\varsigma_{n}) - J_{0}^{2}\left(\varsigma_{n} \frac{R}{r_{w}}\right)\right]} \right\}.$$

$$(9.6.14)$$

Способы обработки откачки с постоянным понижением

Точечный способ

Определение подбором параметра перетекания по понижению на период стационара на основе уравнения (9.6.13).

Подбор параметров

Таблица 9.6.2 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.12	a, B	$s - \lg t$
9.6.14	T, a, B	$Q - \lg t$

9.6.1.2. Круговой пласт с перетеканием: граница II рода

<u>Литература:</u> Hantush, 1959b; Hantush, Jacob, 1960; Бочевер, 1963, 1968.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (9.6.15), (9.6.16) и (9.6.25);
- понижение на период стационара: уравнения (9.6.17), (9.6.18) и (9.6.26);
- понижение в опытной скважине на период стационара: уравнение (9.6.19);
- понижение на контуре пласта на период стационара: уравнение (9.6.20);
- расход для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнение (9.6.27).

Откачка с постоянным расходом

& Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

1. Понижение в наблюдательной скважине при нахождении опытной скважины в центре кругового пласта (рис. 9.42, *a*, *б*) [Hantush, Jacob, 1960]

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + I_0 \left(\frac{r}{B} \right) \frac{K_1 \left(\frac{R}{B} \right)}{I_1 \left(\frac{R}{B} \right)} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left(x_{n,1} \frac{r}{R} \right) \exp \left[-\left(x_{n,1}^2 + \frac{R^2}{B^2} \right) \frac{at}{R^2} \right]}{J_0^2 \left(x_{n,1} \left[x_{n,1}^2 + \frac{R^2}{B^2} \right] \right]} \right]. \quad (9.6.15)$$

2. Понижение в наблюдательной скважине при смещении опытной скважины от центра кругового пласта (рис. 9.42, в, г)

Solid inflacts (pac. 9.42, 8, 2)
$$\begin{cases}
K_0 \left(\frac{r}{B}\right) + \frac{K_1 \left(\frac{R}{B}\right) I_0 \left(\frac{L_{wc}}{B}\right) I_0 \left(\frac{L_{pc}}{B}\right)}{I_1 \left(\frac{R}{B}\right)} + \\
+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left[K_{m+1} \left(\frac{R}{B}\right) + K_{m-1} \left(\frac{R}{B}\right)\right] I_m \left(\frac{L_{wc}}{B}\right) I_m \left(\frac{L_{pc}}{B}\right)}{I_{m+1} \left(\frac{R}{B}\right) + I_{m-1} \left(\frac{R}{B}\right)} \cos(m\theta) - \\
- 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left(y_{0n} \frac{L_{wc}}{R}\right) J_0 \left(y_{0n} \frac{L_{pc}}{R}\right)}{\left(y_{0n}^2 + \frac{R^2}{B^2 y_{mn}^2}\right) J_0^2 \left(y_{0n}\right)} \exp\left[-\left(\frac{y_{0n}^2}{R^2} + \frac{1}{B^2}\right) at\right] + \\
+ 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{J_m \left(y_{mn} \frac{L_{wc}}{R}\right) J_m \left(y_{mn} \frac{L_{pc}}{R}\right)}{\left(y_{mn}^2 - n^2 \left(1 + \frac{R^2}{B^2 y_{mn}^2}\right) J_m^2 \left(y_{mn}\right)} \times \cos(n\theta) \exp\left[-\left(\frac{y_{mn}^2}{R^2} + \frac{1}{B^2}\right) at\right]\right]
\end{cases}$$
(9.6.16)

Уравнения стационарного периода

1. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина находится в центре кругового пласта (рис. 9.42, a, δ),

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left| K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + I_0 \left(\frac{r}{B} \right) K_1 \left(\frac{R}{B} \right) \middle/ I_1 \left(\frac{R}{B} \right) \right|. \tag{9.6.17}$$

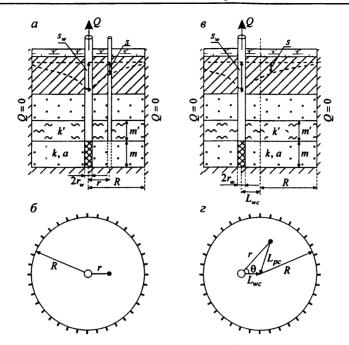


Рис. 9.42. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием (уровень в смежном пласте не меняется в процессе опробования), ограниченного круговой непроницаемой границей.

7. 6 — разрез и план при расположении опытной скражины в центре кругового пласта: 6.2. — разрез и план при

a, b — разрез и план при расположении опытной скважины в центре кругового пласта; a, c — разрез и план при смещении опытной скважины от центра кругового пласта.

2. Понижение в наблюдательной скважине, если опытная скважина смещена от центра кругового пласта (рис. 9.42, в, г),

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{bmatrix} K_{0} \left(\frac{r}{B}\right) + K_{1} \left(\frac{R}{B}\right) I_{0} \left(\frac{L_{wc}}{B}\right) I_{0} \left(\frac{L_{pc}}{B}\right) / I_{1} \left(\frac{R}{B}\right) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left[K_{m+1} \left(\frac{R}{B}\right) + K_{m-1} \left(\frac{R}{B}\right)\right] I_{m} \left(\frac{L_{wc}}{B}\right) I_{m} \left(\frac{L_{pc}}{B}\right)}{I_{m+1} \left(\frac{R}{B}\right) + I_{m-1} \left(\frac{R}{B}\right)} \cos(m\theta) \end{bmatrix}.$$
 (9.6.18)

Частные случаи для стационарного периода (опытная скважина находится в центре кругового пласта)

1. Понижение в опытной скважине

$$s_{mw} \approx \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{1.123B}{r_w} + K_1 \left(\frac{R}{B} \right) / I_1 \left(\frac{R}{B} \right) \right]. \tag{9.6.19}$$

2. Понижение на контуре пласта (r = R)

$$s_b = \frac{Q}{2\pi T} \frac{R/B}{I_1(R/B)},\tag{9.6.20}$$

***** Способы обработки откачки

Точечные способы

Способы даны для случая, когда опытная скважина расположена в центре кругового пласта

- 1. Определение проводимости по понижению на период стационара
 - в наблюдательной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m} \left[K_0 \left(\frac{r}{B} \right) + I_0 \left(\frac{r}{B} \right) K_1 \left(\frac{R}{B} \right) \middle/ I_1 \left(\frac{R}{B} \right) \right]; \tag{9.6.21}$$

в опытной скважине:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{w}} \left[\ln \frac{1.123B}{r_{w}} + K_{1} \left(\frac{R}{B} \right) / I_{1} \left(\frac{R}{B} \right) \right]; \tag{9.6.22}$$

на контуре кругового пласта:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_b} \frac{R/B}{I_1(R/B)}. (9.6.23)$$

2. Определение подбором параметра перетекания по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах на период стационара:

$$\frac{s_{m,1}}{s_{m,2}} = \frac{K_0\left(\frac{r_1}{B}\right) + I_0\left(\frac{r_1}{B}\right)K_1\left(\frac{R}{B}\right) / I_1\left(\frac{R}{B}\right)}{K_0\left(\frac{r_2}{B}\right) + I_0\left(\frac{r_2}{B}\right)K_1\left(\frac{R}{B}\right) / I_1\left(\frac{R}{B}\right)}.$$

$$(9.6.24)$$

Подбор параметров

Таблица 9.6.3 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.15, 9.6.16	T, a, B	$s - \lg t$
9.6.17	<i>T</i> , <i>B</i>	$s_m - \lg r$

Откачка с постоянным понижением

Базовые аналитические зависимости

Решения даны для случая, когда опытная скважина находится в центре кругового пласта (рис. 9.42, a, δ).

Решения для понижения

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1959b]

$$s = s_{w} \left\{ \begin{cases} \frac{K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) + K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)} + \\ + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\xi_{n}^{2}J_{1}^{2}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right) \exp\left[-\left(\xi_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right)\frac{at}{r_{w}^{2}}\right]}{\left[\xi_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right]J_{0}^{2}(\xi_{n}) - J_{1}^{2}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)\right]} \times \left[\int_{0}^{\infty} \left(\xi_{n}\frac{r}{r_{w}}\right)Y_{0}(\xi_{n}) - J_{0}(\xi_{n})Y_{0}\left(\xi_{n}\frac{r}{r_{w}}\right)\right] \right] \right\}$$

$$(9.6.25)$$

где ξ_n – корни уравнения $J_0(\xi_n)Y_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right)-J_1\left(\xi_n\frac{R}{r_w}\right)Y_0(\xi_n)=0$.

Уравнение стационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s_{m} = s_{w} \frac{K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) + K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}.$$

$$(9.6.26)$$

Решение для расхода

Уравнение нестационарной фильтрации

Расход из опытной скважины

$$Q = 2\pi T s_{w} \begin{cases} \frac{r_{w}}{B} \frac{K_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) - K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{1}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}{K_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right) + K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)I_{0}\left(\frac{r_{w}}{B}\right)/I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)} + \\ + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi_{n}^{2}J_{1}^{2}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right) \exp\left[-\left(\xi_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right)\frac{at}{r_{w}^{2}}\right]}{\left[\xi_{n}^{2} + \left(\frac{r_{w}}{B}\right)^{2}\right]\left[J_{0}^{2}(\xi_{n}) - J_{1}^{2}\left(\xi_{n}\frac{R}{r_{w}}\right)\right]} \end{cases}$$
(9.6.27)

Способы обработки откачки с постоянным понижением

Точечный способ

Определение подбором параметра перетекания по понижению на период стационара на основе уравнения (9.6.26).

Подбор параметров

Таблица 9.6.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.25	a, B	$s - \lg t$
. 9.6.27	T, a, B	$Q - \lg t$

9.6.2. Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из трех слоев два хорошо проницаемых пласта разделены слабопроницаемым слоем;
- основной водоносный пласт: хорошо проницаемый слой (пласт 2), в котором находится опытная скважина;
- смежный водоносный пласт: хорошо проницаемый слой (пласт 1), в котором отсутствует опытная скважина; при откачке из двух водоносных пластов смежный пласт находится сверху;
- начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;
- разделяющий слой: слабопроницаемый, через который происходит перетекание;
- граница: водоносный комплекс ограничен в плане круговой границей обеспеченного питания или непроницаемой границей;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в центре кругового пласта; емкость скважины не учитывается;
- понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в хорошо проницаемых пластах;
- поток в слабопроницаемом слое вертикальный;
- упругий режим в слабопроницаемом слое не учитывается;
- здесь можно рассматривать любое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев, которые показаны в разделе 9.1.2 на рис. 9.3.

Рассматривается два варианта граничных условий:

вариант 1: водоносный комплекс ограничен круговой границей обеспеченного питания (условие I рода) (рис. 9.43);

вариант 2: водоносный комплекс ограничен круговой непроницаемой границей (условие II рода) (рис. 9.44).

Условные обозначения:

a — пьезопроводность основного и смежного водоносных пластов при одинаковых фильтрационных свойствах, м²/сут;

 a_1, a_2 — пьезопроводности смежного и основного водоносных пластов, м²/сут;

 $B = \sqrt{Tm'/k'}$ – параметр перетекания, м;

 $B_1 = \sqrt{T_1 m' / k'}$ — параметр, характеризующий перетекание в 1-й пласт, м;

 $B_2 = \sqrt{T_2 m'/k'}$ — параметр, характеризующий перетекание во 2-й пласт, м;

```
B^* = \sqrt{T^*m'/k'} — обобщенный параметр перетекания, м;
I_0(\beta) — модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка;
I_1(\beta) – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка;
J_0(\beta) -функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
J_1(\beta) – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
K_0(\beta) — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);
K_1(\beta) – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка (Приложение 2);
k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации смежного и основного водоносных пластов, м/сут;
k' – коэффициент фильтрации разделяющего слоя, м/сут;
m_1, m_2 — мощности смежного и основного водоносных пластов, м;
m' — мощность разделяющего слоя, м;
n — номер корня и номер суммы;
Q – расход опытной скважины при откачке из основного водоносного пласта, м<sup>3</sup>/сут;
Q_1, Q_2\, – расходы опытной скважины при одновременной откачке из основного и смежного
водоносных пластов, м<sup>3</sup>/сут;
R – радиус кругового пласта (расстояние от центра опытной скважины до границы), м;
r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;
r_1, r_2 – горизонтальные расстояния от опытной скважины до первой и второй
наблюдательных скважин смежного водоносного пласта, м;
s - понижение в наблюдательной скважине, расположенной в основном или смежном
водоносном пласте, м;
s^{(1)}, s^{(2)} – понижения в наблюдательных скважинах, расположенных в смежном и основном
водоносных пластах, м;
s_m^{(1)}, s_m^{(2)} – понижения в наблюдательных скважинах, расположенных в смежном и основном
водоносных пластах, на период стационара, м;
s_{m,1}^{(1)}, s_{m,2}^{(1)} — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, расположенных в
смежном пласте, на период стационара, м;
T – проводимость основного и смежного водоносных пластов при одинаковых
фильтрационных свойствах, M^2/\text{сут};
T_1 = k_1 m_1, T_2 = k_2 m_2 – проводимости смежного и основного водоносных пластов, м<sup>2</sup>/сут;
T^* = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} — обобщенный параметр проводимости, м²/сут;
t — время от начала откачки, сут;
x_n – корни уравнения J_0(x_n) = 0 (Приложение 33);
x_{n,1} – корни уравнения J_1(x_{n,1}) = 0 (Приложение 33);
\beta – аргумент функций;
\delta_n – определяется уравнением (9.6.30);
```

 ε_{n} – определяется уравнением (9.6.31); λ_n – определяется уравнением (9.6.29);

± - знак, который зависит от расположения наблюдательной скважины.

502 Раздел 9.

9.6.2.1. Круговой пласт с перетеканием: граница І рода

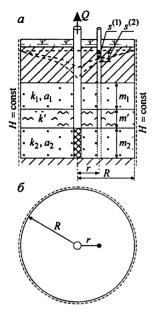


Рис. 9.43. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием (уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования), ограниченного круговой границей обеспеченного питания. a – разрез; δ – план.

<u>Литература:</u> Hantush, 1967с.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода в смежном водоносном пласте: уравнение (9.6.28);
- понижение для нестационарного периода в основном водоносном пласте: уравнение (9.6.32);
- понижение на период стационара в смежном водоносном пласте: уравнение (9.6.33);
- понижение на период стационара в основном водоносном пласте: уравнение (9.6.34).

Откачка с постоянным расходом

 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в смежном водоносном пласте,

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} \begin{cases} \ln \frac{R}{r} - K_0 \left(\frac{r}{B^*}\right) - K_0 \left(\frac{R}{B^*}\right) I_0 \left(\frac{r}{B^*}\right) / I_0 \left(\frac{R}{B^*}\right) - \\ -2 \frac{a_2 R^2}{a_1 B^{*2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_n} \left(\frac{1}{\varepsilon_n} \exp\left(-\varepsilon_n \frac{a_1 t}{R^2}\right) - \frac{1}{J_1^2(x_n)} \right) J_0 \left(x_n \frac{r}{R}\right) \right] \end{cases}, \quad (9.6.28)$$

где

$$\lambda_n = \sqrt{\left[\left(1 - \frac{a_2}{a_1}\right)x_n^2 + \frac{R^2}{B_1^2} - \frac{a_2R^2}{a_1B_2^2}\right]^2 + 4\frac{a_2R^4}{a_1B_1^2B_2^2}},$$
 (9.6.29)

$$\delta_n = 0.5 \left[\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) x_n^2 + \frac{R^2}{B_1^2} + \frac{R^2}{B_2^2} + \lambda_n \right], \tag{9.6.30}$$

$$\varepsilon_n = 0.5 \left[\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) x_n^2 + \frac{R^2}{B_1^2} + \frac{R^2}{B_2^2} - \lambda_n \right]. \tag{9.6.31}$$

2. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в основном водоносном пласте

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} \left\{ -\frac{2a_2R^2}{a_1B^{*2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_n} \left(\frac{r}{B^*} \right) - K_0 \left(\frac{R}{B^*} \right) I_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) / I_0 \left(\frac{R}{B^*} \right) \right] - \frac{2a_2R^2}{a_1B^{*2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_n} \left(\frac{1}{\varepsilon_n} \exp\left(-\varepsilon_n \frac{a_1t}{R^2} \right) - \frac{1}{J_1^2(x_n)} \right) - \frac{1}{J_1^2(x_n)} \right] - \frac{2a_2B_1^2}{a_1B^{*2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_n} \left(\left(1 - \frac{x_n^2}{\delta_n} \right) \exp\left(-\delta_n \frac{a_1t}{R^2} \right) - \frac{1}{J_1^2(x_n)} \right) - \frac{1}{J_1^2(x_n)} \right] \right\}.$$
(9.6.32)

Уравнения стационарного периода

Понижения в наблюдательных скважинах, расположенных в смежном и основном водоносных пластах,

$$s_{m}^{(1)} = \frac{Q}{2\pi(T_{1} + T_{2})} \left\{ \ln \frac{R}{r} - K_{0} \left(\frac{r}{B^{*}} \right) - K_{0} \left(\frac{R}{B^{*}} \right) I_{0} \left(\frac{r}{B^{*}} \right) \middle/ I_{0} \left(\frac{R}{B^{*}} \right) \right\}, \qquad (9.6.33)$$

$$s_{m}^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_{1} + T_{2})} \left\{ \ln \frac{R}{r} + \frac{T_{1}}{T_{2}} \left[K_{0} \left(\frac{r}{B^{*}} \right) - K_{0} \left(\frac{R}{B^{*}} \right) I_{0} \left(\frac{r}{B^{*}} \right) \middle/ I_{0} \left(\frac{R}{B^{*}} \right) \right] \right\}. \tag{9.6.34}$$

Замечание

Решения для откачки из обоих пластов рассмотрены в работах [Salem, Jacob, 1973, 1974].

Способы обработки откачки

Точечные способы

1. Определение суммарной проводимости ($T_1 + T_2$) по понижению в смежном водоносном пласте на период стационара при известных параметрах перетекания B_1 и B_2 на основе уравнения (9.6.33):

$$T_1 + T_2 = \frac{Q}{2\pi s_m^{(1)}} \left[\ln \frac{R}{r} - K_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) - I_0 \left(\frac{r}{B^*} \right) K_0 \left(\frac{R}{B^*} \right) / I_0 \left(\frac{R}{B^*} \right) \right]. \tag{9.6.35}$$

2. Определение подбором обобщенного параметра перетекания (B^*) по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах смежного водоносного пласта на период стационара на основе уравнения (9.6.33):

$$\frac{s_{m,1}^{(1)}}{s_{m,2}^{(1)}} = \frac{\ln\frac{R}{r_1} - K_0\left(\frac{r_1}{B^*}\right) - I_0\left(\frac{r_1}{B^*}\right) K_0\left(\frac{R}{B^*}\right) / I_0\left(\frac{R}{B^*}\right)}{\ln\frac{R}{r_2} - K_0\left(\frac{r_2}{B^*}\right) - I_0\left(\frac{r_2}{B^*}\right) K_0\left(\frac{R}{B^*}\right) / I_0\left(\frac{R}{B^*}\right)}.$$
(9.6.36)

Подбор параметров

Таблица 9.6.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.28	$- T_1, T_2, a_1, a_2, B_1, B_2$	$s^{(1)} - \lg t$
9.6.32		$s^{(2)} - \lg t$
9.6.33	T_1, T_2, B_1, B_2	$s_m^{(1)} - \lg r$
9.6.34	$\begin{bmatrix} 1_1, 1_2, D_1, D_2 \end{bmatrix}$	$s_m^{(2)} - \lg r$

9.6.2.2. Круговой пласт с перетеканием: граница II рода

Литература: Бочевер, 1968.

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение при опробовании одного водоносного пласта: уравнение (9.6.37);
- понижение при одновременном опробовании обоих водоносных пластов: уравнение (9.6.38).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Решения даны для частного случая: фильтрационные свойства водоносных пластов равны.

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Понижение в основном или смежном водоносном пласте при откачке из основного водоносного пласта

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} 2\frac{at}{R^{2}} - \ln\frac{r}{R} - \frac{2}{3} + \frac{r}{2R} - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{0}\left(x_{n,1}\frac{r}{R}\right) \exp\left(-x_{n,1}^{2}\frac{at}{R^{2}}\right)}{x_{n,1}^{2}J_{0}^{2}\left(x_{n,1}\right)} \end{bmatrix} \pm \\ \frac{1}{s} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + I_{0}\left(\frac{R}{B}\right)\frac{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}{I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)} + 2\frac{B^{2}}{R^{2}} \exp\left(-\frac{at}{B^{2}}\right) - \\ \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{0}\left(x_{n}\frac{r}{R}\right) \exp\left[\left(-\left(\frac{x_{n}}{R}\right)^{2} - \frac{1}{B^{2}}\right)at\right]}{J_{0}^{2}\left(x_{n}\right)\left[x_{n}^{2} + \left(\frac{R}{B}\right)^{2}\right]} \end{cases}$$
(9.6.37)

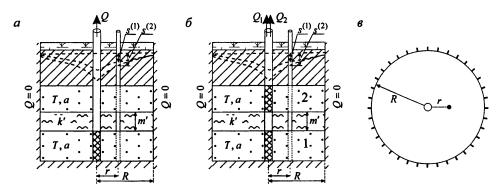


Рис. 9.44. Типовая схема водоносного комплекса с перетеквнием (уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования), ограниченного круговой непроницаемой границей.

a — разрез при опробовании одного пласта, δ — обоих пластов; s — план. Цифрами показаны номера пластов.

2. Понижение в основном или смежном водоносном пласте при одновременной откачке из обоих водоносных пластов

$$s = \begin{cases} \frac{Q_{1} + Q_{2}}{4\pi T} \left[2\frac{at}{R^{2}} - \ln\frac{r}{R} - \frac{2}{3} + \frac{r}{2R} - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{0}\left(x_{n,1}\frac{r}{R}\right) \exp\left(-x_{n,1}^{2}\frac{at}{R^{2}}\right)}{x_{n,1}^{2}J_{0}^{2}\left(x_{n,1}\right)} \right] \pm \\ \frac{1}{2\pi I_{0}} \left[K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + I_{0}\left(\frac{R}{B}\right) \frac{K_{1}\left(\frac{R}{B}\right)}{I_{1}\left(\frac{R}{B}\right)} + 2\frac{B^{2}}{R^{2}} \exp\left(-\frac{at}{B^{2}}\right) - \frac{1}{B^{2}} \exp\left(-\frac{at}{B^{2}}\right) - \frac{1}{B$$

где « \pm » — знак «+» ставится при определении понижения в наблюдательной скважине, расположенной в основном пласте ($s=s^{(1)}$), а знак «-» — при определении понижения в наблюдательной скважине, расположенной в смежном пласте ($s=s^{(2)}$).

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 9.6.6

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
9.6.37, 9.6.38	T, a, B	$s - \lg t$

РАЗДЕЛ 10. НАКЛОННЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ

Рассматриваются напорные и безнапорные водоносные пласты переменной мощности или пласты с наклонным залеганием подошвы.

<u>Литература:</u> Hantush, 1962a-d, 1964a, c; Пыхачев, Исаев, 1973; Kruseman, Ridder, 1994.

Условные обозначения:

 $A(u, \beta)$ – специальная функция (Приложение 1);

 $a = km_w / S$ — пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

$$a = \frac{k(m - s_w)}{S + S_v}$$
 — уровнепроводность водоносного пласта, м²/сут;

 a_s — геометрический параметр, определяющий экспоненциальное изменение мощности пласта: определяется равенством (10.1.2), м;

В – параметр перетекания: определяется уравнением (10.3.3), м;

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

E — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $E(u,\beta,\beta_2)$ — специальная функция для откачки с постоянным понижением в наклонном водоносном пласте: определяется уравнением (10.1.20);

 $\operatorname{erfc} u$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $F(U_x, U_y, U_a, t)$ – специальная функция: определяется уравнениями (10.1.33) и (10.1.37);

 $f_S^I(r,\theta,\rho,t)$ — функция, учитывающая границу І рода: определяется уравнением (10.1.25);

 $f_S^{II}(r,\theta,\rho,t)$ — функция, учитывающая границу II рода: определяется уравнением (10.1.32);

 $f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t)$ — функция, учитывающая границу І рода в безнапорном потоке: определяется уравнением (10.2.15);

 $G(u, \beta)$ – специальная функция (Приложение 16);

 $J_0(u)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k - коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

k' – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, м/сут;

 $L_{p}\,$ – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от опытной скважины до границы, м;

m – начальная обводненная мощность безнапорного водоносного пласта, м;

m' - мощность слабопроницаемого слоя, м;

 $m_p\,$ – мощность водоносного пласта в точке расположения наблюдательной скважины, м;

 $m_{\rm w}$ – мощность водоносного пласта в точке расположения опытной скважины, м;

 m_x — мощность водоносного пласта в любой точке с координатой по оси абсцисс (x): определяется равенством (10.1.1), м;

n — знак под экспонентой в уравнениях безнапорного водоносного пласта, см. уравнения (10.2.15) и (10.3.11);

Q — расход опытной скважины (переменная величина при откачке с постоянным понижением), м 3 /сут;

 Q_1, Q_2 – расходы опытной скважины на два момента времени при откачке с постоянным понижением, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_0 — расстояние от опытной скважины (по оси x в сторону увеличения мощности) до отметки, достижение которой радиусом влияния ограничивает применение представленных аналитических решений: определяется уравнением (10.1.6), м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

 r_w — радиус опытной скважины, м;

$$r' = (\rho/r)^2;$$

S – упругая водоотдача водоносного пласта;

 S_{ν} – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_0 — понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;

 $s_1, \, s_2\,$ – понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;

 s_{m} — понижение на период стационара в наблюдательной скважине, м;

 s_p — понижение в точке изгиба, для графика временного прослеживания: определяется равенством (10.1.12), м;

 $s_r = (s_0 - s)$ — восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;

 $s_{r,1}, s_{r,2}$ — восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки, м;

 s_w – понижение в опытной скважине, м;

$$s' = s - \frac{s^2}{2m}$$
 — приведенное понижение для безнапорного пласта, м;

 s_1', s_2' – понижения в первой и второй наблюдательных скважинах для безнапорного пласта, м;

$$s'_{m} = s_{m} - \frac{s_{m}^{2}}{2m}$$
 — приведенное понижение на период стационара для безнапорного пласта, м;

 s_r' — приведенное восстановление в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня в этой скважине на конец откачки для безнапорного пласта, м;

 $s'_{r,1}, s'_{r,2}$ — приведенные восстановления в первой и второй наблюдательных скважинах, отсчитанные от уровней в этих скважинах на конец откачки для безнапорного пласта, м; t — время от начала откачки, сут;

 t_0 — длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 — время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 $t_p\,$ – время, соответствующее точке изгиба, для графика временного прослеживания, м;

 t_r — время от начала восстановления, сут;

 U_x, U_y, U_a — безразмерные параметры и аргументы функции $F(U_x, U_y, U_a, t)$: определяются равенствами (10.1.34) — (10.1.36);

u – аргумент функций;

 u_{p} — аргумент функции в точке изгиба;

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

 $W'(u,\beta)$ — вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

x — координата по оси абсцисс, м;

 x_p, y_p — координаты расположения наблюдательной скважины, м;

 x_w , y_w — координаты расположения опытной скважины, м;

 $Y_0(oldsymbol{eta})$ – функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 β , β_2 – аргументы функций;

 γ – определяется уравнением (10.2.2), м;

 γ' – определяется уравнением (10.3.2), м;

 Δm — изменение мощности пласта на определенное расстояние по оси абсцисс, м;

 Δs_p — угол наклона на единичный логарифмический цикл в точке изгиба, для графика временного прослеживания: определяется равенством (10.1.13), м;

 Δx — расстояние по оси абсцисс, на которое определяется изменение мощности, м;

 θ — угол между осью x и линией, соединяющей опытную скважину и наблюдательную: определяется равенством (10.1.3), градус;

 θ_1, θ_2 — углы между осью x и линиями, соединяющими опытную и первую наблюдательную скважины и опытную и вторую наблюдательную скважины, градус;

 θ_{S} – наклон зеркала грунтовых вод и подошвы водоносного пласта, градус;

ho — расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной: определяется уравнением (10.1.4), м;

 ρ_1 , ρ_2 – расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до фиктивной, м.

10.1. Напорный водоносный пласт переменной мощности

Схема проведения опыта:

- кровля и подошва водоносного пласта перекрыты абсолютными (полностью непроницаемыми) водоупорами;
- уровень подземных вод не опускается ниже кровли пласта;
- опытная и наблюдательная скважины совершенны по степени вскрытия;
- водоносный пласт имеет переменную мощность по оси x и постоянную мощность (но для каждой точки на оси абсцисс разную) по оси y;
- мощность уменьшается по экспоненциальному закону в направлении оси x (рис. 10.1).

Определение геометрических параметров

1. Функция изменения мощности водоносного пласта. Предполагается, что мощность пласта в направлении оси *х* меняется по следующему закону:

$$m_x = m_w \exp\left(-2\frac{x - x_w}{a_s}\right). \tag{10.1.1}$$

Отсюда, зная мощность пласта в точках расположения опытной и наблюдательной скважин, определяется параметр a_s :

$$a_s = \frac{x_w - x_p}{\ln \sqrt{m_p / m_w}} \,. \tag{10.1.2}$$

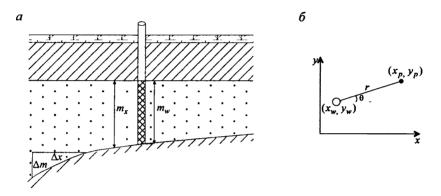


Рис. 10.1. Схема напорного водоносного пласта переменной мощности. *а* – разрез; *б* – план.

2. Угол между опытной и наблюдательной скважинами

$$\theta = \frac{y_w - y_p}{x_w - x_p} \,. \tag{10.1.3}$$

3. Расстояние от наблюдательной скважины до отраженной от границы скважины

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ . \tag{10.1.4}$$

10.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности

Схема проведения опыта:

- общие условия для напорного наклонного водоносного пласта переменной мощности (см. начало раздела 10.1);
- водоносный пласт: неограниченный в плане;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины в сторону уменьшения мощности пласта, в сторону увеличения мощности ограничение определяется уравнением (10.1.7);
- типовая схема: рис. 10.2.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.1.5);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.1.8);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.1.15) и (10.1.16);
- понижение в наблюдательной скважине для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнения (10.1.19) и (10.1.21);
- расход для нестационарного периода при откачке с постоянным понижением: уравнение (10.1.22).

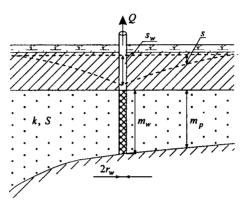


Рис. 10.2. Типовая схема неограниченного в плане напорного пласта переменной мощности (разрез).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi k m_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w t}, \frac{r}{a_s}\right). \tag{10.1.5}$$

Уравнение (10.1.5) справедливо для времени $t < \frac{r_0^2 S}{20 km_w}$, где

$$r_0 = \frac{a_s}{2} \ln \frac{a_s}{10m_w} \,. \tag{10.1.6}$$

Данное ограничение получено исходя из следующего: влияние откачки не должно достигать той части пласта, где тангенс максимального наклона водоупора превышает 0.2 (см. рис. 10.1):

$$\frac{\Delta m}{\Delta x} < 0.2. \tag{10.1.7}$$

Уравнение для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине [Kruseman, Ridder, 1994]

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k m_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) K_0\left(\frac{r}{a_s}\right). \tag{10.1.8}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 10.1.1

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Водоотдача
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$		$Q \exp\left(\frac{r}{a}\cos\theta\right)$	$S = \frac{4km_w}{10^E}$
$\lg s - \lg t$	$\left \frac{\operatorname{ig}''\left(u, \frac{1}{a_s}\right) - \operatorname{ig}\left(\frac{1}{u}\right)}{a_s} \right $	$k = \frac{(a_s)}{4\pi m_w \cdot 10^D}$	$S = \frac{4km_w}{r^2 \cdot 10^E}$

П р и м е ч а н и е . Эталонная кривая строится при заданном отношении r/a_s . Следовательно, если геометрический параметр a_s неизвестен, то с помощью эталонной кривой его можно подобрать.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\exp\left(\frac{r_1}{a_s}\cos\theta_1\right)W\left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{r_1}{a_s}\right)}{\exp\left(\frac{r_2}{a_s}\cos\theta_2\right)W\left(\frac{r_2^2}{4at}, \frac{r_2}{a_s}\right)},$$
(10.1.9)

$$a = km_w / S$$
. (10.1.10)

Подбор пьезопроводности $\,a\,$ осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m_w s_m} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) K_0 \left(\frac{r}{a_s}\right). \tag{10.1.11}$$

<u>Алгоритм определения параметров</u> по точке перегиба P [Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм применяется при достижении стационарного режима откачки (знание параметра a_s необязательно). За основу алгоритма берется утверждение о том, что понижение в точке изгиба

$$s_p = 0.5s_m. (10.1.12)$$

- 1. Строим график $s \lg t$ для наблюдательной скважины.
- 2. На графике определяем значение максимального понижения s_m .
- 3. Из уравнения (10.1.12) определяем понижение в точке изгиба s_p .
- 4. По временной шкале найдем время t_p , соответствующее понижению в точке изгиба.

5. Определим угол наклона на единичный логарифмический цикл:

$$\Delta s_p = \left[\frac{0.183Q}{km_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) \right] \exp\left(-\frac{r}{a_s}\right). \tag{10.1.13}$$

6. Отношение понижения в точке наклона к наклону кривой (10.1.13) равно:

$$2.3 \frac{s_p}{\Delta s_p} = \exp\left(\frac{r}{a_s}\right) K_0 \left(\frac{r}{a_s}\right). \tag{10.1.14}$$

- 7. Из выражения (10.1.14) найдем отношение $\frac{r}{a_s}$ и, следовательно, a_s (Приложение 5).
- 8. Из уравнения (10.1.13) определим коэффициент фильтрации k и проводимость пласта в точке расположения опытной скважины (km_w).
- 9. Из выражения для аргумента функции в точке изгиба $u_p = \frac{r^2 S}{4km_w t_p} = \frac{r}{2a_s}$ найдем водоотдачу пласта S .

Подбор параметров

Таблица 10.1.2

110double napamerph in perconently emble i partition		
Номер уравнения Подбираемые параметры График		
10.1.5	k, S	$s - \lg t$
10.1.0	a	$s_{1}/s_{2} = \log t$

Восстановление уровня

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

- изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s = \frac{Q}{4\pi k m_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w (t_0 + t_r)}, \frac{r}{a_s}\right) - W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w t_r}, \frac{r}{a_s}\right)\right]; \quad (10.1.15)$$

изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi k m_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos\theta\right) \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w t_0}, \frac{r}{a_s}\right) - W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w (t_0 + t_r)}, \frac{r}{a_s}\right) + \\ + W\left(\frac{r^2 S}{4k m_w t_r}, \frac{r}{a_s}\right) \end{bmatrix}$$
(10.1.16)

***** Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

Соответственно для уровней, отсчитанных от начала и окончания откачки,

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\exp\left(\frac{r_1}{a_s}\cos\theta_1\right) \left[W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_1}{a_s}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, \frac{r_1}{a_s}\right)\right]}{\exp\left(\frac{r_2}{a_s}\cos\theta_2\right) \left[W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_2}{a_s}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, \frac{r_2}{a_s}\right)\right]},$$
(10.1.17)

$$\frac{s_{r,1}}{s_{r,2}} = \frac{\exp\left(\frac{r_1}{a_s}\cos\theta_1\right) \left[W\left(\frac{r_1^2}{4at_0}, \frac{r_1}{a_s}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_1}{a_s}\right) + W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, \frac{r_1}{a_s}\right)\right]}{\exp\left(\frac{r_2}{a_s}\cos\theta_2\right) \left[W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}, \frac{r_2}{a_s}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_2}{a_s}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, \frac{r_2}{a_s}\right)\right]}. (10.1.18)$$

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

 Таблица 10.1.3

 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.15	k, S	$s - \lg t_r$
10.1.16	7 ",5	$s_r - \lg t_r$
10.1.17	_	$s_1/s_2 - \lg t_r$
10.1.18		$s_{r,1}/s_{r,2}-\lg t_r$

Откачка с постоянным понижением

Базовые аналитические зависимости

Решения для понижения

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1962c]

$$s = s_w \exp\left(\frac{r - r_w}{a_s} \cos \theta\right) \left[\frac{K_0(r/a_s)}{K_0(r_w/a_s)} + \exp\left(-\frac{at}{a_s^2}\right) E\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \frac{r_w}{a_s}\right)\right], \quad (10.1.19)$$

$$E(u,\beta,\beta_2) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(\tau\beta)Y_0(\tau) - Y_0(\tau\beta)J_0(\tau) \exp(-u\tau^2)}{J_0^2(\tau) + Y_0^2(\tau)} \frac{\tau}{\tau^2 + \beta_2^2} d\tau . \qquad (10.1.20)$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

Для неравенства
$$\frac{r_w}{a_s} < 0.01 \ E\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, 0\right) = A\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}\right) - 1$$
, и уравнение (10.1.19) упрощается:
$$s = s_w \exp\left(\frac{r - r_w}{a_s} \cos \theta\right) \left\{ \frac{K_0(r/a_s)}{K_0(r_w/a_s)} - \left[1 - \exp\left(-\frac{at}{a_s^2}\right) A\left(\frac{at}{r_s^2}, \frac{r}{r_w}\right)\right] \right\}. \quad (10.1.21)$$

Решение для расхода

Уравнение нестационарной фильтрации

Расход из опытной скважины

$$Q = 2\pi k m_w s_w G\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r_w}{a_s}\right). \tag{10.1.22}$$

❖ Способы обработки откачки с постоянным понижением

Способ эталонной кривой

Таблица 10.1.4

Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
$\lg Q - \lg t$	$\lg G\left(u, \frac{r_w}{a_s}\right) - \lg u$	$k = \frac{10^D}{2\pi m_w s_w}$	$a = \frac{10^E}{r_w^2}$

Точечный способ

Способ отношения понижений (определение подбором пьезопроводности по отношению расходов опытной скважины на два момента времени):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{G\left(\frac{at_1}{r_w^2}, \frac{r_w}{a_s}\right)}{G\left(\frac{at_2}{r_w^2}, \frac{r_w}{a_s}\right)}.$$
(10.1.23)

Полбор параметров

Таблица 10.1.5

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.19, 10.1.21	а	$s-\lg t$
10.1.22	k, a	$Q - \lg t$

10.1.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности: граница I рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для напорного водоносного пласта переменной мощности (см. начало раздела 10.1);
- водоносный пласт: полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная обеспеченного питания в направлении увеличения мощности пласта;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 10.3.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.1.24);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.1.26);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.1.29) и (10.1.30).

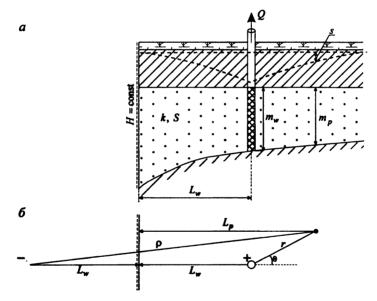


Рис. 10.3. Типовая схема полуограниченного напорного пласта переменной мощности с границей обеспеченного питания. a – разрез; b – план.

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

<u>Уравнение нестационарной фильтрации</u> Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi km_{...}} f_S^I(r, \theta, \rho, t), \qquad (10.1.24)$$

$$f_S^I(r,\theta,\rho,t) = \exp\left(\frac{r}{a_s}\cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^2S}{4km_wt},\frac{r}{a_s}\right) - W\left(\frac{\rho^2S}{4km_wt},\frac{\rho}{a_s}\right)\right]. \tag{10.1.25}$$

Уравнение для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi k m_w} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos \theta\right) \left[K_0 \left(\frac{r}{a_s}\right) - K_0 \left(\frac{\rho}{a_s}\right)\right]. \tag{10.1.26}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблиуа 10.1.6

The fermine debuty and dispersential narrance ben			
График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Водоотдача
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W(u,\beta) - \lg \frac{1}{x}$	$Q \exp\left(\frac{r}{a}\cos\theta\right)$	$S = \frac{4km_w}{10^E}$
$\lg s - \lg t$	$u = \frac{\log n}{u}$	$k = \frac{(a_s)}{4\pi m_w \cdot 10^D}$	$S = \frac{4km_w}{r^2 \cdot 10^E}$

Примечание.
$$W'(u,\beta) = W\left(u,\frac{r}{a_s}\right) - W\left(ur',\frac{\rho}{a_s}\right), r' = (\rho/r)^2$$
.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_S^I(r_1, \theta_1, \rho_1, t)}{f_S^I(r_2, \theta_2, \rho_2, t)}.$$
 (10.1.27)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m_w s_m} \exp\left(\frac{r}{a_s} \cos \theta\right) \left[K_0 \left(\frac{r}{a_s}\right) - K_0 \left(\frac{\rho}{a_s}\right)\right]. \tag{10.1.28}$$

Подбор параметров

Таблица 10.1.7

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.24	k, S	$s-\lg t$
10.1.27	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Восстановление уровня

❖ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s = \frac{Q}{4\pi k m_w} \left[f_S^I(r, \theta, \rho, t_0 + t_r) - f_S^I(r, \theta, \rho, t_r) \right];$$
 (10.1.29)

- изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k m_{w}} \left[f_{S}^{I}(r,\theta,\rho,t_{0}) - f_{S}^{I}(r,\theta,\rho,t_{0}+t_{r}) + f_{S}^{I}(r,\theta,\rho,t_{r}) \right]. \tag{10.1.30}$$

❖ Способы обработки восстановления

Подбор параметров

Таблица 10.1.8 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.29	k S	$s - \lg t_r$
10.1.30	k, S	$s_r - \lg t_r$

10.1.3. Полуограниченный в плане водоносный пласт переменной мощности: граница II рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для напорного водоносного пласта переменной мощности (см. начало раздела 10.1);
- водоносный пласт: полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная непроницаемая в направлении увеличения мощности пласта;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 10.4.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.1.31);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.1.38) и (10.1.39).

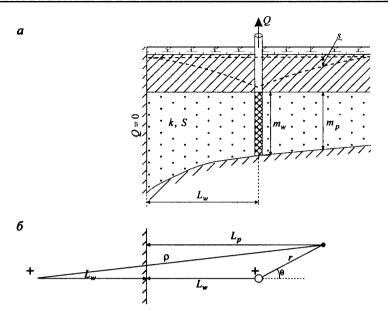


Рис. 10.4. Типовая схема полуограниченного напорного пласта переменной мощности с непроницаемой границей. a — разрез: δ — план.

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi k m_w} \left[f_S^{II}(r,\theta,\rho,t) + \frac{2\sqrt{\pi}}{U_a} \exp\left(-\frac{2x_w}{a_s}\right) F\left(U_x, U_y, U_a, t\right) \right], \qquad (10.1.31)$$

$$f_S^{II}(r,\theta,\rho,t) = \exp\left(\frac{r}{a_s}\cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^2S}{4km_wt},\frac{r}{a_s}\right) + W\left(\frac{\rho^2S}{4km_wt},\frac{\rho}{a_s}\right)\right], \quad (10.1.32)$$

$$F(U_x, U_y, U_a, t) = \int_{1}^{\infty} \exp\left(-\tau^2 U_y^2\right) \operatorname{erfc}\left(\tau U_x - \frac{1}{2\tau U_a}\right) \frac{d\tau}{\tau^2}, \quad (10.1.33)$$

$$U_{x} = \frac{x_{p} + x_{w}}{\sqrt{4at}},$$
 (10.1.34)

$$U_{y} = \frac{\left| y_{p} - y_{w} \right|}{\sqrt{4at}},$$
 (10.1.35)

$$U_a = \frac{a_s}{\sqrt{4at}}. (10.1.36)$$

Функцию $F(U_x, U_y, U_a, t)$ можно с точностью, достаточной для практических целей, аппроксимировать следующим образом:

$$F(U_x, U_y, U_a, t) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(U_x - \frac{1}{2U_a}\right) \left(\frac{1}{U_y} \exp\left(-U_y^2\right) - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} U_y\right). \tag{10.1.37}$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 10.1.9

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.31	k, S	$s-\lg t$

Восстановление уровня

❖ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s = \frac{Q}{4\pi k m_w} \left\{ f_S^{II}(r,\theta,\rho,t_0+t_r) - f_S^{II}(r,\theta,\rho,t_r) + \frac{2\sqrt{\pi}}{U_a} \exp\left(-\frac{2x_w}{a_s}\right) \left[F(U_x,U_y,U_a,t_0+t_r) - F(U_x,U_y,U_a,t_r) \right] \right\}; (10.1.38)$$

- изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi k m_{w}} \left\{ f_{S}^{II}(r,\theta,\rho,t_{0}) - f_{S}^{II}(r,\theta,\rho,t_{0}+t_{r}) + f_{S}^{II}(r,\theta,\rho,t_{r}) + \frac{2\sqrt{\pi}}{U_{a}} \exp\left(-\frac{2x_{w}}{a_{s}}\right) \times \left[F\left(U_{x},U_{y},U_{a},t_{0}\right) - F\left(U_{x},U_{y},U_{a},t_{0}+t_{r}\right) + F\left(U_{x},U_{y},U_{a},t_{r}\right)\right] \right\}. (10.1.39)$$

Способы обработки восстановления

Подбор параметров

Таблица 10.1.10

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.1.38	k, S	$s - \lg t_r$
10.1.39		$s_r - \lg t_r$

10.2. Безнапорный наклонный водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, наклонный;
- начальная обводненная мощность водоносного пласта не меняется в пространстве;
- наклон водоупора и уровня грунтовых вод одинаковый;
- решения предназначены для такого угла наклона водоупора, что $\tan \theta_{\rm S} < 0.2$;
- при определении понижения на расстоянии r > 1.5(m-s) приведенные ниже решения годятся для любых изменений начального уровня;
- при понижениях в опытной скважине меньше половины первоначальной мощности обводненной зоны решения можно использовать для любых расстояний.

В разделе рассмотрены две задачи:

- 1) неограниченный в плане водоносный пласт;
- 2) полуограниченный в плане водоносный пласт.

10.2.1. Наклонный неограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для безнапорного наклонного водоносного пласта (см. начало раздела 10.2);
- водоносный пласт: неограниченный в плане;
- типовая схема: рис. 10.5.

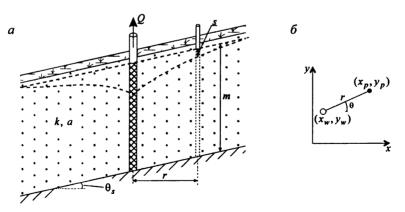


Рис. 10.5. Типовая схема неограниченного наклонного безнапорного пласта. a — разрез; δ — план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнения (10.2.1) и (10.2.3);
- понижение для нестационарного периода для больших моментов времени: уравнение (10.2.4);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.2.5);

- понижение для стационарного периода для небольших расстояний от опытной скважины: уравнение (10.2.6);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.2.10) и (10.2.11).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1962d]

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{\gamma}\right). \tag{10.2.1}$$

Hantush [1962d, 1964c] дает следующее выражение для параметра γ :

$$\gamma \approx (1.75 \div 2) \frac{m}{\tan \theta_{\rm s}} \,. \tag{10.2.2}$$

Уравнение (10.2.1) можно также записать в виде

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) \left[2K_0\left(\frac{r}{\gamma}\right) - W\left(\frac{at}{\gamma^2}, \frac{r}{\gamma}\right)\right]. \tag{10.2.3}$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

Для аргумента $\frac{at}{\gamma^2} > 2\frac{r}{\gamma}$ (или для времени $t > 2\frac{r\gamma}{a}$) уравнение (10.2.3) можно

аппроксимировать следующим выражением:

$$s'_{m} - s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) W\left(\frac{at}{\gamma^{2}}\right). \tag{10.2.4}$$

Уравнение (10.2.4) используется при известном максимальном понижении, которое определяется на основе уравнения (10.2.5).

Уравнения для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине

$$s'_{m} = \frac{Q}{2\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) K_{0}\left(\frac{r}{\gamma}\right). \tag{10.2.5}$$

Частный случай для стационарного периода

Для неравенства $r/\gamma < 0.01$ уравнение (10.2.5) упрощается:

$$s'_{m} = \frac{Q}{2\pi l m} \ln \frac{1.12\gamma}{r} \,. \tag{10.2.6}$$

« Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 10.2.1 Расчетные формулы для определения параметров на основе уравнения (10.2.1)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
$\lg s' - \lg t$	$\lg W\left(u,\frac{r}{u}\right) - \lg \frac{1}{u}$	$k = Q \exp\left(\frac{r}{\cos\theta}\right)$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$
$\frac{1 \operatorname{g} s' - \operatorname{lg} \frac{t}{r^2}}$	$\int_{0}^{1} \frac{\log n}{n} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{-1} \frac{\log n}{n}$	$k = \frac{Q}{4\pi m \cdot 10^D} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right)$	$a = \frac{10^E}{4}$

Примечание. Эталонная кривая строится при заданном отношении $\frac{r}{\gamma}$. Следовательно, если угол наклона водоносного пласта θ_S неизвестен, то с помощью эталонной кривой его можно подобрать.

Таблица 10.2.2 Расчетные формулы для определения параметров на основе уравнения (10.2.4)

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
$\lg(s'_m - s') - \lg t$		$k = \frac{Q}{4\pi m \cdot 10^D} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right)$	

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1'}{s_2'} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)W\left(\frac{r_1^2}{4at},\frac{r_1}{\gamma}\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)W\left(\frac{r_2^2}{4at},\frac{r_2}{\gamma}\right)}.$$
(10.2.7)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

1. Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s'_{m}} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right) K_{0}\left(\frac{r}{\gamma}\right). \tag{10.2.8}$$

2. Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине (для небольших расстояний от опытной скважины):

$$k = \frac{Q}{2\pi m s'_{m}} \ln \frac{1.12\gamma}{r} \,. \tag{10.2.9}$$

Подбор параметров

Таблица 10.2.3 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения Подбираемые параметры		График
10.2.1, 10.2.3	k a	$s' - \lg t$
10.2.4	k, a	$(s'_m - s') - \lg t$
10.2.7	а	$s_1'/s_2'-\lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

- изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}, \frac{r}{\gamma}\right)\right]; \tag{10.2.10}$$

изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s_r' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^2}{4at_0}, \frac{r}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r}{\gamma}\right) + W\left(\frac{r^2}{4at_r}, \frac{r}{\gamma}\right)\right]. \quad (10.2.11)$$

🌣 Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

Соответственно для уровней, отсчитанных от начала и окончания откачки,

$$\frac{s_1'}{s_2'} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0+t_r)}, \frac{r_1}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, \frac{r_1}{\gamma}\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0+t_r)}, \frac{r_2}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, \frac{r_2}{\gamma}\right)},$$
(10.2.12)

$$\frac{s'_{r,1}}{s'_{r,2}} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)} \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_0}, \frac{r_1}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_1}{\gamma}\right) + W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, \frac{r_1}{\gamma}\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)} \frac{W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}, \frac{r_2}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_2}{\gamma}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, \frac{r_2}{\gamma}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}, \frac{r_2}{\gamma}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}, \frac{r_2}{\gamma}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, \frac{r_2}{\gamma}\right)}.$$
 (10.2.13)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 10.2.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.2.10	k, a	$s' - \lg t_r$
10.2.11	,, u	$s_r - \lg t_r$
10.2.12	_	$s_1'/s_2'-\lg t_r$
10.2.13	a	$s'_{r,1}/s'_{r,2} - \lg t_r$

10.2.2. Наклонный полуограниченный в плане водоносный пласт: граница І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для безнапорного наклонного водоносного пласта (см. начало раздела 10.2);
- водоносный пласт: полуограниченный в плане;
- граница: обеспеченного питания, располагается вниз от опытной скважины или вверх;
- типовая схема: рис. 10.6.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.2.14);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.2.16);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.2.19) и (10.2.20).

Откачка с постоянным расходом

❖ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1962d]

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t), \qquad (10.2.14)$$

$$f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t) = \exp\left(n\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right)\left[W\left(\frac{r^{2}}{4at},\frac{r}{\gamma}\right) - W\left(\frac{\rho^{2}}{4at},\frac{\rho}{\gamma}\right)\right],$$
 (10.2.15)

где

n = -1 для наклона вверх по потоку (см. рис. 10.6, a);

n=1 для наклона вниз по потоку (рис. 10.6, δ).

Уравнение для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине

$$s'_{m} = \frac{Q}{2\pi km} \exp\left(n\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) \left[K_{0}\left(\frac{r}{\gamma}\right) - K_{0}\left(\frac{\rho}{\gamma}\right)\right]. \tag{10.2.16}$$

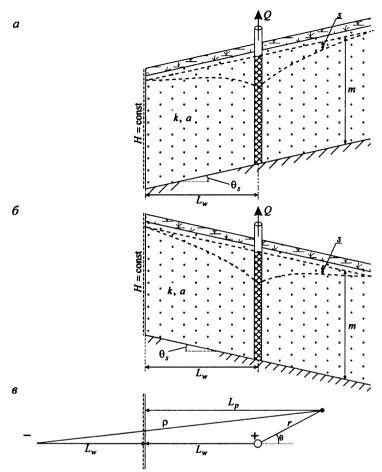


Рис. 10.6. Типовая схема полуограниченного наклонного безнапорного пласта с границей обеспеченного питания. a, b – разрез для границы, расположенной вниз (a) или вверх (b), от опытной скважины; b – план.

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 10.2.5 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	10W(v. 0) 10 1	$Q \exp \left(n \frac{r}{\kappa} \cos \theta \right)$	$a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg t$	$\lg W(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{\gamma}{4\pi m \cdot 10^D}$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$

Примечание.
$$W'(u,\beta) = W\left(u,\frac{r}{\gamma}\right) - W\left(ur',\frac{\rho}{\gamma}\right), \ r' = \left(\rho/r\right)^2.$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1'}{s_2'} = \frac{f_{Su}^I(r_1, \theta_1, \rho_1, t)}{f_{Su}^I(r_2, \theta_2, \rho_2, t)}.$$
 (10.2.17)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s'_{m}} \exp\left(n\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) \left[K_{0}\left(\frac{r}{\gamma}\right) - K_{0}\left(\frac{\rho}{\gamma}\right)\right]. \tag{10.2.18}$$

Подбор параметров

Таблица 10.2.6

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.2.14	k, a	$s'-\lg t$
10.2.17	а	$s_1'/s_2'-\lg t$

Восстановление уровня

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \left[f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t_{0}+t_{r}) - f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t_{r}) \right]; \tag{10.2.19}$$

изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s'_{r} = \frac{Q}{4\pi km} \left[f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t_{0}) - f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t_{0}+t_{r}) + f_{Su}^{I}(r,\theta,\rho,t_{r}) \right]. \tag{10.2.20}$$

❖ Способы обработки восстановления

Подбор параметров

Таблица 10.2.7

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График	
10.2.19	k a	$s' - \lg t_r$	
10.2.20	κ, a	$s_r' - \lg t_r$	

10.3. Безнапорный наклонный водоносный пласт с перетеканием

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: состоит из двух хорошо проницаемых слоев, разделенных слабопроницаемым слоем;
- основной водоносный пласт: безнапорный, изотропный, наклонный, хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;
- смежный водоносный пласт: напорный хорошо проницаемый слой, уровень в котором не меняется в процессе опробования, начальный уровень может не совпадать с начальным уровнем в основном пласте;
- начальная обводненная мощность основного водоносного пласта не меняется в пространстве;
- наклон основного водоносного пласта, разделяющего слоя и уровня грунтовых вод одинаковый;
- емкостными запасами разделяющего слоя пренебрегаем;
- решения предназначены для такого угла наклона водоупора, что $\tan \theta_{S} < 0.02$;
- понижение в опытной скважине не должно быть больше половины первоначальной мощности обводненной зоны основного водоносного пласта;
- время действия решений: $t > \frac{30r_w^2}{a[1-(10\gamma k_w)^2]}$, где γ' определяется уравнением (10.3.2);
- необходимо выполнение условия: $\gamma r_w < 0.1$.

В разделе рассмотрены две задачи:

- 1) неограниченный в плане водоносный пласт;
- 2) полуограниченный в плане водоносный пласт.

10.3.1. Наклонный неограниченный в плане водоносный пласт с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для безнапорного наклонного водоносного пласта с перетеканием (см. начало раздела 10.3);
- водоносный комплекс: неограниченный в плане;
- типовая схема: рис. 10.7.

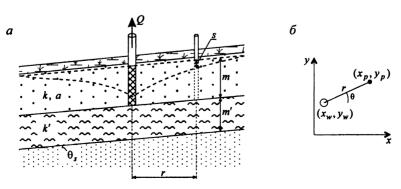


Рис. 10.7. Типовая схема неограниченного наклонного водоносного комплекса с перетеканием. a — разрез; δ — план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.3.1);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.3.4);
- восстановление для нестационарного периода: уравнения (10.3.7) и (10.3.8).

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1964c]

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2}{4at}, r\gamma'\right), \qquad (10.3.1)$$

$$\gamma' = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{B^2}} \,, \tag{10.3.2}$$

$$B \approx \sqrt{0.75 \frac{kmm'}{k'}} \,, \tag{10.3.3}$$

где γ определяется уравнением (10.2.2) (см. раздел 10.2).

Уравнение для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине

$$s'_{m} = \frac{Q}{2\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) K_{0}(r\gamma'). \tag{10.3.4}$$

Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 10.3.1 Расчетные формулы для определения параметров

i ac icinbic wopingina and onpositioning mapamet pos			
График фактической кривой	График эталонной кривой	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уровнепроводность, м ² /сут
$\lg s' - \lg t$	10W(v. m²) 10 1	$k = Q \exp\left(\frac{r}{\cos\theta}\right)$	$a = \frac{r^2 \cdot 10^E}{4}$
$\frac{\lg s' - \lg \frac{t}{r^2}}{}$	$\lim_{n \to \infty} y(u, r\gamma) - ig - u$	$k = \frac{Q}{4\pi m \cdot 10^D} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right)$	$a = \frac{10^E}{4}$

Примечание. Эталонная кривая строится при заданном значении $r\gamma'$. Следовательно, если угол наклона водоносного пласта θ_S и параметр перетекания B неизвестны, то с помощью эталонной кривой их можно подобрать.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1'}{s_2'} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)W\left(\frac{r_1^2}{4at}, r_1\gamma'\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)W\left(\frac{r_2^2}{4at}, r_2\gamma'\right)}.$$
(10.3.5)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы для заданного параметра перетекания.

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s'_{m}} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right) K_{0}(r\gamma'). \tag{10.3.6}$$

Подбор параметров

Таблица 10.3.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.3.1	k, a, B	$s' - \lg t$
10.3.5	a, B	$s_1'/s_2'-\lg t$

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине

- изменение уровня отсчитывается от начала откачки:

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos \theta\right) \left[W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}, r\gamma'\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}, r\gamma'\right)\right]; \tag{10.3.7}$$

- изменение уровня отсчитывается от окончания откачки:

$$s'_{r} = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) \left[W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}},r\gamma'\right) - W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})},r\gamma'\right) + W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}},r\gamma'\right)\right]. (10.3.8)$$

❖ Способы обработки восстановления

Способ отношения понижений

Соответственно для уровней, отсчитанных от начала и окончания откачки,

$$\frac{s_1'}{s_2'} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0+t_r)}, r_1\gamma'\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, r_1\gamma'\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0+t_r)}, r_2\gamma'\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, r_2\gamma'\right)},$$
(10.3.9)

$$\frac{s'_{r,1}}{s'_{r,2}} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1}{\gamma}\cos\theta_1\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)} \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at_0}, r_1\gamma'\right) - W\left(\frac{r_1^2}{4a(t_0 + t_r)}, r_1\gamma'\right) + W\left(\frac{r_1^2}{4at_r}, r_1\gamma'\right)}{\exp\left(-\frac{r_2}{\gamma}\cos\theta_2\right)} \frac{W\left(\frac{r_2^2}{4at_0}, r_1\gamma'\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4a(t_0 + t_r)}, r_1\gamma'\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at_r}, r_1\gamma'\right)}{4a(t_0 + t_r)}.$$
 (10.3.10)

Подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы для заданного параметра перетекания.

Подбор параметров

Таблица 10.3.3 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.3.7	k, a, B	$s' - \lg t_r$
10.3.8	κ, a, b	$s_r' - \lg t_r$
10.3.9	a P	$s_1'/s_2'-\lg t_r$
10.3.10	- a, B	$s_{r,1}'/s_{r,2}'-\lg t_r$

10.3.2. Наклонный полуограниченный в плане водоносный пласт с перетеканием

Схема проведения опыта:

- общие условия для безнапорного наклонного водоносного пласта с перетеканием (см. начало раздела 10.3);
- водоносный комплекс: полуограниченный в плане;
- граница: обеспеченного питания, располагается вниз или вверх от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 10.8.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (10.3.11);
- понижение для стационарного периода: уравнение (10.3.12).

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине [Hantush, 1964a, c]

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} \exp\left(n\frac{L_p - L_w}{\gamma}\right) \left[W\left(\frac{r^2}{4at}, r\gamma'\right) - W\left(\frac{\rho^2}{4at}, \rho\gamma'\right)\right], \tag{10.3.11}$$

гле

n = -1 для наклона вверх по потоку (см. рис. 10.8, a);

n=1 для наклона вниз по потоку (рис. 10.8, 6).

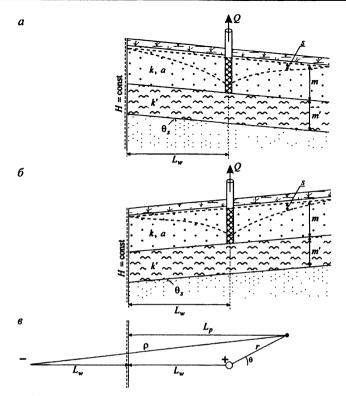


Рис. 10.8. Типовая схема полуограниченного (граница обеспеченного питания) наклонного водоносного комплекса с перетеканием. a, b – разрез для границы, расположенной вниз (a) или вверх (b), от опытной скважины; b – план.

Уравнение для периода стационара

Понижение в наблюдательной скважине

$$s'_{m} = \frac{Q}{2\pi km} \exp\left(n\frac{L_{p} - L_{w}}{\gamma}\right) [K_{0}(r\gamma') - K_{0}(\rho\gamma')].$$
 (10.3.12)

🌣 Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение коэффициента фильтрации по понижению на период стационара в наблюдательной скважине:

$$k = \frac{Q}{2\pi m s'_{m}} \exp\left(n \frac{L_{p} - L_{w}}{\gamma}\right) [K_{0}(r\gamma') - K_{0}(\rho\gamma')]. \tag{10.3.13}$$

Подбор параметров

Таблица 10.3.4

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
10.3.11	k, a	$s'-\lg t$

РАЗДЕЛ 11. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ

В данном разделе рассматриваются лучевые водозаборы в напорном или безнапорном пласте: от дна вертикальной скважины (коллектор) отходят одна или более горизонтальных скважин. Приводятся решения, которые учитывают влияние границы обеспеченного питания на понижение уровня.

Литература: Hantush, Papadopulos, 1962, 1963; Hantush, 1964с.

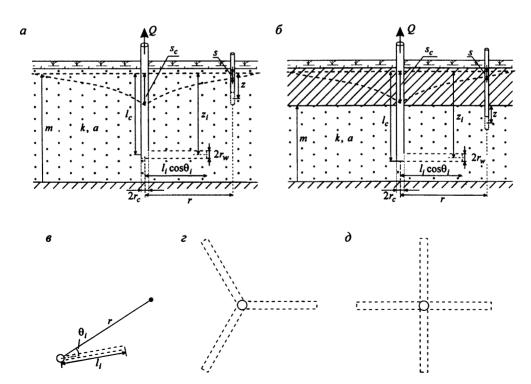


Рис. 11.1. Система горизонтальных скважин в неограниченном в плане водоносном пласте. a, δ — разрез безнапорного и напорного водоносного пласта соответственно; s — план расположения горизонтальной и наблюдательной скважин; z, δ — примеры расположения системы из трех и четырех горизонтальных скважин.

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный или напорный, изотропный;
- опытная скважина: состоит из вертикального коллектора и отходящих от него симметрично расположенных горизонтальных скважин;
- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;
- схема: рис. 11.1.

Условные обозначения:

a – уровнепроводность или пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

i = 1,2,...,N – номер горизонтальной скважины;

 $K_0(u)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k -коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

 $L(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 23);

 L_p – расстояние от точки наблюдения до границы, м;

 $L_{\rm w}$ – расстояние от коллектора скважины до границы, м;

l – длина каждой симметрично расположенной горизонтальной скважины, м;

 l_i – длина *i*-й горизонтальной скважины, м;

M – количество слагаемых в ряду, должно быть достаточно большое, так что $M > \frac{m}{2l}$;

M' – количество слагаемых в ряду, должно быть достаточно большое, так что $M' > \frac{m}{2r_c}$;

m — начальная обводненная мощность водоносного пласта (для напорных пластов — мощность водоносного пласта), м;

N - количество горизонтальных скважин;

n — номер суммы ряда;

Q — общий расход из коллектора, м³/сут;

 Q_i – расход *i*-й горизонтальной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от коллектора до точки наблюдения, м;

 r_c – радиус коллектора, м;

 r_{w} — радиус горизонтальной скважины, м;

s — понижение в точке наблюдения, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй точках наблюдения, м;

 s_c — понижение в коллекторе, м;

 $s_{\it m}$ — максимальное понижение в точке наблюдения, м;

 $s_{\it mc}$ — максимальное понижение в коллекторе, м;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);

z — расстояние по вертикали от поверхности грунтовых вод (для напорных пластов — от кровли водоносного пласта) до точки наблюдения, м;

- z_i расстояние по вертикали от поверхности грунтовых вод (для напорных пластов от кровли водоносного пласта) до *i*-й горизонтальной скважины, м:
- α_i геометрический параметр, проекция расстояния от коллектора до точки наблюдения на линию *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.1.2), м;
- α'_i геометрический параметр, проекция расстояния от отражения коллектора до точки наблюдения на линию отраженной *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.2.3), м;
- β аргумент функций;
- β_i геометрический параметр, расстояние от точки наблюдения до *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.1.3), м;
- β'_{i} геометрический параметр, расстояние от точки наблюдения до отражения *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.2.4), м;
- γ_i геометрический параметр, разность между величиной α_i и длиной *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.1.4), м;
- γ_i' геометрический параметр, разность между величиной α_i' и длиной отражения *i*-й горизонтальной скважины: определяется уравнением (11.2.5), м;
- θ_i угол в плане между *i*-й горизонтальной скважиной и горизонтальным направлением от центра коллектора до точки наблюдения, м;
- θ'_{i} угол в плане между отражением *i*-й горизонтальной скважины и горизонтальным направлением от центра отраженного коллектора до точки наблюдения, м;
- ρ горизонтальное расстояние от точки наблюдения до отражения коллектора: определяется уравнением (11.2.1), м.

11.1. Неограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- общие условия для откачки из горизонтальных скважин (см. начало раздела 11);
- водоносный пласт: неограниченный в плане;
- типовая схема: рис. 11.1.

Список решений (для нестационарного периода)

Понижение в точке наблюдения:

- понижение для больших моментов времени: уравнение (11.1.1);
- понижение при различном расположении точки наблюдения для больших моментов времени: уравнения (11.1.5) и (11.1.6);
- понижение на уровне грунтовых вод для больших моментов времени: уравнение (11.1.7);
- понижение для начального периода откачки: уравнение (11.1.8);
- понижение на уровне грунтовых вод для начального периода откачки: уравнение (11.1.9).

Понижение в коллекторе:

- понижение для больших моментов времени: уравнение (11.1.10);
- понижение для частных случаев для больших моментов времени: уравнения (11.1.13) и (11.1.14);
- понижение для начального периода откачки: уравнение (11.1.15).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. Понижение в точке наблюдения
 - 1.1. Для больших моментов времени $t > \frac{2.5m^2}{a}$ и $t > \frac{5(r^2 + l_i^2)}{a}$:
 - общий случай

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}}{4\pi km l_{i}} \left\{ -2\beta_{i} \left[\arctan \frac{\alpha_{i}}{\beta_{i}} - \arctan \frac{\gamma_{i}}{\beta_{i}} \right] + \frac{4m}{\pi} \times \right. \\ \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[L \left(\frac{n\pi\alpha_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m} \right) - L \left(\frac{n\pi\gamma_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m} \right) \right] \cos \frac{n\pi z}{m} \cos \frac{n\pi z_{i}}{m} \right\}, (11.1.1)$$

где геометрические параметры определяются следующим образом (рис. 11.2):

$$\alpha_i = r\cos\theta_i - r_c, \tag{11.1.2}$$

$$\beta_i = r\sin\theta_i,\tag{11.1.3}$$

$$\gamma_i = r\cos\theta_i - r_c - l_i = \alpha_i - l_i; \qquad (11.1.4)$$

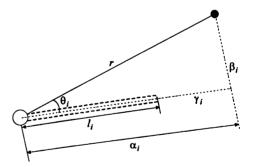


Рис. 11.2. План расположения горизонтальной и наблюдательной скважин: пояснительный рисунок к геометрическим параметрам в уравнении (11.1.1).

- для расстояния от коллектора $r > r_c + l_i + m$

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{4\pi k m l_i} \begin{cases} \alpha_i W \left(\frac{\alpha_i^2 + \beta_i^2}{4at} \right) - \gamma_i W \left(\frac{\gamma_i^2 + \beta_i^2}{4at} \right) - \\ -2\beta_i \left[\arctan \frac{\alpha_i}{\beta_i} - \arctan \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right] + 2l_i \end{cases};$$
(11.1.5)

— для расстояния от коллектора $r > r_c + l_i + m$ и $r > 5(r_c + l_i)$

$$s = \sum_{i=1}^{N} Q_i \frac{1}{4\pi km} W\left(\frac{r^2}{4at}\right); \tag{11.1.6}$$

- понижение на уровне грунтовых вод

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}}{4\pi km l_{i}} \left\{ -2\beta_{i} \left[\arctan \frac{\alpha_{i}}{\beta_{i}} - \arctan \frac{\gamma_{i}}{\beta_{i}} \right] + 2l_{i} - \frac{2\beta_{i}}{4\pi km l_{i}} \left[\arctan \frac{\alpha_{i}}{\beta_{i}} - \arctan \frac{\gamma_{i}}{\beta_{i}} \right] + \frac{4m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[L \left(\frac{n\pi\alpha_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m} \right) - L \left(\frac{n\pi\gamma_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m} \right) \right] \cos \frac{n\pi z_{i}}{m} \right] \right\}.$$
(11.1.7)

- 1.2. Для времени $t \le 0.05m^2/a$ (это соответствует начальному периоду откачки или относительно большой мощности водоносного пласта):
- понижение в точке наблюдения

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}}{4\pi k l_{i}} \left\{ \begin{aligned} & \arcsin \frac{\alpha_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} - z)^{2}}} - \arcsin \frac{\gamma_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} - z)^{2}}} + \\ & + \operatorname{arcsinh} \frac{\alpha_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} + z)^{2}}} - \operatorname{arcsinh} \frac{\gamma_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} + z)^{2}}} - \\ & - 2 \operatorname{arcsinh} \frac{\alpha_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} + z + at/m)^{2}}} + 2 \operatorname{arcsinh} \frac{\gamma_{i}}{\sqrt{\beta_{i}^{2} + (z_{i} + z + at/m)^{2}}} \end{aligned} \right\}; (11.1.8)$$

- понижение на уровне грунтовых вод

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{2\pi k l_i} \begin{cases} \arcsin \frac{\alpha_i}{\sqrt{\beta_i^2 + z_i^2}} - \arcsin \frac{\gamma_i}{\sqrt{\beta_i^2 + z_i^2}} - \\ -\arcsin \frac{\alpha_i}{\sqrt{\beta_i^2 + (z_i + at/m)^2}} + \arcsin \frac{\gamma_i}{\sqrt{\beta_i^2 + (z_i + at/m)^2}} \end{cases}. \quad (11.1.9)$$

- 2. Понижение в коллекторе (решения (11.1.10), (11.1.13) и (11.1.14) предназначены для четырех и более симметрично расположенных горизонтальных скважин).
 - 2.1. Для больших моментов времени $t > 2.5m^2/a$ и $t > 5(r_c^2 + l^2)/a$:
 - общий случай

$$S_{c} = \frac{Q}{4\pi kmN} \left\{ \frac{l^{2}}{4at} + \frac{N-1}{l} \left[(r_{c} + l)W \left(\frac{(r_{c} + l)^{2}}{4at} \right) - r_{c}W \left(\frac{r_{c}^{2}}{4at} \right) \right] + \left\{ + 2N - \frac{m}{2l} \ln \left[4 \left(1 - \cos \frac{\pi(2z_{i} + r_{w})}{m} \right) \left(1 - \cos \frac{\pi r_{w}}{m} \right) \right] - \left\{ - \frac{4m}{\pi l} \sum_{n=1}^{M} \left[\frac{1}{n} \left[\frac{\pi}{2} - L \left(\frac{n\pi l}{m}, 0 \right) \right] \cos \frac{n\pi z_{i}}{m} \cos \frac{n\pi (z_{i} + r_{w})}{m} \right] + \left\{ + \frac{4m(N-1)}{\pi l} \sum_{n=1}^{M'} \left[\frac{1}{n} \left[L \left(\frac{n\pi (r_{c} + l)}{m}, 0 \right) - L \left(\frac{n\pi r_{c}}{m}, 0 \right) \right] \times \right] + \left\{ - \frac{4m(N-1)}{\pi l} \sum_{n=1}^{M'} \left[\frac{1}{n} \left[L \left(\frac{n\pi (z_{i} + l)}{m}, 0 \right) - L \left(\frac{n\pi r_{c}}{m}, 0 \right) \right] \right\} \right\} \right\}$$

где

$$M > \frac{m}{2l},\tag{11.1.11}$$

$$M' > \frac{m}{2r_c};$$
 (11.1.12)

- для
$$l > 0.5m$$
 и $r_w \le \frac{m}{2\pi}$

$$s_{c} = \frac{Q}{4\pi kmN} \left\{ + \frac{N-1}{l} \left[(r_{c} + l)W \left(\frac{(r_{c} + l)^{2}}{4at} \right) - r_{c}W \left(\frac{r_{c}^{2}}{4at} \right) \right] + \frac{Q}{4\pi kmN} \left\{ + 2N + \frac{m}{2l} \ln \frac{\left(\frac{m}{\pi r_{w}} \right)^{2}}{2\left(1 - \cos \frac{\pi(2z_{i} + r_{w})}{m} \right)} + \frac{4m(N-1)}{\pi l} \sum_{n=1}^{M'} \left[\frac{1}{n} \left[\frac{\pi}{2} - L \left(\frac{n\pi r_{c}}{m}, 0 \right) \right] \cos \frac{n\pi z_{i}}{m} \cos \frac{n\pi(z_{i} + r_{w})}{m} \right] \right\}$$

– для $r_c \ge 0.5 m$

$$s_{c} \approx \frac{Q}{4\pi kmN} \left\{ W \left(\frac{l^{2}}{4at} \right) + \frac{N-1}{l} \left[(r_{c} + l)W \left(\frac{(r_{c} + l)^{2}}{4at} \right) - r_{c}W \left(\frac{r_{c}^{2}}{4at} \right) \right] + \frac{Q}{2l \ln \frac{m}{2l} \ln \frac{\left(\frac{m}{\pi r_{w}} \right)^{2}}{2\left(1 - \cos \frac{\pi(2z_{i} + r_{w})}{m} \right)} \right\}. \tag{11.1.14}$$

2.2. Для времени $t \leq \frac{m^2}{20a}$. Это соответствует начальному периоду откачки или относительно большой мощности водоносного пласта [Hantush, Papadopulos, 1962]:

$$s_{c} = \frac{Q}{4\pi k l N} \left\{ \begin{cases} \arcsin \frac{l}{r_{w}} + \arcsin \frac{l}{2z_{i} + r_{w}} - 2 \arcsin \frac{l}{2z_{i} + r_{w} + at/m} - \frac{l}{2z_{i} + r_{w} + at/m} - \frac{l}{r_{w}} - \frac{l}{r_$$

***** Способы обработки откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,, \tag{11.1.16}$$

подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы; f – правая часть уравнений (11.1.1), (11.1.5) – (11.1.9) для первой (f_1) и второй (f_2) точек наблюдения. Для уравнений (11.1.7) и (11.1.9) берутся понижения на уровне грунтовых вод.

Подбор параметров

Таблица 11.1.1 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
11.1.1, 11.1.5 – 11.1.9	h a	$s - \lg t$
11.1.10, 11.1.13 – 11.1.15	k, a	$s_c - \lg t$
11.1.16	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Замечание

Для больших моментов времени и для расстояния от коллектора $r > r_c + l_i + m$ и $r > 5(r_c + l_i)$ определение параметров проводят на основе уравнения (11.1.6). Уравнение аналогично уравнению для схемы однородного напорного водоносного пласта и совершенной по степени вскрытия скважины — схема Тейса (см. раздел 2.1.). Следовательно, для обработки откачки можно использовать все способы, предложенные

для схемы Тейса с заменой $\sum_{i=1}^N Q_i$ на общий расход из коллектора Q . Определяемыми

параметрами водоносного пласта будут проводимость (T = km) и уровнепроводность или пьезопроводность.

11.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница І рода

Схема проведения опыта:

- общие условия для откачки из горизонтальных скважин (см. начало раздела 11);
- водоносный пласт: полуограниченный в плане;
- граница: прямолинейная плановая бесконечная граница обеспеченного питания;
- типовая схема: рис. 11.3.

Определение расстояния до фиктивной скважины

Расстояние от наблюдательной скважины до отраженной от границы (фиктивной) скважины рассчитывается по следующей зависимости (рис. 11.3, в):

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} \ . \tag{11.2.1}$$

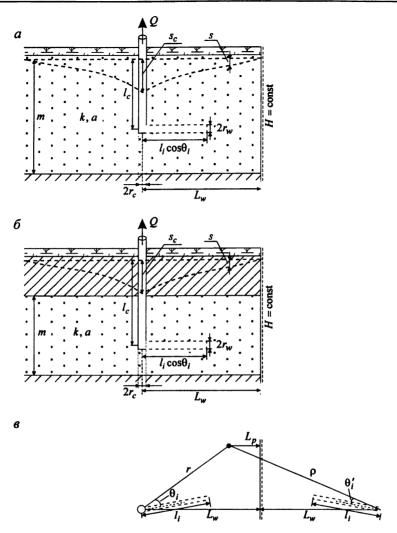


Рис. 11.3. Система горизонтальных скважин в полуограниченном водоносном пласте с границей обеспеченного питания. a, 6 — разрез безнапорного и напорного пласта; a — план.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода в точке наблюдения: уравнение (11.2.2);
- понижение для нестационарного периода в коллекторе: уравнение (11.2.6);
- понижение для нестационарного периода в коллекторе при одной горизонтальной скважине, перпендикулярной реке: уравнение (11.2.7);
- понижение для стационарного периода в точке наблюдения: уравнение (11.2.8);
- понижение для стационарного периода в коллекторе: уравнение (11.2.9);
- понижение для стационарного периода в коллекторе при одной горизонтальной скважине, перпендикулярной реке: уравнения (11.2.10) и (11.2.11).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Понижение в точке наблюдения (для больших моментов времени $t > \frac{2.5m^2}{a}$ и $t > \frac{5(\rho^2 + l_i^2)}{2}$)

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}}{4\pi km l_{i}} \begin{cases} \alpha_{i}W\left(\frac{\alpha_{i}^{2} + \beta_{i}^{2}}{4at}\right) - \gamma_{i}W\left(\frac{\gamma_{i}^{2} + \beta_{i}^{2}}{4at}\right) + 2l_{i} - \\ -2\beta_{i}\left(\arctan\frac{\alpha_{i}}{\beta_{i}} - \arctan\frac{\gamma_{i}}{\beta_{i}}\right) + \\ +\frac{4m}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}\left[L\left(\frac{n\pi\alpha_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m}\right) - L\left(\frac{n\pi\gamma_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m}\right)\right] \cos\frac{n\pi z}{m}\cos\frac{n\pi z_{i}}{m} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_{i}'W\left(\frac{\alpha_{i}'^{2} + \beta_{i}'^{2}}{4at}\right) - \gamma_{i}'W\left(\frac{\gamma_{i}'^{2} + \beta_{i}'^{2}}{4at}\right) + 2l_{i} - \\ -2\beta_{i}'\left[\arctan\frac{\alpha_{i}'}{\beta_{i}'} - \arctan\frac{\gamma_{i}'}{\beta_{i}'}\right] + \\ +\frac{4m}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}\left[L\left(\frac{n\pi\alpha_{i}'}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}'}{m}\right) - L\left(\frac{n\pi\gamma_{i}'}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}'}{m}\right)\right] \cos\frac{n\pi z}{m}\cos\frac{n\pi z_{i}}{m} \end{cases}$$

где геометрические параметры определяются следующим образом (рис. 11.4):

$$\alpha_i' = \rho \cos \theta_i' - r_c \,, \tag{11.2.3}$$

$$\beta_i' = \rho \sin \theta_i' \,, \tag{11.2.4}$$

$$\gamma_i' = \rho \cos \theta_i' - r_c - l_i = \alpha_i' - l_i. \tag{11.2.5}$$

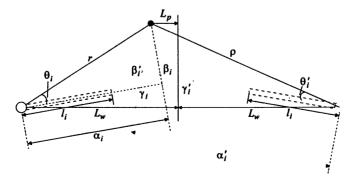


Рис. 11.4. План расположения горизонтальной скважины, ее отражения и наблюдательной скважины: пояснительный рисунок к геометрическим параметрам в уравнении (11.2.2).

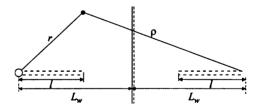
2. Понижение в коллекторе (для больших моментов времени $t > 2.5m^2/a$ и $t > 5l^2/a$, и для неравенств l > 0.5m и $r_w \le 0.16m$)

$$s_{c} = \frac{Q}{4\pi kmN} \begin{cases} W\left(\frac{l^{2}}{4at}\right) + \frac{N-1}{l}\left[\left(r_{c} + l\right)W\left(\frac{(r_{c} + l)^{2}}{4at}\right) - r_{c}W\left(\frac{r_{c}^{2}}{4at}\right)\right] + \\ + 2N + \frac{m}{2l}\ln\frac{m^{2}/(\pi r_{w})^{2}}{2\left(1 - \cos\frac{\pi(2z_{i} + r_{w})}{m}\right)} + \\ + \frac{4m(N-1)}{\pi l}\sum_{n=1}^{M'}\left[\frac{1}{n}\left[\frac{\pi}{2} - L\left(\frac{n\pi r_{c}}{m}, 0\right)\right]\cos\frac{n\pi z_{i}}{m}\cos\frac{n\pi(z_{i} + r_{w})}{m}\right] - \\ -N\left[\frac{2(L_{w} - r_{c})}{l}W\left(\frac{4(L_{w} - r_{c})^{2}}{4at}\right) + 2 - \frac{2L_{w} - 2r_{c} - l}{l}W\left(\frac{(2L_{w} - 2r_{c} - l)^{2}}{4at}\right)\right] \end{cases} . (11.2.6)$$

3. Понижение в коллекторе при одной горизонтальной скважине, расположенной перпендикулярно руслу реки (рис. 11.5). Рассматриваются начальные моменты времени и напорный водоносный пласт неограниченной мощности [Hantush, Papadopulos, 1963]:

$$s_{c} = \frac{Q}{4\pi k L_{w}} \left\{ W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at} \right) - W \left(\frac{(2z_{1} + r_{w})^{2}}{4at} \right) + \frac{2L_{w}}{\pi l} \times \left[\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[W \left(\frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{n\pi r_{w}}{L_{w}} \right) - W \left(\frac{(2z_{1} + r_{w})^{2}}{4at}, \frac{n\pi (2z_{1} + r_{w})}{L_{w}} \right) \sin \frac{n\pi l}{L_{w}} \right] \right\}. (11.2.7)$$

Рис. 11.5. Горизонтальная скважина в полуограниченном водоносном пласте с границей обеспеченного питания (план): скважина расположена перпендикулярно к границе.



Уравнение для периода стационара

1. Понижение в точке наблюдения

$$s_{m} = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}}{4\pi km} \begin{cases} \left[\frac{\gamma_{i}}{l_{i}} \ln\left(\gamma_{i}^{2} + \beta_{i}^{2}\right) - \frac{\alpha_{i}}{l_{i}} \ln\left(\alpha_{i}^{2} + \beta_{i}^{2}\right) + 2\beta_{i} \left[\arctan\frac{\alpha_{i}}{\beta_{i}} - \arctan\frac{\gamma_{i}}{\beta_{i}}\right] + \right. \\ \left. + \frac{4m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[L\left(\frac{n\pi\alpha_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m}\right) - L\left(\frac{n\pi\gamma_{i}}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}}{m}\right)\right] \cos\frac{n\pi z}{m} \cos\frac{n\pi z_{i}}{m} \right] \\ - \left[\frac{\gamma_{i}'}{l_{i}'} \ln\left(\gamma_{i}'^{2} + \beta_{i}'^{2}\right) - \frac{\alpha_{i}'}{l_{i}'} \ln\left(\alpha_{i}'^{2} + \beta_{i}'^{2}\right) + 2\beta_{i}' \left[\arctan\frac{\alpha_{i}'}{\beta_{i}'} - \arctan\frac{\gamma_{i}'}{\beta_{i}'}\right] + \right. \\ \left. + \frac{4m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[L\left(\frac{n\pi\alpha_{i}'}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}'}{m}\right) - L\left(\frac{n\pi\gamma_{i}'}{m}, \frac{n\pi\beta_{i}'}{m}\right)\right] \cos\frac{n\pi z}{m} \cos\frac{n\pi z_{i}}{m} \right] \end{cases} . (11.2.8)$$

2. Понижение в коллекторе (l > 0.5m и $r_w < \frac{m}{2\pi}$)

$$s_{mc} = \frac{Q}{4\pi kmN} \left\{ -\frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} \ln \frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} - \frac{2(2L_{w} - 2r_{c} - l)}{l} \ln \frac{2L_{w} - 2r_{c} - l}{l} - \frac{1}{l} - \frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} \ln \frac{2L_{w} - 2r_{c} - l}{l} - \frac{1}{l} \ln \frac{l + r_{c}}{l} - \frac{1}{l} + \frac{l + r_{c}}{l} \ln \frac{l + r_{c}}{l} - \frac{1}{l} + \frac{m}{2l} \ln \frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} - \frac{r_{c}}{l} \ln \frac{r_{c}}{l} - \frac{1}{l} \ln \frac{r_{c}}{l} - \frac{m}{2} \ln \frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} - \frac{r_{c}}{l} \ln \frac{r_{c}}{l} - \frac{m}{2} \ln \frac{2(L_{w} - r_{c})}{l} - \frac{r_{c}}{l} \ln \frac{r_{c}}{l} - \frac{m}{2} \ln \frac{$$

- 3. Понижение в коллекторе при одной горизонтальной скважине, расположенной перпендикулярно руслу реки. Рассматривается напорный водоносный пласт неограниченной мощности. Для времени $t > L_w^2/a$ [Hantush, Papadopulos, 1963]:
 - для $z_1 < 0.5 L_w$

$$s_{mc} = \frac{Q}{2\pi k L_w} \left\{ 0.5 \frac{\left(\frac{z_1}{L_w}\right)^2 \frac{l}{L_w}}{\left[1 - \left(\frac{l}{2L_w}\right)^2\right]^2} + \operatorname{arcsinh} \frac{l}{r_w} - \operatorname{arcsinh} \frac{l}{2z_1} \right\};$$
 (11.2.10)

- для $l > 10r_w$

$$s_{mc} = \frac{Q}{2\pi k L_w} \left\{ 0.5 \frac{\left(\frac{z_1}{L_w}\right)^2 \frac{l}{L_w}}{\left[1 - \left(\frac{l}{2L_w}\right)^2\right]^2} + \ln \frac{2\left(1 + \frac{2z_1}{r_w}\right)}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2z_1}{r_w}\right)^2}} \right\}.$$
 (11.2.11)

Способы обработки откачки

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{f_1}{f_2} \,, \tag{11.2.12}$$

подбор уровнепроводности осуществляется способом биссектрисы; f – правая часть уравнений (11.2.2), (11.2.6) и (11.2.7) для первой (f_1) и второй (f_2) точек наблюдения.

Точечные способы

По понижению на период стационара определяется коэффициент фильтрации водоносного пласта. По понижению в точке наблюдения расчет проводят на основе уравнения (11.2.8), а по понижению в коллекторе – на основе уравнения (11.2.9), (11.2.10) или (11.2.11).

$$k = \frac{\text{правая часть уравнения (11.2.8)}}{s_{--}}$$
, (11.2.13)

$$k = \frac{\text{правая часть уравнения (11.2.9), (11.2.10) или (11.2.11)}}{s_{mc}}$$
. (11.2.14)

Подбор параметров

Таблица 11.2.1 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
11.2.2	7	$s - \lg t$
11.2.6, 11.2.7	k, a	$s_c - \lg t$
11.2.12	а	$s_1/s_2 - \lg t$

РАЗДЕЛ 12. ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТАЯ СРЕДА

12.1. Трещиновато-пористый напорный водоносный пласт

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, трещиновато-пористый, неограниченный в плане;
- блоки: гомогенные, изотропные; проницаемость ниже, чем у трещин, емкость выше, чем у трещин;
- система трещин: ортогональная (рис. 12.1, a) или горизонтальная (рис. 12.1, b);
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия.

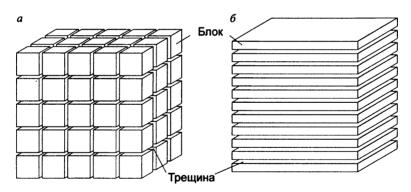


Рис. 12.1. Схема идеальной трехмерной трещиновато-пористой среды. a — ортогональная, δ — слоистая система трещин.

<u>Литература:</u> Kruseman, Ridder, 1994 (решения, в свою очередь, взяты из: 1) Bourdet D., Gringarten A.C. Determination of fissure volume and block size in fractured reservoirs by type curve analysis // Paper SPE 9293 presented at the 1980 SPE Annual Fall Techn. Conf. and Exhib. Dallas, 1980; 2) Kazemi H., Seth M.S., Thomas G.W. The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution // Soc. of Petrol. Engrs. J. 1969. P. 463–472).

Условные обозначения:

 A_{x} – величина, которую отсекает прямая на оси абсцисс;

C — угол наклона прямой;

 $F(u, \lambda, \omega)$ — специальная функция (интегральная запись и табличные значения отсутствуют);

 $K_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_b – коэффициент фильтрации блоков, м/сут;

 k_f — коэффициент фильтрации трещин, м/сут;

 m_h – мощность блоков, м;

n – целое число (1, 2 или 3), которое зависит от расположения трещин;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 S_b — водоотдача блоков;

 S_f – водоотдача трещин;

s - понижение в водоносном пласте, м;

 s_1, s_2 — понижения на два момента времени, м;

 T_f – проводимость трещин, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

 t_1, t_2 – время двух замеров, сут;

$$u = \frac{4T_f t}{\left(S_f + \beta_f S_b\right) r^2} - \text{аргумент функции;}$$

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 α – параметр, характеризующий геометрию трещин и блоков, определяется уравнением (12.1.5), $1/m^2$;

 β – аргумент функции;

 eta_f — безразмерный коэффициент, для начальных моментов времени $eta_f=0$, для больших интервалов времени коэффициент зависит от системы трещин: для ортогональной системы трещин $eta_f=1/3$, для горизонтальной — $eta_f=1$;

 Δs — изменение понижения, определяется по графику (рис. 12.2) на время, соответствующее середине ложностационарного периода, м;

$$\lambda = \omega r^2 \frac{k_b}{k_f}$$
 — аргумент функции;

$$\omega = \frac{S_f}{S_f + \beta_f S_b} - \text{аргумент функции.}$$

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (12.1.1);
- понижение для начальных моментов времени: уравнения (12.1.6) и (12.1.7);
- понижение для больших интервалов времени: уравнения (12.1.8), (12.1.9) и (12.1.10);
- понижение для ложностационарного периода: уравнения (12.1.11) и (12.1.12).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} F(u, \lambda, \omega), \qquad (12.1.1)$$

$$u = \frac{4T_f t}{(S_f + \beta_f S_b)r^2},$$
 (12.1.2)

$$\lambda = \alpha r^2 \frac{k_b}{k_f} \,, \tag{12.1.3}$$

$$\omega = \frac{S_f}{S_f + \beta_f S_b},\tag{12.1.4}$$

$$\alpha = \frac{4n(n+2)}{m_b^2} \,. \tag{12.1.5}$$

Например, для горизонтальной системы трещин (см. рис. 12.1, δ) n=1 и параметр $\alpha = 12/m_b^2$.

Функция в уравнении (12.1.1) зависит от трех аргументов и поэтому неудобна для применения на практике. Функция приводится без интегральной записи и табличных значений. Ряд аппроксимационных значений дан в уравнениях для частных случаев нестационарной фильтрации.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. Для начальных моментов времени понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} W \left(\frac{S_f + S_b}{4T_f t} r^2 \right)$$
 (12.1.6)

или при условии линейной аппроксимации функции влияния скважины W(u) в уравнении (12.1.6)

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} \ln \frac{2.25T_f t}{S_f r^2}.$$
 (12.1.7)

Уравнение (12.1.7) применимо для условия $u \le \frac{\omega(1-\omega)}{3.6\lambda}$.

2. Для больших интервалов времени понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} W \left(\frac{S_f + \beta_f S_b}{4T_f t} r^2 \right), \tag{12.1.8}$$

где

 $\beta_f = 1/3$ для ортогональной системы трещин,

 $\beta_f = 1$ для горизонтальной системы трещин.

При условии линейной аппроксимации функции влияния скважины W(u) в уравнении (12.1.8)

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} \ln \frac{2.25T_f t}{\left(S_f + \beta_f S_b\right)^{r^2}}.$$
 (12.1.9)

Уравнение (12.1.9) применимо для условия $u \ge \frac{1-\omega}{1.3\lambda} \ge 100$.

3. Для времени $t > 25 \frac{\left(S_f + \beta_f S_b\right) r^2}{T_f}$ (или для аргумента u > 100)

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} \left[\ln(2.25u) - W \left(\frac{\lambda u}{\omega(1-\omega)} \right) + W \left(\frac{\lambda u}{1-\omega} \right) \right]. \tag{12.1.10}$$

4. Для ложностационарного режима

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} K_0(\lambda). \tag{12.1.11}$$

5. Для ложностационарного режима при условии $\lambda < 0.01$

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} \ln \frac{1.26}{\lambda} \,. \tag{12.1.12}$$

Способы обработки откачки

Алгоритм обработки Bourdet и Gringarten [Kruseman, Ridder, 1994]

Данный алгоритм применяется при условии $\lambda < 1.78$. Для значения аргумента $\lambda > 1.78$ (что соответствует наблюдениям на больших расстояниях от опытной скважины) обработку можно проводить как для схемы однородного напорного изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1.). При этом определяемые параметры — проводимость трещин T_f и суммарная водоотдача $S_f + S_b$.

- 1. Строим эталонную кривую $\lg W(u) \lg \frac{1}{u}$.
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- Эталонную кривую совмещаем с графиком, построенным по фактическим данным, полученным на начальные моменты времени.
- 4. На совмещенных графиках берем произвольную точку P_1 , координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg W(u)$, $\lg \frac{1}{t}$.
- 5. По снятым с графиков значениям $\lg s$ и $\lg W(u)$ определяем проводимость трещин по выражению

$$T_f = \frac{Q}{4\pi}W(u). \tag{12.1.13}$$

6. По снятым с графиков значениям $\lg t$, $\lg \frac{1}{u}$ и определенной проводимости трещин T_f вычисляем водоотдачу трещин по формуле

$$S_f = u \frac{4T_f t}{r^2}. (12.1.14)$$

Здесь $\beta_f = 0$, так как параметры определяются по начальным моментам времени.

7. По понижению на период ложностационарного режима и по определенной проводимости трещин T_f определяем аргумент λ подбором на основе уравнения (12.1.11) или при малых значениях λ прямым определением на основе уравнения (12.1.12):

$$\lambda = \frac{1.26}{\exp(4\pi T_f s/Q)}.\tag{12.1.15}$$

- 8. Эталонную кривую совмещаем с графиком, построенным по фактическим данным, полученным на длительные периоды откачки.
- 9. На совмещенных графиках берем произвольную точку P_2 , координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg W(u)$, $\lg \frac{1}{t}$.
- 10. По снятым с графика значениям $\lg s$ и $\lg W(u)$ определяем проводимость трещин по формуле

$$T_f = \frac{Q}{4\pi s} W(u). \tag{12.1.16}$$

11. По снятым с графика значениям $\lg t$, $\lg \frac{1}{u}$ и определенной проводимости трещин T_f рассчитываем суммарную водоотдачу $S_f + S_b$ по выражению

$$S_f + \beta_f S_b = u \frac{4T_f t}{r^2} \,. \tag{12.1.17}$$

Здесь $\beta_f = 1/3$, если система трещин ортогональная, и $\beta_f = 1$, если трещины располагаются только в горизонтальном направлении.

Алгоритм обработки Kazemi [Kruseman, Ridder, 1994]

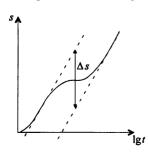


Рис. 12.2. Индикаторный график понижения уровня в трещиновато-пористой среде.

Алгоритм основан на наличии двух прямолинейных участков индикаторной кривой, построенной в полулогарифмическом масштабе, и одного из следующих условий:

- u > 100,
- $u > 100\omega$ и $\lambda << 1$,
- $u > \left(100 \frac{1}{\lambda}\right) \text{ и } \omega << 1.$
- 1. Строим график по фактическим данным в полулогарифмическом масштабе: $s \lg t$.
- 2. Проводим две прямые линии: первую

прямую строим по замерам на начальные моменты времени, вторую прямую – по замерам на большие моменты времени (рис. 12.2).

3. Определяем угол наклона этих прямых (две прямые должны быть параллельны друг другу, и, следовательно, их углы наклона должны совпадать):

$$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1}.$$
 (12.1.18)

4. Рассчитываем проводимость трещин по выражению

$$T_f = \frac{0.183Q}{C} \,. \tag{12.1.19}$$

- 5. Определяем величину отрезка, который отсекает первая прямая на оси x, A_x .
- 6. По определенной проводимости трещин T_f и по величине A_x рассчитываем водоотдачу трещин:

$$S_f = \frac{2.25T_f 10^{A_s}}{r^2}. (12.1.20)$$

- 7. Определяем величину отрезка, который отсекает вторая прямая на оси x, A_x .
- 8. По определенной проводимости трещин T_f и по величине A_x рассчитываем суммарную водоотдачу:

$$S_f + \beta S_b = \frac{2.25T_f 10^{A_x}}{r^2} \,. \tag{12.1.21}$$

Здесь $\beta_f = 1/3$, если система трещин ортогональная, и $\beta_f = 1$, если трещины располагаются только в горизонтальном направлении.

9. По определенной проводимости трещин T_f , водоотдаче трещин S_f и по величине A_x рассчитываем водоотдачу блоков:

$$S_b = \frac{2.25T_f 10^{A_x}}{\beta r^2} - \frac{S_f}{\beta} \,. \tag{12.1.22}$$

При условии отсутствия первого прямолинейного участка алгоритм подбора параметров следующий.

1. Определяем угол наклона прямолинейного участка:

$$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1} \,. \tag{12.1.23}$$

2. Рассчитываем проводимость трещин по выражению

$$T_f = \frac{0.183Q}{C} \,. \tag{12.1.24}$$

- 3. Определяем величину отрезка, который отсекает прямая на оси x, A_x .
- 4. По определенной проводимости трещин T_f и по величине A_x рассчитываем суммарную водоотдачу:

$$S_f + \beta S_b = \frac{2.25T_f 10^{A_x}}{r^2} \,. \tag{12.1.25}$$

Здесь $\beta_f = 1/3$, если система трещин ортогональная, и $\beta_f = 1$, если трещины располагаются только в горизонтальном направлении.

- 5. Определяем величину $\Delta s/2$ по графику (см. рис. 12.2).
- 6. Рассчитываем аргумент ω по следующей зависимости:

$$\omega = 10^{-\Delta s/C} \,. \tag{12.1.26}$$

7. Определяем водоотдачу блоков, если известна водоотдача трещин:

$$S_b = \frac{S_f}{\omega \beta_f} - \frac{S_f}{\beta_f} \tag{12.1.27}$$

или из формулы (12.1.4) для аргумента ω подбором определяем водоотдачу трещин, если известна водоотдача блоков.

12.2. Трещиновато-пористый безнапорный водоносный пласт

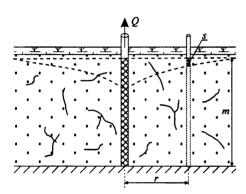


Рис. 12.3. Типовая схема (разрез) неограниченного безнапорного пласта.

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, трещиновато-пористый, неограниченный в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия;
- понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;
- типовая схема: рис. 12.3.

<u>Литература:</u> Boulton, Streltsova-Adams, 1978.

Условные обозначения:

 A_1, A_2, A_3 – параметры, 1/сут, 1/сут², 1/сут³;

 a_b – пьезопроводность блоков, м²/сут;

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_f – коэффициент фильтрации трещин, м/сут;

m — начальная обводненная мощность водоносного пласта, м;

 m_b — мощность (высота) блока, м;

п - номер суммы и номер корня;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r — горизонтальное расстояние до точки наблюдения, м;

 S_b — водоотдача блоков;

 S_f — водоотдача трещин;

 S_{v} – гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s — осредненное понижение в водоносном пласте, м;

 $T = k_f m$ – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

u – аргумент функции;

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 α_1, α_2 – параметры, 1/сут;

 β – аргумент функций;

 ζ_n – корни кубического уравнения.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (12.2.1);
- понижение для различных участков индикаторной кривой: уравнения (12.2.2) (12.2.7).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \int_{0}^{\infty} \left\{ \pi J_{0}(r\tau) \sum_{n=1}^{3} \frac{\frac{T}{\zeta_{n}} [1 - \exp(-\zeta_{n}t)]}{S_{f} + \frac{\alpha_{1}S_{b}}{\alpha_{1} - \zeta_{n}} + \frac{\alpha_{1}S_{y}}{\alpha_{2} - \zeta_{n}} + \frac{\alpha_{1}S_{b}}{(\alpha_{1} - \zeta_{n})^{2}} \zeta_{n} + \frac{\alpha_{2}S_{y}}{(\alpha_{2} - \zeta_{n})^{2}} \zeta_{n} \right\} d\tau, (12.2.1)$$

$$lpha_1 = rac{\pi^2 a_b^2}{m_b^2}, \ lpha_2 = rac{3k_f}{S_y m},$$
 ζ_n — корни уравнения $\zeta_n^3 - A_1 \zeta_n^2 + A_2 \zeta_n - A_3 = 0$,

$$A_1 = \frac{T}{S_f}\tau^2 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \frac{S_b}{S_f} + \alpha_2 \frac{S_y}{S_f},$$

$$A_2 = \frac{T}{S_f} (\alpha_1 + \alpha_2) \tau^2 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 \frac{S_y}{S_f} + \alpha_1 \alpha_2 \frac{S_b}{S_f},$$

$$A_3 = \frac{T}{S_f} \alpha_1 \alpha_2 \tau^2 .$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Различные участки индикаторной кривой (по мере сработки упругих запасов трещин, блоков и гравитационной водоотдачи водоносного пласта) аппроксимируют уравнениями для схемы Тейса (см. раздел 2.1). Горизонтальные участки (периоды ложностационарного режима) аппроксимируют функциями Бесселя. Последовательность использования этих функций следующая: понижение

на начальном участке

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r^2 S_f}{4T} \right); \tag{12.2.2}$$

для первой горизонтальной асимптоты

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(r \sqrt{\frac{\alpha_1 S_b}{T}} \right); \tag{12.2.3}$$

- для участка между двумя горизонтальными асимптотами

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{bmatrix} 2K_0 \left(r\sqrt{\frac{\alpha_2 S_y}{T}} \right) - r^2 \frac{\alpha_1 S_b - \alpha_2 S_y}{T} \times \frac{\alpha_2 S_y}{T} \right) \\ \times \int_0^\infty \exp \left(-\alpha_2 t \frac{\tau^2 + r^2 \frac{\alpha_2 S_y}{T}}{\tau^2 + r^2 \frac{\alpha_1 S_b}{T}} \right) \frac{2\tau J_0(\tau)}{\left(\tau^2 + r^2 \frac{\alpha_2 S_y}{T}\right)} d\tau \end{bmatrix}; \qquad (12.2.4)$$

- для участка перед второй горизонтальной асимптотой

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2 (S_f + S_b)}{4T} \right]; \tag{12.2.5}$$

- для второй горизонтальной асимптоты

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(r \sqrt{\frac{\alpha_2 S_y}{T}} \right) = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\sqrt{3} \frac{r}{m} \right); \tag{12.2.6}$$

для конечного участка

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[\frac{r^2 \left(S_f + S_b + S_y \right)}{4T} \right]. \tag{12.2.7}$$

Время действия данных аппроксимаций заранее неизвестно. Поэтому их можно использовать только качественно.

Способы обработки откачки

Точечный способ

Определение проводимости водоносного пласта по понижению, отвечающему второй асимптоте, на основе уравнения (12.2.6):

$$T = \frac{Q}{2\pi s} K_0 \left(\sqrt{3} \frac{r}{m} \right). \tag{12.2.8}$$

Подбор параметров

Таблица 12.2.1 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.2.1	T, S_f, a_b, S_b, S_y	$s - \lg t$
12.2.3 (первая асимптота)	T, a_b, S_b	$s - \lg r$
12.2.6 (вторая асимптота)	T	5 1 5,

12.3. Скважина в вертикальной трещине

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, неограниченный в плане;
- трещина: ограниченной длины, высота равна мощности водоносного пласта;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, находится в середине трещины;
- наблюдательная скважина: совершенная по степени вскрытия.
- типовая схема: рис. 12.4.

В зависимости от направления потока к трещине в процессе опробования рассматриваются две задачи:

- 1) псевдорадиальный поток к тещине;
- 2) линейный поток к трещине.

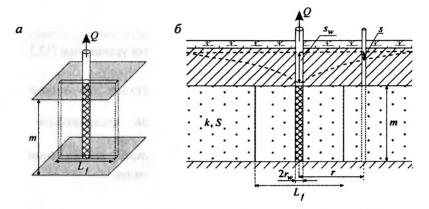


Рис. 12.4. Типовая схема для скважины в вертикальной ограниченной трещине. a – трехмерное представление; δ – разрез.

Условные обозначения:

 A, A_1, A_2 – величины, которые отсекают прямые на оси ординат;

a – пьезопроводность водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

 $C_f = \frac{\Delta V}{s_w}$ – емкостной коэффициент, м²;

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

E — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых; erf u — интеграл вероятностей (Приложение 4);

F – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $F_f(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 8);

 $F_{fw}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 9);

 L_f – длина трещины, м;

Q – расход опытной скважины, м 3 /сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;

S — водоотдача водоносного пласта;

s - понижение в наблюдательной скважине, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах или в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени, м;

 s_w — понижение в опытной скважине, м;

T – проводимость водоносного пласта, м²/сут;

t – время от начала откачки, сут;

 t_0 — длительность откачки, сут;

 t_1, t_2 – время двух замеров (для точечных способов обработки), сут;

 t_r — время от начала восстановления, сут;

u – аргумент функций, для функций F_f и F_{fw} определяется уравнением (12.3.2);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

 β – аргумент функций, для функций F_f и F_{fw} определяется уравнением (12.3.3);

 ΔV – изменение объема воды в скважине и трещине, м³;

 $\Delta \theta$ – угол между двумя прямыми, соединяющими опытную скважину и первую и вторую наблюдательные скважины, градус;

 θ — угол между направлением трещины и прямой, соединяющей опытную и наблюдательную скважины, градус;

 θ_1 , θ_2 — углы между направлениями трещины и прямыми, соединяющими опытную скважину и первую и вторую наблюдательные скважины, градус.

12.3.1. Псевдорадиальный поток к вертикальной трещине

Схема проведения опыта:

- общие условия для скважины в вертикальной трещине (см. начало раздела 12.3);

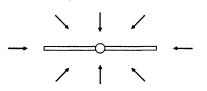


Рис. 12.5. Псевдорадиальный поток к трещине (план).

Стрелками показано направление потока.

- поток к трещине: псевдорадиальный (рис. 12.5);
- понижение определяется на одном из трех направлений: вдоль трещины (рис. 12.6, a), на перпендикуляре к середине трещины (рис. 12.6, б), на линии под углом 45° к трещине (рис. 12.6, в);
- емкость опытной скважины может учитываться;
- типовая схема: рис. 12.4.

<u>Литература:</u> Gringarten, Ramey, 1974a, b; Kruseman, Ridder, 1994 (решения, в свою очередь, взяты из: 1) Gringarten A.C., Witherspoon P.A. A method of analyzing pump test data from fractured aquifers // Int. Soc. Rock Mechanics and.... Stuttgart, 1972. Vol. 3-B. P. 1-9; 2) Ramey H.J., Jr, Gringarten A.C. Effect of high-volume vertical fractures on geothermal steam well behavior // Proceedings Decond U.N. Devel..., San Fransisco. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1976. Vol. 3. P. 1759–1762).

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (12.3.1);
- понижение для частных случаев расположения наблюдательной скважины: уравнения (12.3.4), (12.3.5) и (12.3.6);
- понижение в опытной скважине без учета емкости скважины для нестационарного периода: уравнения (12.3.7), (12.3.8) и (12.3.9);
- понижение в опытной скважине с учетом емкости скважины для нестационарного периода: уравнение (12.3.10).

Откачка с постоянным расходом

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F_f(u, \beta), \qquad (12.3.1)$$

$$u = \frac{4Tt}{SL_f^2},\tag{12.3.2}$$

$$\beta = \frac{2r}{L_f} \,. \tag{12.3.3}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

- 1. В зависимости от расположения наблюдательной скважины относительно трещины (см. рис. 12.6) понижение определяется по уравнению (12.3.1) с подстановкой в него следующих упрощений функции $F_f(u,\beta)$:
 - дл. наблюдательной скважины, находящейся на одной оси с трещиной,

$$F_f(u,\beta) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^u \left[\operatorname{erf} \frac{1-\beta}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1+\beta}{2\sqrt{\tau}} \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}; \qquad (12.3.4)$$

 для наблюдательной скважины, находящейся на одной оси с опытной скважиной, перпендикулярной трещине,

$$F_f(u,\beta) = \sqrt{\pi} \int_0^u \left[\operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4\tau}\right) \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}; \qquad (12.3.5)$$

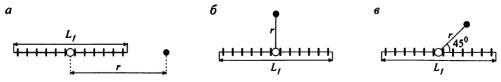


Рис. 12.6. Возможные варианты расположения наблюдательной скважины относительно трещины. a – наблюдательная скважина находится вдоль трещины, δ – на перпендикуляре к середине трещины, ϵ – под углом 45° к трещине.

 для наблюдательной скважины, находящейся на оси с опытной скважиной, расположенной под углом 45° к трещине,

$$F_f(u,\beta) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^u \left\{ \exp\left(-\frac{\beta^2}{4\tau}\right) \left\{ \operatorname{erf} \frac{1 - \frac{\beta}{\sqrt{2}}}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1 - \frac{\beta}{\sqrt{2}}}{2\sqrt{\tau}} \right\} \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}.$$
 (12.3.6)

2. Понижение в опытной скважине (без учета емкости скважины)

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left[\sqrt{\pi u} \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{u}} - W\left(\frac{1}{4u}\right) \right]. \tag{12.3.7}$$

3. Понижение в опытной скважине на ранние моменты времени (без учета емкости скважины)

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \sqrt{\pi u} = \frac{Q}{\pi T L_f} \sqrt{\frac{\pi T t}{S}}.$$
 (12.3.8)

4. Понижение в опытной скважине без учета емкости скважины на большие моменты времени $t \ge 2 \frac{SL_f^2}{T}$ (или для аргумента $u \ge 2$)

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{66.36Tt}{SL_f^2} \,. \tag{12.3.9}$$

5. Понижение в опытной скважине с учетом емкости скважины

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} F_{fw} \left(u, \frac{4C_f}{SL_f^2} \right),$$
 (12.3.10)

$$C_f = \frac{\Delta V}{s_w} \,. \tag{12.3.11}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Расчетные формулы для определения параметров

Таблица 12.3.1

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость, м ² /сут	Пьезопро- водность, м ² /сут	Длина трещины, м
$\lg s - \lg t$	$\lg F_f\left(u,\frac{r}{L_f}\right) - \lg u$	$T = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}$	$a = 10^E L_f^2$	Подбор при построении

Алгоритм обработки Gringarten-Witherspoon [Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм применяется для обработки понижений в наблюдательной скважине. Положение наблюдательной скважины определяется условиями применения уравнений (12.3.4), (12.3.5) или (12.3.6).

- 1. Строим набор эталонных кривых $\lg F_f(u,\beta) \lg \frac{u}{\beta}$ для различных значений аргумента β .
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. График фактических данных совмещаем с одной из эталонных кривых, которой соответствует аргумент β .
- 4. По определенному значению β и расстоянию до опытной скважины определяем длину трещины:

$$L_f = 2\frac{r}{\beta}.\tag{12.3.12}$$

- 5. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F_f(u,\beta)$, $\lg \frac{u}{\beta}$.
- 6. По снятым значениям $\lg s$ и $\lg F_f(u, \beta)$ определяем проводимость водоносного пласта по выражению

$$T = \frac{Q}{4\pi s} F_f(u, \beta). \tag{12.3.13}$$

- 7. По значению β и снятому значению $\lg \frac{u}{\beta}$ определяем аргумент u.
- 8. Определяем водоотдачу водоносного пласта:

$$S = \frac{Tt}{uL_f^2} \,. \tag{12.3.14}$$

Замечание

Для аргумента $\beta > 5$ обработку производят по схеме однослойного напорного изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1).

Алгоритм обработки Gringarten-Ramey [Gringarten, Ramey, 1974a; Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм применяется для обработки понижений в опытной скважине без учета емкости скважины и трещины. Алгоритм основан на уравнениях (12.3.7) и (12.3.8).

- 1. Строим эталонную кривую $\lg F \lg u$, где $F = \sqrt{\pi u} \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{u}} W\left(\frac{1}{4u}\right)$.
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s_w \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s_w$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F$, $\lg u$.
- 4. По известному значению F определяем проводимость водоносного пласта:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{...}} F. {(12.3.15)}$$

5. По уже известным значениям u, t и T определяем обобщенный параметр:

$$SL_f^2 = 4\frac{Tt}{u}. (12.3.16)$$

Замечание

Если график $s_w - \lg t$ имеет прямолинейный участок, то проводимость водоносного пласта определяется по углу наклона:

$$T = \frac{0.183Q}{C} \,. \tag{12.3.17}$$

Алгоритм обработки Ramey-Gringarten [Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм применяется для обработки понижений в опытной скважине с учетом емкости скважины и трещины. Алгоритм основан на уравнении (12.3.10).

- 1. Строим набор эталонных кривых $\lg F_{\hbar \nu}(u,\beta) \lg u$ для различных значений аргумента β .
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s_w \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. График фактических данных совмещаем с одной из эталонных кривых, которой соответствует аргумент β .
- 4. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s_w$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F_{fw}(u,\beta), \lg u$.
- 5. По снятым значениям $\lg s_w$ и $\lg F_{fw}(u,\beta)$ определяем проводимость водоносного пласта по выражению

$$T = \frac{Q}{4\pi s_w} F_{fw}(u, \beta). \tag{12.3.18}$$

6. По уже известным значениям u, t и T определяем обобщенный параметр:

$$SL_f^2 = \frac{Tt}{u}. ag{12.3.19}$$

7. По значениям β и SL_f^2 определяем емкостной коэффициент:

$$C_f = \beta S L_f^2. \tag{12.3.20}$$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{F_f\left(\frac{4at}{L_f^2}, \frac{2r_1}{L_f}\right)}{F_f\left(\frac{4at}{L_f^2}, \frac{2r_2}{L_f}\right)}.$$
 (12.3.21)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы. В зависимости от положения наблюдательной скважины функция в правой части уравнения (12.3.21) определяется по уравнениям (12.3.4), (12.3.5) или (12.3.6).

Подбор параметров

Таблица 12.3.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.3.1	T, S	$s-\lg t$
12.3.21	а	$s_1/s_2 - \lg t$

12.3.2. Линейный поток к трещине

Схема проведения опыта:

- общие условия для скважины в вертикальной трещине (см. начало раздела 12.3);
- поток к трещине: линейный, перпендикулярный к трещине (рис. 12.7);
- емкость трещины и опытной скважины не учитывается;
- понижение определяется в водоносном пласте;
- типовая схема: рис. 12.4 и рис. 12.7.

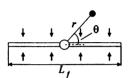


Рис. 12.7. Линейный поток к трещине (план). Стрелками показано направление потока.

Литература: Jenkins, Prentice, 1982.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода: уравнение (12.3.22);
- понижение для квазистационарного периода: уравнение (12.3.23);
- понижение в опытной скважине для квазистационарного периода: уравнение (12.3.24).

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{2L_f T} \left\{ \sqrt{\frac{4at}{\pi}} \exp \left[-\frac{(r\sin\theta)^2}{4at} \right] + r\sin\theta \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r\sin\theta)^2}{4at}} - 1 \right] \right\}. \tag{12.3.22}$$

Уравнения для квазистационарного периода

Понижение в наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{2L_f T} \left(\sqrt{4at/\pi} - r\sin\theta \right). \tag{12.3.23}$$

Частный случай для квазистационарного периода

Понижение в опытной скважине

$$s_{w} = \frac{Q}{L_{f}\sqrt{\pi TS}}\sqrt{t} . \qquad (12.3.24)$$

***** Способы обработки откачки

Способ прямой линии

Таблица 12.3.3 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$s-\sqrt{t}$	$T = \frac{Qr\sin\theta}{2L_f A}$	$a = \frac{\pi}{4} \left(\frac{C}{A} r \sin \theta \right)^2$
Площадное прослеживание	s - r	$T = \frac{Q}{2L_f C} \sin \theta$	$a = \frac{\pi}{4t} \left(\frac{A}{C} \sin \theta \right)^2$
		Обобщен	ный параметр
Временное прослеживание	$s_w - \sqrt{t}$	\sqrt{TS} :	$= \frac{Q}{\sqrt{\pi} L_f C}$

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sqrt{\frac{4at}{\pi}} \exp\left[-\frac{(r_1 \sin \theta_1)^2}{4at}\right] + r_1 \sin \theta_1 \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r_1 \sin \theta_1)^2}{4at}} - 1 \right]}{\sqrt{\frac{4at}{\pi}} \exp\left[-\frac{(r_2 \sin \theta_2)^2}{4at}\right] + r_2 \sin \theta_2 \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r_2 \sin \theta_2)^2}{4at}} - 1 \right]}.$$
(12.3.25)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы (используются понижения квазистационарного периода)

1. Способ разности понижений

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2L_f T} \left(\sqrt{\frac{4at_1}{\pi}} - r_1 \sin \theta_1 - \sqrt{\frac{4at_2}{\pi}} + r_2 \sin \theta_2 \right). \tag{12.3.26}$$

Определение параметров двумя способами:

 определение проводимости по разности понижений в двух наблюдательных скважинах на один момент времени:

$$T = \frac{Q}{2L_f(s_1 - s_2)} (r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1), \qquad (12.3.27)$$

— определение обобщенного параметра T/\sqrt{a} по разности понижений в одной наблюдательной скважине на разные моменты времени:

$$\frac{T}{\sqrt{a}} = \frac{Q}{L_f \sqrt{\pi} (s_1 - s_2)} \left(\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2} \right). \tag{12.3.28}$$

2. Способ отношения понижений (подбор пьезопроводности):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sqrt{4at_1/\pi - r_1\sin\theta_1}}{\sqrt{4at_2/\pi - r_2\sin\theta_2}}.$$
 (12.3.29)

Подбор параметров

Таблица 12.3.4

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.3.22	T, a	$s-\lg t$
12.3.25	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Замечание

Уравнение (12.3.28) удобно использовать при неизвестном направлении трещины, а уравнения (12.3.25) и (12.3.29) – при неизвестной длине трещины.

<u>Алгоритм определения положения наблюдательных скважин относительно трещины</u> (при неизвестном направлении трещины) [Jenkins, Prentice, 1982]

- 1. По двум наблюдательным скважинам построим графики временного прослеживания $s \sqrt{t}$.
- 2. Графики аппроксимируем прямыми линиями и определим величины, которые отсекают прямые на оси ординат для первой и второй скважин (A_1 и A_2).
- 3. На основе равенства

$$\frac{r_1 \sin \theta_1}{A_1} = \frac{r_2 \sin \theta_2}{A_2} \tag{12.3.30}$$

определим угол θ_1 . При расположении наблюдательных скважин по одну сторону от трещины (рис. 12.8, a)

$$\theta_1 = \arctan \frac{r_2 A_1 \sin \Delta \theta}{r_2 A_1 \cos \Delta \theta - r_1 A_2}; \qquad (12.3.31)$$

при расположении наблюдательных скважин по разные стороны от трещины (рис. $12.8, \delta$)

$$\theta_1 = \arctan \frac{r_2 A_1 \sin \Delta \theta}{r_2 A_1 \cos \Delta \theta + r_1 A_2}.$$
 (12.3.32)

4. Определим угол θ_2 . При расположении наблюдательных скважин по одну сторону от трещины $\theta_2 = \theta_1 - \Delta \theta$. При расположении наблюдательных скважин по разные стороны от трещины $\theta_2 = \Delta \theta - \theta_1$.

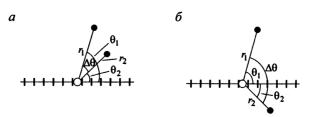


Рис. 12.8. Схема для определения положения трещины по двум наблюдательным скважинам (плаи). Наблюдательные скважины находятся по одну (a) или по разные стороны трещины (b).

Восстановление уровня

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации

Восстановление уровня в наблюдательной скважине:

$$s = \frac{Q}{2L_{f}T} \left\{ \sqrt{\frac{4a(t_{0} + t_{r})}{\pi}} \exp\left[-\frac{(r\sin\theta)^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}\right] - \sqrt{\frac{4at_{r}}{\pi}} \exp\left[-\frac{(r\sin\theta)^{2}}{4at_{r}}\right] + r\sin\theta \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r\sin\theta)^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}} - \operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r\sin\theta)^{2}}{4at_{r}}} \right] \right\}. \quad (12.3.33)$$

Уравнение для квазистационарного периода

Восстановление уровня в наблюдательной скважине:

$$s = \frac{Q}{L_f T} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \left(\sqrt{t_0 + t_r} - \sqrt{t_r} \right). \tag{12.3.34}$$

🌣 Способы обработки восстановления как понижения от начала откачки

Способ прямой линии

Таблица 12.3.5

Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Обобщенный параметр
Временное прослеживание	$s - \left(\sqrt{t_0 + t_r} - \sqrt{t_r}\right)$	$\frac{T}{\sqrt{a}} = \frac{Q}{L_f C \sqrt{\pi}}$

Подбор параметров

Таблица 12.3.6

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.3.33	T, a	$s - \lg t_r$

12.4. Скважина в вертикальной дайке

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, неограниченный в плане;
- дайка: бесконечной протяженности, ширина не превышает 10 м; проницаемость дайки больше проницаемости водоносного пласта не менее чем в 25 раз;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, представляет собой плановый источник, длина которого равна ширине дайки; емкостью опытной скважины пренебрегаем;

- понижение определяется в дайке на ее оси симметрии (рис. 12.9, в) или в водоносном пласте на оси симметрии планового источника (рис. 12.9, г);
- типовая схема: рис. 12.9.

<u>Литература:</u> Kruseman, Ridder, 1994 (решения, в свою очередь, взяты из: 1) Boonstra J., Boehmer W.K. Analysis of data form aquifer and well tests in intrusive dikes // J. Hydrol. 1986. Vol. 88. P. 301–307; 2) Boehmer W.K., Boonstra J. Flow to wells in intrusive dikes. Ph.D. Thesis, Free University. Amsterdam, 1986; 3) Boehmer W.K., Boonstra J. Analysis of drawdown in the country rock of composite dike aquifers // J. Hydrol. 1987. Vol. 94. P. 199–214).

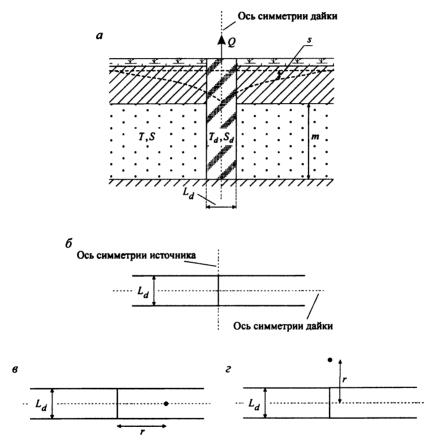


Рис. 12.9. Типовая схема для планового источника, расположенного в дайке. a — разрез; δ , ϵ , ϵ — план: ϵ — наблюдательная скважина расположена вдоль дайки, ϵ — перпендикулярно источнику.

Условные обозначения:

- A величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);
- a пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;
- С угол наклона прямой (для способа прямой линии);
- $D\,$ расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

E — расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых; erf u — интеграл вероятностей (Приложение 4);

F – вспомогательная функция для построения эталонной кривой;

 $F_d(u) = F_d(u,\beta)$ при $\beta = 0$;

 $F_d(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 38);

 L_d – ширина дайки, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_1, r_2 — расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, расположенных в водоносном пласте, м;

S — водоотдача водоносного пласта;

 S_d — водоотдача дайки;

s - понижение в наблюдательной скважине, расположенной в водоносном пласте, м;

 s_1, s_2 — понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, расположенных в водоносном пласте, м;

 s_d – понижение в наблюдательной скважине, расположенной дайке, м;

 s_w – понижение в опытной скважине (в плановом источнике), м;

T – проводимость водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

 T_d – проводимость дайки, м²/сут;

t — время от начала откачки, сут;

u – аргумент функций; для функции F_d определяется равенством (12.4.3);

u' – вспомогательный аргумент функции для построения эталонной кривой;

 β – аргумент функции; для функции F_d определяется равенством (12.4.4).

Список решений (для нестационарного периода):

- понижение в дайке: уравнение (12.4.1);
- понижение в водоносном пласте: уравнение (12.4.5);
- понижение в опытной скважине: уравнения (12.4.7), (12.4.9), (12.4.10) и (12.4.11).

Откачка с постоянным расходом

🌣 Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

 Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в дайке на ее оси симметрии и перпендикулярно плановому источнику,

$$s_d = \frac{Q}{3.75\sqrt{T_d ST/S_d}} F_d(u, \beta),$$
 (12.4.1)

$$F_d(u,\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-2\sqrt{u}\right) \int_0^{u} \exp\left[2\sqrt{u-\tau^2} - \frac{\beta^2}{4\tau^2}\right] d\tau , \qquad (12.4.2)$$

$$u = 3.52 \frac{ST}{(L_d S_d)^2} t, (12.4.3)$$

$$\beta = 1.88 \frac{r}{L_d} \sqrt{\frac{ST}{S_d T_d}} \ . \tag{12.4.4}$$

Уравнение (12.4.1) выполнимо при $t < 0.28 \frac{S(L_d T_d)^2}{4T^3}$.

2. Понижение в наблюдательной скважине, расположенной в водоносном пласте, перпендикулярно дайке и на оси симметрии планового источника,

$$s = s_w \left\{ \exp\left(-\frac{1}{4}r^2 \frac{S}{Tt}\right) - \frac{1}{2}r\sqrt{\frac{\pi S}{Tt}} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2}r\sqrt{\frac{S}{Tt}}\right)\right] \right\}$$
 (12.4.5)

или

$$s = s_w \left\{ \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - \sqrt{\pi \frac{r^2}{4at}} \left[1 - \operatorname{erf}\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right] \right\}. \tag{12.4.6}$$

Уравнения (12.4.5) и (12.4.6) выполнимы при $t < 0.28 \frac{S(L_d T_d)^2}{4T^3}$.

3. Понижение в опытной скважине на ранние и средние моменты времени

$$s_{w} = \frac{Q}{3.75\sqrt{T_{d}ST/S_{d}}}F_{d}(u), \qquad (12.4.7)$$

$$F_d(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-2\sqrt{u}\right) \int_0^{u} \exp\left(2\sqrt{u-\tau^2}\right) d\tau .$$
 (12.4.8)

Функция $F_d(u)$ равна функции $F_d(u,\beta)$ при параметре $\beta=0$.

Аппроксимации уравнения (12.4.7):

 понижение в опытной скважине на начальные моменты времени, когда понижение формируется за счет емкостных запасов дайки,

$$s_w = \frac{Q}{L_d \sqrt{\pi T_d S_d}} \sqrt{t} , \qquad (12.4.9)$$

уравнение (12.4.9) выполнимо при $t < 0.00085 \frac{(L_d S_d)^2}{ST}$ (или $u \le 0.003$);

- понижение в опытной скважине на средние моменты времени

$$s_w = \frac{Q}{2.74\sqrt{L_d T_d}} \sqrt[4]{\frac{t}{ST}}, \qquad (12.4.10)$$

уравнение (12.4.10) выполнимо при $t < 28.41 \frac{(L_d S_d)^2}{ST}$ (или $u \le 100$).

4. Понижение в опытной скважине для длительных периодов времени

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{40T^{3}t}{SI^{2}T^{2}},$$
 (12.4.11)

Уравнение (12.4.11) справедливо для
$$t > 50 \frac{S(L_d S_d)^2}{4T^3}$$
.

Замечание

Время, при котором решения (12.4.9) и (12.4.10) для понижения в опытной скважине на ранние и средние моменты времени выполняются, можно определить из графика $\lg s_w - \lg t$. Для ранних моментов это время соответствует временному интервалу, где угол наклона прямолинейного участка равен 0.5. Для средних моментов временной интервал определяется из этого же графика по второму прямолинейному участку с наклоном 0.25.

***** Способы обработки откачки

Обработка понижений в наблюдательной скважине, расположенной в дайке Алгоритм обработки Boonstra—Boehmer (1986) [Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм основан на уравнении (12.4.1).

- 1. Строим набор эталонных кривых $\lg F_d(u,\beta) \lg u$ для различных значений аргумента β .
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s_d \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. График фактических данных совмещаем с одной из эталонных кривых, которой соответствует аргумент $\boldsymbol{\beta}$.
- 4. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s_d$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F_d(u,\beta)$, $\lg u$.
- 5. Комбинируя известные и полученные значения, определяем следующие величины: проводимость дайки T_d , водоотдачу дайки S_d и обобщенный параметр для водоносного пласта ST.

Значения рассчитываем на основе уравнений (12.4.1), (12.4.3) и (12.4.4). Можно предложить следующий порядок расчета: определить

проводимость дайки:

$$T_d = \frac{QF_d(u,\beta)r}{2s_d L_d \beta}; \qquad (12.4.12)$$

водоотдачу дайки:

$$S_d = \frac{\beta^2 t T_d}{u r^2}; {12.4.13}$$

 обобщенный параметр для водоносного пласта по любой части следующего равенства:

$$ST = \frac{S_d^2 L_d^2 u}{3.52t} = S_d T_d \left(\frac{L_d \beta}{1.88r} \right)^2 = \frac{S_d}{T_d} \left(\frac{Q F_d (u, \beta)}{3.75 s_d} \right)^2.$$
 (12.4.14)

Способ эталонной кривой

Таблица 12.4.1 Расчетные формулы для определения параметров

График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость дайки, м ² /сут	Водоотдача дайки
$\lg s - \lg t$	$\lg F_d(u,\beta) - \lg u$	$T_d = \frac{Qr}{2\beta L_d \cdot 10^D}$	$S_d = \frac{\beta^2 T_d}{r^2 \cdot 10^E}$

Примечание. График эталонной кривой строится для заданного аргумента β . По полученным фильтрационным параметрам дайки можно рассчитать обобщенный параметр для водоносного пласта: $ST = S_d T_d \bigg(\frac{\beta L_d}{1.88r} \bigg)^2$.

Подбор параметров

Таблица 12.4.2 Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.4.1	T_d, S_d, T, S	$s - \lg t$

Обработка понижений в наблюдательной скважине, расположенной в водоносном пласте

Алгоритм обработки Boehmer-Boonstra [Kruseman, Ridder, 1994]

Алгоритм основан на уравнении (12.4.5). Для расчета необходимы данные о понижении уровня в опытной скважине.

- 1. Строим эталонную кривую $\lg F \lg \frac{1}{u'^2}$, где $F = \exp(-u'^2) u' \sqrt{\pi} [1 \operatorname{erf} u']$, $u' = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} = \frac{r}{2\sqrt{at}}$.
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg \frac{s}{s_w} \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg \frac{S}{S_w}$, $\lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F$, $\lg u$.
- 4. Определим пьезопроводность водоносного пласта:

$$a = \frac{r^2}{4u'^2t} \,. \tag{12.4.15}$$

1.

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\exp\left(-\frac{r_1^2}{4at}\right) - \sqrt{\frac{\pi r_1^2}{4at}} \left(1 - \operatorname{erf}\sqrt{\frac{r_1^2}{4at}}\right)}{\exp\left(-\frac{r_2^2}{4at}\right) - \sqrt{\frac{\pi r_2^2}{4at}} \left(1 - \operatorname{erf}\sqrt{\frac{r_2^2}{4at}}\right)}.$$
(12.4.16)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Подбор параметров

Таблица 12.4.3

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.4.5	T, S	$s-\lg t$
12.4.16	а	$s_1/s_2 - \lg t$

Обработка понижений в опытной скважине на ранние и средние моменты времени

Алгоритм обработки Boonstra—Boehmer [Kruseman, Ridder, 1994] Алгоритм основан на уравнении (12.4.7).

- Строим эталонную кривую $\lg F_d(u) \lg u$.
- 2. Строим график по фактическим данным: $\lg s_w \lg t$. При этом масштаб координатных осей графика должен совпадать с масштабом графика эталонной кривой.
- 3. На совмещенных графиках берем произвольную точку P, координатам которой на фактическом графике будут соответствовать значения $\lg s_w, \lg t$, а на графике эталонной кривой $\lg F_d(u), \lg u$.
- 4. Определим обобщенный параметр для дайки:

$$S_d T_d = \frac{3.52t}{L_d^2 u} \left(\frac{Q F_d(u)}{3.75 s_w} \right)^2.$$
 (12.4.17)

5. Если начальный участок фактической кривой имеет наклон 0.5, то по точке P, взятой на этом участке, можно определить обобщенный параметр для дайки:

$$S_d T_d = \frac{Q^2 t}{\pi S_w L_d^2} \,. \tag{12.4.18}$$

6. Если средний участок фактической кривой имеет наклон 0.25, то по точке P, взятой на этом участке, можно определить обобщенный параметр для водоносного пласта при известной проницаемости дайки T_d :

$$ST = \frac{Q^4 t}{56.36s_{\perp}^4 L_d^2 T_d^2} \tag{12.4.19}$$

или при известном значении обобщенного параметра для водоносного пласта определить проницаемость дайки:

$$T_d = \frac{Q^2 \sqrt{t}}{7.5s_w^2 L_d \sqrt{TS}} \,. \tag{12.4.20}$$

Способ прямой линии

Расчетные формулы для определения параметров по понижениям в опытной скважине даны в табл. 12.4.4 и 12.4.5.

Таблица 12.4.4 Определение обобщенного параметра для дайки по начальным замерам

-		-
Способ обработки	График	Обобщенный параметр
D	$\lg s_w - \lg t$	$S_d T_d = \frac{Q^2}{\pi L_d^2 \cdot 10^{2A}}$
Временное прослеживание	$s_w^2 - t$	$S_d T_d = \frac{Q^2}{\pi L_d^2 C}$

Таблица 12.4.5 Определение обобщенного параметра для водоносного пласта по замерам на средние моменты времени при известной проницаемости дайки T_d

Способ обработки	График	Обобщенный параметр
Provenue montaname	$\lg s_w - \lg t$	$ST = \frac{Q^4}{56.36L_d^2 T_d^2 \cdot 10^{4A}}$
Временное прослеживание	$s_w^4 - t$	$ST = \frac{Q^4}{56.36L_d^2 T_d^2 C}$

Примечание. Здесь возможно определение проницаемости дайки при известном значении обобщенного параметра для водоносного пласта.

Подбор параметров

Таблица 12.4.6 Подбираемые параметры и рекомендуемый график

		* *
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.4.7	T_d, S_d, T, S	$s_w - \lg t$

Обработка понижений в опытной скважине на длительные моменты времени

Способ прямой линии (основан на уравнении (12.4.11) [Kruseman, Ridder, 1994].)

Таблица 12.4.7 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут
Временное прослеживание	$s_w - \lg t$	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Подбор параметров

Таблица 12.4.8

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.4.11	T_d, T, S	$s_w - \lg t$

12.5. Скважина в горизонтальной трещине

Схема проведения опыта:

- водоносный комплекс: неограниченный в плане, состоит из двух горизонтальных слоев
 блок и трещина;
- блок: напорный или безнапорный, расположен над трещиной, изотропный;
- высота блока больше мощности (высоты) трещины;
- проницаемость блока намного меньше проницаемости трещины;
- понижение определяется в блоке или в трещине;
- типовые схемы: рис. 12.10.

Рассматривается три варианта:

- вариант 1: безнапорный двухслойный комплекс, уровень грунтовых вод находится в блоке, фильтр скважины расположен в трещине, длина фильтра равна мощности трещины;
- вариант 2: напорный двухслойный комплекс, фильтр скважины расположен в трещине, длина фильтра равна мощности трещины;
- вариант 3: напорный двухслойный комплекс, опытная скважина совершенна по степени вскрытия (длина фильтра равна сумме мощностей блока и трещины).

<u>Литература:</u> Boulton, Streltsova, 1977a, b, 1978; Streltsova, 1988.

Условные обозначения:

 $a_b = T_b / S_b$ — пьезопроводность блока, м²/сут;

 $a_f = T_f / S_f$ – пьезопроводность трещины, м²/сут;

D – расстояние между осями ординат графиков фактической и эталонной кривых;

Е – расстояние между осями абсцисс графиков фактической и эталонной кривых;

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

 k_b – коэффициент фильтрации блока, м/сут;

 k_f – коэффициент фильтрации трещины, м/сут;

 m_b — начальная обводненная мощность блока (для безнапорного пласта) или мощность блока (для напорного блока), м;

 m_f – высота (мощность) трещины, м;

n – номер суммы и номер корня;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 S_h — водоотдача блока;

- S_{f} водоотдача трещины;
- s_b понижение в наблюдательной скважине, находящейся в блоке, м;
- s_f понижение в наблюдательной скважине, находящейся в трещине, м;
- s_{mb} понижение в блоке на период стационара, м;

а

 s_{mf} — понижение в трещине на период стационара, м;

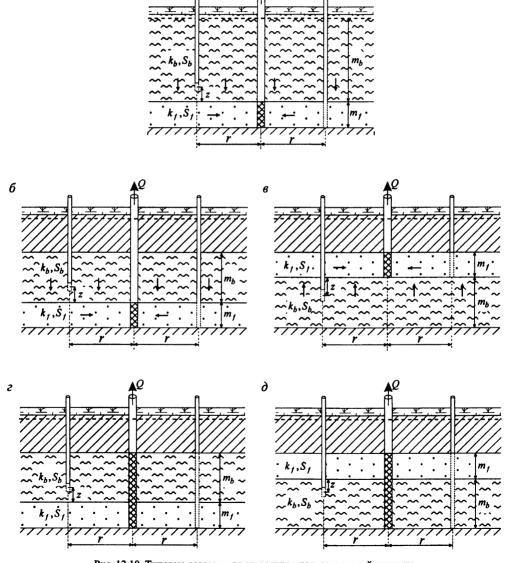


Рис. 12.10. Типовые разрезы для скважины в горизонтальной трещине. а – безнапорный режим в блоке (вариант 1); б, в – напорный режим в блоке (вариант 2); г, д – напорный режим в блоке: скважина находится в блоке и трещине (вариант 3). Стрелками показаны направления потока.

 $T_b = k_b m_b$ — проводимость блока, м²/сут;

 $T_f = k_f m_f$ – проводимость трещины, м²/сут;

$$u = \frac{4a_f t}{r^2} = \frac{4T_f t}{r^2 S_f}$$
 — безразмерный параметр;

z — вертикальное расстояние от границы между блоком и трещиной до точки наблюдения, м; β — аргумент функций;

 ζ_n — положительные корни уравнения $\zeta_n(C_1\zeta_n-\cot \alpha\zeta_n)=C_2$, C_1 , C_2 — константы;

 ζ_n' – положительные корни уравнения $\zeta_n(C_1\zeta_n + \tan\zeta_n) = (C_2 - C_1)C_3$, C_1, C_2, C_3 – константы.

Список решений

Вариант 1 (безнапорный пласт):

- понижение в трещине для нестационарного периода: уравнения (12.5.1) и (12.5.4);
- понижение в блоке для нестационарного периода: уравнения (12.5.2) и (12.5.5);
- понижение в трещине для стационарного периода: уравнение (12.5.6);
- понижение в блоке для стационарного периода: уравнение (12.5.7).

Вариант 2 (напорный пласт):

- понижение в трещине для нестационарного периода: уравнения (12.5.8) и (12.5.10);
- понижение в блоке для нестационарного периода: уравнения (12.5.9) и (12.5.11).
 Вариант 3 (напорный пласт, совершенная скважина):
- понижение в трещине для нестационарного периода: уравнение (12.5.12);
- понижение в блоке для нестационарного периода: уравнения (12.5.13).

12.5.1. Безнапорный пласт

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижения в трещине и в блоке (см. рис. 12.10, а)

$$s_{f} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-0.25\zeta_{n}^{2} \frac{a_{b}r^{2}}{a_{f}m_{b}^{2}} u \right)}{\zeta_{n}^{2} \frac{S_{f}}{S_{b}} - 0.5\zeta_{n} \left(\cot \alpha \zeta_{n} - \zeta_{n} \csc^{2} \zeta_{n} \right)} d\tau, \quad (12.5.1)$$

$$s_b = \frac{Q}{2\pi T_f} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\frac{r}{m_b} \sqrt{\frac{T_b}{T_f}} \tau \right) \sum_{n=1}^\infty \left[\frac{1 - \exp\left(-0.25\zeta_n^2 \frac{a_b r^2}{a_f m_b^2} u \right)}{\zeta_n^2 \frac{S_f}{S_b} - 0.5\zeta_n \left(\cot \alpha \zeta_n - \zeta_n \csc^2 \zeta_n \right)} \times \left(\cos \frac{\zeta_n z}{m_b} - \cot \alpha \zeta_n \sin \frac{\zeta_n z}{m_b} \right) \right] d\tau, \quad (12.5.2)$$

где

$$u = \frac{4a_f t}{r^2},\tag{12.5.3}$$

$$\zeta_n$$
 — положительные корни уравнения $\zeta_n \left(\frac{S_f}{S_b} \zeta_n - \cot \alpha \zeta_n \right) = \tau^2$.

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Для несжимаемого блока ($S_b = 0, a_b = \infty$) уравнения понижений в трещине и в блоке следующие:

$$s_{f} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-0.25\left(\tau^{2} + 1\right) \frac{r^{2} T_{b}}{m_{b}^{2} T_{f}} u\right)}{\tau^{2} + 1} d\tau , \qquad (12.5.4)$$

$$s_{b} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \left(1 - \frac{z}{m_{b}} \right) \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-0.25 \left(\tau^{2} + 1 \right) \frac{r^{2} T_{b}}{m_{b}^{2} T_{f}} u \right)}{\tau^{2} + 1} d\tau . \quad (12.5.5)$$

Уравнения для периода стационара

Понижения в трещине и в блоке

$$s_{mf} = \frac{Q}{2\pi T_f} K_0 \left(\frac{r}{m_b} \sqrt{\frac{T_b}{T_f}}\right),$$
 (12.5.6)

$$s_{mb} = \frac{Q}{2\pi T_f} \left(1 - \frac{z}{m_b} \right) K_0 \left(\frac{r}{m_b} \sqrt{\frac{T_b}{T_f}} \right). \tag{12.5.7}$$

***** Способы обработки откачки

Способ эталонной кривой

Таблица 12.5.1 Расчетные формулы для определения параметров

I I V V V V V V V V V V V V V V V V V V			
График фактической кривой	График эталонной кривой	Проводимость трещины, м ² /сут	Проводимость блока, м ² /сут
$\lg s_{mf} - \lg r$	(2)	$T_f = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}$	(5/2
$\lg s_{mb} - \lg r$	$\lg K_0(oldsymbol{eta}) - \lg oldsymbol{eta}$	$T_f = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D} \left(1 - \frac{z}{m_b} \right)$	$T_b = T_f \left(m_b \cdot 10^E \right)^2$

Точечные способы

Определение подбором проводимости трещины и блока по замерам понижения на период стационара в трещине или блоке: на основе уравнения (12.5.6) или (12.5.7).

Подбор параметров

Таблица 12.5.2

Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.5.1	T_f, S_f, T_b, S_b	$s_f - \lg t$
12.5.2	1 f, 5 f, 1 b, 5 b	$s_b - \lg t$
12.5.4	T_f, S_f, T_b	$s_f - \lg t$
12.5.5	17,57,16	$s_b - \lg t$
12.5.6	T_f, T_b	$s_{mf} - \lg r$
12.5.7		$s_{mb} - \lg r$

12.5.2. Напорный пласт

Откачка с постоянным расходом

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижения в трещине и в блоке (см. рис. 12.10, 6, 6)

$$s_{f} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-0.25\zeta_{n}^{2} \frac{a_{b}r^{2}}{a_{f}m_{b}^{2}} u \right)}{\zeta_{n}^{2} \frac{S_{f}}{S_{b}} + 0.5\zeta_{n} \left(\tan \zeta_{n} + \zeta_{n} \sec^{2} \zeta_{n} \right)} d\tau , \qquad (12.5.8)$$

$$s_{b} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - \exp\left(-0.25\zeta_{n}^{2} \frac{a_{b}r^{2}}{a_{f}m_{b}^{2}} u \right)}{\zeta_{n}^{2} \frac{S_{f}}{S_{b}} + 0.5\zeta_{n} \left(\tan \zeta_{n} + \zeta_{n} \sec^{2} \zeta_{n} \right)} \times \left(\cos \frac{\zeta_{n}z}{m_{b}} + \tan \zeta_{n} \sin \frac{\zeta_{n}z}{m_{b}} \right) \right] d\tau . \quad (12.5.9)$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

Для несжимаемой трещины ($S_f = 0, a_f = \infty$) уравнения понижений в трещине и в блоке следующие:

$$s_{f} = \frac{Q}{2\pi T_{f}} \int_{0}^{\infty} \tau U_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \sqrt{\frac{T_{b}}{T_{f}}} \tau \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-0.25 \zeta_{n}^{2} \frac{r^{2} T_{b}}{m_{b}^{2} T_{f}} u \right)}{0.5 \left[\tau^{2} \left(1 + \tau^{2} \right) + \zeta_{n}^{2} \right]} d\tau , \qquad (12.510)$$

$$s_b = \frac{Q}{2\pi T_f} \int_0^\infty \tau J_0 \left(\frac{r}{m_b} \sqrt{\frac{T_b}{T_f}} \tau \right) \sum_{n=1}^\infty \left\{ \frac{1 - \exp\left(-0.25 \zeta_n^2 \frac{r^2 T_b}{m_b^2 T_f} u \right)}{0.5 \left[\tau^2 \left(1 + \tau^2 \right) + \zeta_n^2 \right]} \times \right\} d\tau . \tag{12.5.11}$$

$$\times \left(\cos \frac{\zeta_n z}{m_b} + \tan \zeta_n \sin \frac{\zeta_n z}{m_b} \right)$$

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 12.5.3 Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	. График
12.5.8	T_f, S_f, T_b, S_b	$s_f - \lg t$
12.5.9		$s_b - \lg t$
12.5.10	TST	$s_f - \lg t$
12.5.11	T_f, S_f, T_b	$s_b - \lg t$

12.5.3. Напорный пласт, совершенная скважина

Откачка с постоянным расходом

❖ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Понижения в трещине и в блоке (см. рис. $12.10, \epsilon, \delta$)

$$s_{f} = \frac{Q}{2\pi (T_{f} + T_{b})} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}} \tau\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left[-0.25 \frac{a_{b} r^{2}}{a_{f} m_{b}^{2}} (\tau^{2} + \zeta_{n}^{\prime 2}) u\right]}{-(\tau^{2} + \zeta_{n}^{\prime 2})} \times \frac{1 + \frac{T_{b} \tan \zeta_{n}^{\prime}}{T_{f} \zeta_{n}^{\prime}}}{\frac{a_{b}}{a_{f}} + \frac{T_{b}}{2T_{f}} \left(\frac{\tan \zeta_{n}^{\prime}}{\zeta_{n}^{\prime}} + \sec^{2} \zeta_{n}^{\prime}\right)} \right\} d\tau, \quad (12.5.12)$$

$$s_{b} = \frac{Q}{2\pi(T_{f} + T_{b})} \int_{0}^{\infty} \tau J_{0} \left(\frac{r}{m_{b}}\tau\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-0.25 \frac{a_{b}r^{2}}{a_{f}m_{b}^{2}} \left(\tau^{2} + \zeta_{n}^{\prime 2}\right)u\right)}{1 + \frac{T_{b} \tan \zeta_{n}^{\prime}}{T_{f}\zeta_{n}^{\prime}}} \times \frac{1 + \frac{T_{b} \tan \zeta_{n}^{\prime}}{T_{f}\zeta_{n}^{\prime}}}{\frac{a_{b}}{a_{f}} + \frac{T_{b}}{2T_{f}} \left(\frac{\tan \zeta_{n}^{\prime}}{\zeta_{n}^{\prime}} + \sec^{2} \zeta_{n}^{\prime}\right)} \times \frac{d\tau, \quad (12.5.13)}{\cos \zeta_{n}^{\prime}}$$

где
$$\zeta_n'$$
 — положительные корни уравнения $\zeta_n \left(\frac{S_f}{S_b} \zeta_n + \tan \zeta_n \right) = \left(\frac{T_f}{T_b} - \frac{S_f}{S_b} \right) \tau^2$.

Способы обработки откачки

Подбор параметров

Таблица 12.5.4 Полбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
12.5.12	T_f, S_f, T_b, S_b	$s_f - \lg t$
12.5.13	1,5,7,16,56	$s_b - \lg t$

РАЗДЕЛ 13. ГРУППОВАЯ ОТКАЧКА И ПЕРЕМЕННЫЙ РАСХОД

Все аналитические зависимости и способы обработки данных опытных опробований, приведенные в предыдущих разделах, предполагали одну опытную скважину с постоянным расходом или с постоянным понижением в ней в процессе всего опробования. В данном разделе рассматриваются решения при опробовании водоносных пластов несколькими опытными скважинами, расход в которых может произвольно меняться во времени. Решения, в основном, рассматриваются на примере схемы неограниченного напорного изотропного водоносного пласта (см. раздел 2.1).

Условные обозначения:

A – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

$$B_{\gamma} = \sqrt{\frac{a}{\gamma}}$$
 – коэффициент, м;

С – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

 $\operatorname{erfc} \beta$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $f(r_i,t)$ – функция, описывающая расчетную гидрогеологическую схему;

 $G(\beta)$ – специальная функция (Приложение 15);

i=1,2,...,N — номер опытной скважины; i=1,2,...,n — номер цикла при цикличноработающей скважине;

 $j = 1, 2, ..., n_i^j$ – номер скачка изменения расхода;

 $K_0(\beta)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка (Приложение 2);

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

М - количество фиктивных скважин для ограниченных и полуограниченных пластов;

N – количество опытных скважин;

 N_t – количество опытных скважин, которые работают на момент времени t;

n – количество циклов на момент определения понижения;

 n_{j} — количество ступеней изменения понижения на момент времени t;

 n_1^j – количество скачков на момент времени t при наличии одной опытной скважины;

 n_i^j – количество скачков *i*-й опытной скважины на *j*-й скачок;

P — постоянная величина, которая зависит от фильтрационных свойств опробуемого водоносного пласта и расчетной гидрогеологической схемы;

- Q расход опытной скважины (меняется во времени), м³/сут;
- Q_0 начальный расход опытной скважины, м³/сут;
- Q_i расход i-й опытной скважины при откачке с постоянным расходом; при откачке с кусочно-постоянным понижением расход i-й опытной скважины на момент времени t, м 3 /сут;
- Q_m расход опытной скважины на конец откачки, м³/сут;
- Q_t обобщенный расход опытных скважин, зависит от количества опытных скважин и изменения расхода в них, м³/сут;
- Q_i^j расход *j*-го скачка *i*-й опытной скважины, м³/сут;
- Q_1^{j} расход *j*-го скачка ($Q_1^{0} = 0$) при наличии одной опытной скважины, м³/сут;
- Q_{Σ} суммарный расход опытных скважин на момент времени t при откачке с кусочно-постоянным понижением: определяется уравнением (13.3.4), м³/сут;
- r расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м; проведения опыта, м;
- r_1, r_2 расстояния от опытной скважины до первой и второй наблюдательных скважин, м;
- r_i расстояние от наблюдательной скважины до i-й опытной скважины, м;
- $r_{i,1}, r_{i,2}$ расстояние от первой и второй наблюдательных скважин до i-й опытной скважины, м;
- r_w радиус опытной скважины, м;
- r' приведенное расстояние до наблюдательной скважины, определяется условием s понижение в наблюдательной скважине, м;
- s_1, s_2 понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;
- s_w^J понижение на j-й скачок при откачке с кусочно-постоянным понижением, м;
- T проводимость водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;
- t время от начала откачки, сут;
- t_{i} время начала j-го скачка для кусочно-постоянного понижения, сут;
- t_m длительность откачки, сут;
- t_1^{j} время начала j-го скачка ($t_1^{1}=0$) при наличии одной опытной скважины, сут;
- t_i время начала работы опытной скважины при асинхронном начале эксплуатации скважин; при циклично-работающей скважине длительность откачки i-го цикла, сут;
- t_{i}^{j} время начала j-го скачка i-й опытной скважины ($t_{i}^{1}=0$), сут;
- t' приведенное время опыта, определяется условием проведения опыта, сут;
- t_{i}' длительность восстановления i-го цикла при циклично-работающей скважине, сут;
- $u = \frac{r^2}{4at}$ аргумент функций;
- W(u) функция влияния скважины (Приложение 26);
- $W(u,\beta)$ функция влияния скважины с учетом перетекания (Приложение 27);
- z_i расстояние по вертикали между центрами фильтров i-й опытной скважины и наблюдательной, м;
- β аргумент функций;

 γ — коэффициент, характеризующий экспоненциальное изменение расхода; определяется из опытных данных, 1/сут;

 Δs_{w}^{j} – изменение понижения: определяется уравнением (13.3.2), м.

13.1. Ступенчатое изменение расхода

Изменение уровней в водоносном пласте под действием откачки (нагнетания) определяется как сумма понижений, вызываемых действием каждой скважины в отдельности. Действие же скважины рассматривается как сумма понижений от каждого скачка (ступени) дебита в самой скважине. При этом дебит считается постоянным между любым изменением производительности в работе скважины. Для схем, ограниченных в плане и/или в разрезе, на данное наложение течений накладываются также понижения от действия фиктивных скважин, отраженных от плановых или профильных границ.

На рис. 13.1 показан пример со схемой расположения трех опытных скважин и одной наблюдательной скважины. Для каждой опытной скважины приведен пример графика изменения расхода во времени.

<u>Литература:</u> Jacob, 1946a; Brown, 1963; Aron, Scott, 1965; Lennox, 1966; Боревский и др., 1973; Шестаков, 1973.

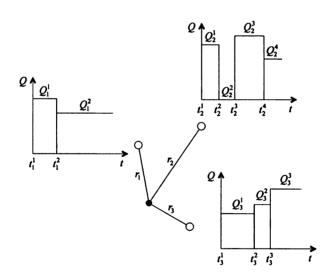


Рис. 13.1. Пример схемы расположения трех опытных скважин с произвольным ступенчатым изменением расхода в каждой из них.

Список решений:

- понижение для нестационарного периода, обобщенное решение: уравнение (13.1.1);
- понижение для квазистационарного периода: несколько опытных скважин с переменным расходом: уравнение (13.1.4); одна опытная скважина с переменным расходом: уравнение (13.1.8); несколько опытных скважин с постоянным расходом: уравнения (13.1.11), (13.1.14), (13.1.18) и (13.1.21).

Откачка с постоянным расходом

\$ Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Общее уравнение для понижения в наблюдательной скважине:

$$s = P \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{n_i^{j}} \left\{ \left(Q_i^{j} - Q_i^{j-1} \right) f \left[r_i, \left(t - t_i^{j} \right) \right] \right\}, \tag{13.1.1}$$

где

 $f(r_{i},t)$ — функция, описывающая расчетную гидрогеологическую схему;

M — количество фиктивных скважин для ограниченных и полуограниченных пластов; для неограниченных пластов M=0;

N – количество опытных скважин;

 n_i^{j} – количество скачков i-й опытной скважины на j-й скачок;

Р – постоянная величина (зависит от гидрогеологической схемы);

 Q_i^{j} – расход j-го скачка i-й опытной скважины ($Q_i^{0}=0$), м 3 /сут;

 r_i — расстояние от наблюдательной скважины до i-й опытной скважины, м;

t — время от начала откачки, сут;

 t_i^j – время начала j-го скачка i-й опытной скважины ($t_i^1=0$), сут.

Примеры записи уравнения (13.1.1) для конкретных гидрогеологических схем:

- для схемы Тейса (см. раздел 2.1)

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^{j}} \left(Q_i^{j} - Q_i^{j-1} \right) W \left(\frac{r_i^2}{4a(t - t_i^{j})} \right), \tag{13.1.2}$$

 для схемы точечного источника в неограниченном в разрезе и в плане напорном изотропном пласте (см. раздел 3.1)

$$s = \frac{1}{4\pi k} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left(Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{r_i^2 + z_i^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r_i^2 + z_i^2}}{2\sqrt{a(t - t_i^j)}} \right) \right].$$
 (13.1.3)

Уравнения для квазистационарного периода

Уравнения даны на примере схемы Тейса (раздел 2.1).

1. Несколько опытных скважин с переменным расходом в каждой из них:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2},\tag{13.1.4}$$

$$Q_{t} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_{i}^{f}} (Q_{i}^{j} - Q_{i}^{j-1}), \qquad (13.1.5)$$

$$\ln t' = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left[\left(Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) \ln \left(t - t_i^j \right) \right]}{Q_t}, \tag{13.1.6}$$

$$\ln r' = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left[\ln (r_i^2) \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1}) \right]}{Q_t}.$$
 (13.1.7)

2. Одна опытная скважина с переменным расходом:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2},\tag{13.1.8}$$

$$Q_t = \sum_{j=1}^{n_t^j} (Q_1^j - Q_1^{j-1}), \tag{13.1.9}$$

$$\ln t' = \frac{\sum_{j=1}^{n_i^j} \left[\left(Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) \ln \left(t - t_1^j \right) \right]}{Q_t}$$
 (13.1.10)

- 3. Несколько опытных скважин с постоянным расходом (в каждой скважине свой расход, $Q_1 \neq Q_2 \neq ... \neq Q_n$):
 - при одновременном начале работы опытных скважин

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r'^2} \,, \tag{13.1.11}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N} Q_i , \qquad (13.1.12)$$

$$\ln r' = \frac{\sum_{i=1}^{N} (Q_i \ln r_i)}{Q_i};$$
 (13.1.13)

при асинхронном начале работы опытных скважин

$$s = \frac{Q_i}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2},\tag{13.1.14}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_t} Q_i , \qquad (13.1.15)$$

$$\ln t' = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} Q_i \ln(t - t_i)}{Q_t},$$
(13.1.16)

$$\ln r' = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (Q_i \ln r_i)}{Q_i}, \qquad (13.1.17)$$

где N_t – количество опытных скважин, которые работают на момент времени t .

- 4. Несколько опытных скважин с постоянным расходом (во всех скважинах одинаковый расход, $Q = Q_1 = Q_2 = ... = Q_N$):
 - при одновременном начале работы опытных скважин

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{{r'}^2},\tag{13.1.18}$$

$$Q_t = NQ, (13.1.19)$$

$$\ln r' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \ln r_i \; ; \tag{13.1.20}$$

- при асинхронном начале работы опытных скважин

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2},\tag{13.1.21}$$

$$Q_t = N_t Q , \qquad (13.1.22)$$

$$\ln t' = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \ln(t - t_i), \qquad (13.1.23)$$

$$\ln r' = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \ln r_i \ . \tag{13.1.24}$$

5. Одна опытная скважина с постоянным, но периодически (циклически) отключающимся расходом [*Brown*, 1963]. Понижение уровня на *i-*й цикл

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{\prod_{i=1}^{n} t_i}{\prod_{i=1}^{n} t'_i},$$
 (13.1.25)

гле

n – количество циклов на момент определения понижения;

 t_i – длительность откачки i-го цикла, сут;

 t'_{i} – длительность восстановления *i*-го цикла, сут;

Замечание

Во всех приведенных решениях можно использовать не только откачку, но и нагнетание или откачку и нагнетание одновременно. При этом для откачивающих скважин расход будет иметь положительное значение, а для нагнетательных — отрицательное. Знак расхода отраженных (фиктивных) скважин зависит от граничных условий.

Способы обработки откачки: на примере схемы Тейса (см. раздел 2.1)

Способ прямой линии

Обработка ведется на основе уравнений (13.1.4), (13.1.8), (13.1.11), (13.1.14), (13.1.18) и (13.1.21). Значение параметра Q_t и приведенных параметров t' и r' определяется в соответствии с их выражениями для условий проведения опыта. В решениях, где не используется приведенный параметр, необходимо соответственно делать замену: t' = t и/или t' = r.

Таблица 13.1.1

Расчетные фор	рмулы для определен	ия параметров
---------------	---------------------	---------------

Способ обработки	График	Проводимость, м ² /сут	Пьезопроводность, м ² /сут					
Временное прослеживание	$\frac{s}{Q_t} - \lg t'$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r'^2}{2.25}}$					
Площадное прослеживание	$\frac{s}{Q_t} - \lg r'$	$T = \frac{0.366}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t')}$					
Комбинированное прослеживание	$\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'}{r'^2}$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$					

Способ отношения понижений

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left(Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) W \left[\frac{r_{i,1}^2}{4a(t - t_i^j)} \right]}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left(Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) W \left[\frac{r_{i,2}^2}{4a(t - t_i^j)} \right]}.$$
(13.1.26)

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы.

Точечные способы

На основе уравнения (13.1.4) используются способы разности понижений для определения проводимости и отношения понижений с тем, чтобы определить пьезопроводность аналогично точечным решениям для схемы Тейса (см. раздел 2.1).

Подбор параметров

Таблица 13.1.2
Подбираемые параметры и рекомендуемые графики

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
13.1.1	Зависит от выбранной схемы			
13.1.2	T, a	$s-\lg t$		
13.1.3	k, a			
13.1.26	а	$s_1/s_2 - \lg t$		

Восстановление уровня

Решения для восстановления уровня после откачки с переменным расходом, изменяющимся по ступенчатому закону, получаются добавлением еще одной ступени дебита с нулевым расходом.

13.2. Функциональное изменение расхода

Аналитические зависимости и обработка данных опытных откачек могут быть упрощены, если расход опытной скважины аппроксимировать некоторой известной функцией. В настоящем разделе рассматриваются следующие зависимости изменения расхода во времени:

- линейное изменение расхода (рис. 13.2, a);
- параболическое изменение расхода (рис. 13.2, 6);
- экспоненциальное изменение расхода (рис. 13.2, θ , ε).

Любая из этих функций может быть с достаточной для практических расчетов точностью аппроксимирована скачкообразным изменением расхода [Шестаков, 1961] путем разбиения непрерывной функции на ступени (рис. 13.2, ∂ , e). Как правило, для удовлетворительного результата требуется разбивка расхода на 8–10 ступеней.

Аналитические зависимости и обработка данных опытных откачек приводятся на примере схемы Тейса (см. раздел 2.1).

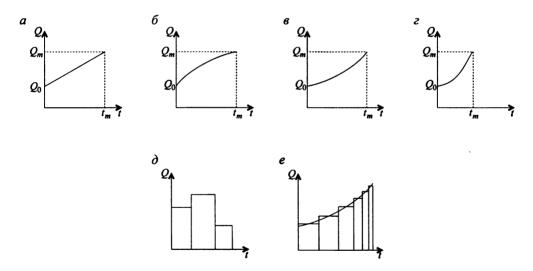


Рис. 13.2. Изменение во времени расхода опытной скважины.

a — линейная, δ — параболическая, ϵ , ϵ — экспоненциальная зависимости; δ — ступенчатое изменение расхода; ϵ — аппроксимация экспоненциальной зависимости ступенчатым изменением расхода.

<u>Питература:</u> Abu-Zied, Scott, 1963; Hantush, 1964b; Бочевер, 1968; Бочевер и др., 1969; Мироненко, Шестаков, 1978; Streltsova, 1988.

Список решений:

- понижение при линейном изменении расхода: уравнения (13.2.2) и (13.2.3);
- понижение при параболическом изменении расхода: уравнения (13.2.8) и (13.2.9);
- понижение при экспоненциальном изменении расхода: уравнения (13.2.15), (13.2.17) (13.2.19).

Откачка при линейном изменении расхода

Зависимость изменения расхода от времени (см. рис. 13.2, а):

$$Q = Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t}{t_m},$$
 (13.2.1)

где

 Q_0 – начальный расход опытной скважины, м³/сут;

 Q_{m} — расход опытной скважины на конец откачки, м³/сут;

 t_{m} – длительность откачки, сут.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u) + \frac{(Q_m - Q_0)t}{4\pi T t_m} [(1 + u)W(u) - e^{-u}].$$
 (13.2.2)

Частный случай для нестационарной фильтрации

При продолжительной откачке (для аргумента u << 1) уравнение (13.2.2) упрощается:

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} + \frac{(Q_m - Q_0)t}{4\pi T t_m} \ln \frac{0.83at}{r^2}.$$
 (13.2.3)

Способы обработки откачки при линейном изменении расхода

Точечные способы

Способ разности понижений (используются понижения длительного периода откачки)

$$s_1 - s_2 = \frac{1}{2\pi T} \left[Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t}{t_m} \right] \ln \frac{r_2}{r_1} . \tag{13.2.4}$$

Определение проводимости

- по замерам в двух скважинах на один момент времени t:

$$T = \frac{1}{2\pi(s_1 - s_2)} \left(Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t}{t_m} \right) \ln \frac{r_2}{r_1}, \qquad (13.2.5)$$

по замерам в двух скважинах на конец откачки:

$$T = \frac{Q_m}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (13.2.6)

Подбор параметров

Таблица 13.2.1

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

	1 1 1	
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График
13.2.2	T, a	$s-\lg t$

Откачка при параболическом изменении расхода

Зависимость изменения расхода от времени (см. рис. 13.2, б)

$$Q = Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t^2}{t_m^2}.$$
 (13.2.7)

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u) + \frac{(Q_m - Q_0)t^2}{4\pi T t_m^2} \left(1 + 2u + 0.5u^2\right) \left[W(u) - (1.5 + 0.5u)e^{-u}\right]. \tag{13.2.8}$$

Частный случай для нестационарной фильтрации

При продолжительной откачке (для аргумента u << 1) уравнение (13.2.8) упрощается:

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} + \frac{(Q_m - Q_0)t^2}{4\pi T t_m^2} \ln \frac{0.51at}{r^2}.$$
 (13.2.9)

❖ Способы обработки откачки при параболическом изменении расхода

Точечные способы

Способ разности понижений (используются понижения для длительного периода откачки)

$$s_1 - s_2 = \frac{1}{2\pi T} \left[Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t^2}{t_m^2} \right] \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (13.2.10)

Определение проводимости

- по замерам в двух скважинах на один момент времени t:

$$T = \frac{1}{2\pi(s_1 - s_2)} \left[Q_0 + \frac{(Q_m - Q_0)t^2}{t_m^2} \right] \ln \frac{r_2}{r_1}, \qquad (13.2.11)$$

по замерам в двух скважинах на конец откачки:

$$T = \frac{Q_m}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (13.2.12)

Подбор параметров

Таблица 13.2.2

Подбираемые параметры и рекомендуемый график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
13.2.8	T, a	$s-\lg t$		

Откачка при экспоненциальном изменении расхода

Зависимость изменения расхода о времени (см. рис. 13.2, e)

$$Q = Q_0 + (Q_m - Q_0)[1 - \exp(-\gamma t)]$$
 (13.2.13)

или (рис. 13.2, г)

$$Q = Q_0 \exp(\gamma), \tag{13.2.14}$$

где

у – коэффициент, характеризующий экспоненциальное изменение расхода, 1/сут.

Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Для изменения расхода по зависимости (13.2.13)

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u) + \frac{Q_m - Q_0}{4\pi T} \left[W(u) - \exp\left(-\frac{r^2}{4B_y^2 u}\right) \int_u^{\infty} \frac{\exp\left(-\tau + \frac{r^2}{4B_y^2 \tau}\right)}{\tau} d\tau \right], \quad (13.2.15)$$

$$B_{\gamma} = \sqrt{\frac{a}{\gamma}} \,. \tag{13.2.16}$$

2. Для изменения расхода по зависимости (13.2.14)

$$s = \frac{Q_0 \exp(-\gamma t)}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B_r}\right). \tag{13.2.17}$$

Частные случаи для нестационарной фильтрации

1. При продолжительной откачке $t \ge \frac{2.25r^2}{a}$ (или для аргумента $u \le 0.1$) и при условии $\frac{r}{\sqrt{\beta}} \le 0.5$ уравнение (13.2.15) упрощается:

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} + \frac{Q_m - Q_0}{4\pi T} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4B_{\gamma}^2 u}\right) W(u) - \frac{r^2}{4B_{\gamma}^2 u} \exp\left(-u + \frac{r^2}{4B_{\gamma}^2 u}\right) \right]. (13.2.18)$$

2. При продолжительной откачке ($t = \infty$) уравнение (13.2.17) упрощается:

$$s = \frac{Q_0 \exp(-\gamma t)}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B_r}\right). \tag{13.2.19}$$

Способы обработки откачки при экспоненциальном изменении расхода

Точечные решения

Способ отношения понижений:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}, \frac{r_1}{B_{\gamma}}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}, \frac{r_2}{B_{\gamma}}\right)} = \frac{K_0\left(\frac{r_1}{B_{\gamma}}\right)}{K_0\left(\frac{r_2}{B_{\gamma}}\right)}.$$
 (13.2.20)

По уравнению (13.2.20) пьезопроводность определяется при откачке с расходом, изменяющимся по зависимости (13.2.14). Для правой части уравнения (13.2.20) необходимо брать такие замеры, которые относятся к длительному периоду откачки.

Подбор параметров

Таблица 13.2.3

Подбираемые	параметры и	і рекомендуемыі	і график

Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
13.2.15, 13.2.17	T, a	$s-\lg t$		

13.3. Откачка с кусочно-постоянным понижением уровня в опытной скважине

Расход в одной опытной скважине или в нескольких опытных скважинах меняется во времени таким образом, что уровень в этих скважинах остается постоянным в течение некоторого периода времени. Аналитические зависимости и обработка данных опытных откачек приводятся на примере схемы Тейса (см. раздел 2.1).

<u>Литература:</u> Бочевер, Веригин, 1961; Bennett, Patten, 1962; Боревский и др., 1973.

Список решений:

- расход при нестационарной фильтрации: уравнение (13.3.1).

Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации для расхода

$$Q = 2\pi T \sum_{j=1}^{n_j} \Delta s_w^j G \left[\frac{a(t - t_{j-1})}{r_w^2} \right],$$
 (13.3.1)

$$\Delta s_{w}^{j} = s_{w}^{j} - s_{w}^{j-1}, \qquad (13.3.2)$$

гле

 n_i – количество ступеней изменения понижения на момент времени t;

 s_w^j – понижение на j-й скачок ($s_w^0 = 0$), м;

 t_{j} – время начала j-го скачка понижения ($t_{0}=0$), сут.

Способы обработки одиночной откачки с кусочно-постоянным понижением

Подбор параметров

Таблица 13.3.1

подоираемые параметры и рекомендуемыи график				
Номер уравнения	Подбираемые параметры	График		
13.3.1	T, a	$Q - \lg t$		

Способы обработки групповой откачки с кусочно-постоянным понижением

Здесь рассматривается несколько опытных скважин, понижение в которых не меняется в течение всего опробования [Боревский и др., 1973].

Способ прямой линии

Таблица 13.3.2 Расчетные формулы для определения параметров

Способ обработки	График	Проводимость, м²/сут	Пьезопроводность, м ² /сут
Временное прослеживание	$\frac{s}{Q_{\Sigma}} - \lg t$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C + \lg \frac{r'^2}{2.25}}$
Площадное прослеживание	$\frac{s}{Q_{\Sigma}} - \lg r'$	$T = \frac{0.366}{C}$	$a = 10^{2A/C - \lg(2.25t)}$
Комбинированное прослеживание	$\frac{s}{Q_{\Sigma}} - \lg \frac{t}{r'^2}$	$T = \frac{0.183}{C}$	$a = 10^{A/C - \lg 2.25}$
Временное прослеживание для расхода	$\frac{1}{Q_{\Sigma}} - \lg t$	$T = \frac{0.183N}{C} \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{s_{wi}}$	_

$$\lg r' = \frac{\sum_{i=1}^{N} Q_i \lg r_i}{Q_{\Sigma}},$$
(13.3.3)

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} Q_i . \tag{13.3.4}$$

РАЗДЕЛ 14. ЭКСПРЕСС-ОПРОБОВАНИЯ

Условные обозначения:

А – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (для способа прямой линии);

 A_1, A_2, A_3 – безразмерные эмпирические параметры;

 A_f – площадь потока, м²;

a – пьезопроводность водоносного пласта, м²/сут;

 C, C_1, C_2 – угол наклона прямой (для способа прямой линии);

 C_{w} – сжимаемость воды, 1/Па;

 $\operatorname{erfc} \beta$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $F(u,\beta)$ — функция для скважин большого диаметра (Приложение 6);

 $F_s(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 11);

g – ускорение свободного падения, м/сут²;

i – номер замера;

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

 k_r – горизонтальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;

 $k_{\it skin}$ — коэффициент фильтрации закальматированной зоны, м/сут;

 k_z – вертикальный коэффициент фильтрации анизотропного пласта, м/сут;

 L_c — начальная высота столба жидкости в обсадной трубе (расстояние от кровли водоносного пласта до уровня подземных вод), м;

 l_{w} – длина фильтра опытной скважины, м;

m – мощность напорного пласта или начальная обводненная мощность безнапорного пласта, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

 Q_i – расход *i*-го замера, м³/сут;

R – радиус влияния, м;

 $R_{\rm max}$ — максимальный радиус влияния, м;

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_0 — радиус закрытой трубки, м;

 r_c — радиус обсадной трубы опытной скважины, м;

 r_{skin} — радиус закальматированной зоны, м/сут;

 r_w — радиус опытной скважины или горизонтальное расстояние между центром скважины и ненарушенной частью водоносного пласта, м;

```
    S – водоотдача водоносного пласта;

S_s — удельная водоотдача, 1/м;
S_{\rm w} – безразмерная величина «скина» скважины: может определяться уравнением (14.6.7);
s — понижение в наблюдательной скважине, м;
s^0 — начальное (мгновенное) изменение уровня в опытной скважине, м;
s_1, s_2 – изменение уровня в опытной скважине на два момента времени, м;
s_{\it g}\, – предполагаемое поднятие уровня без учета воздуха, м
s_i — изменение уровня i-го замера, м;
s_w – изменение уровня в опытной скважине, м;
T – проводимость водоносного пласта, м<sup>2</sup>/сут;
t — время от начала возмущения, сут;
t_0 — длительность возмущения, сут;
t_1, t_2 — время первого и второго замеров, сут;
t_i – время i-го замера, сут;
t_r — время от начала восстановления, сут;
u = \frac{Tt}{r^2} – аргумент функции;
V_w – объем подаваемой воды, м<sup>3</sup>;
z - вертикальное расстояние от дна фильтра до уровня грунтовых вод, м;
z_0 – глубина, на которую опускается закрытая трубка, м;
\alpha – см. уравнение (14.8.2);
\beta = \frac{r_w^2}{r^2} S — аргумент функции; для синусоидального изменения напора см. уравнение (14.8.3);
\Delta H_{\it skin} — перепад напора в пределах закальматированной зоны, м;
\varsigma – см. уравнение (14.8.4);
\lambda – см. уравнение (14.8.8);
\rho_w – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;
\chi = \sqrt{k_z/k_r} – коэффициент профильной анизотропии.
```

14.1. Цели и задачи экспресс-опробований; обзор проведенных работ в данной области

Использование экспресс-опробования как одного из видов опытнофильтрационных опробований часто практикуется в гидрогеологии. Широкое применение эти методы нашли благодаря своей доступности, дешевизне и отсутствию необходимости в специальном оборудовании.

Экспресс-опробования используют в ситуациях, когда при гидрогеологической разведке требуется приближенно определить фильтрационные свойства водоносного слоя и получить сравнительную характеристику по данному параметру. Эффективно их проведение и для оценки сопротивления прискважинных зон, что позволяет оценить

инерционность наблюдательных скважин при замерах уровней в процессе нестационарной фильтрации.

Способ состоит в быстром наливе либо откачке из скважины некоторого известного объема воды и в последующем наблюдении за восстановлением уровня в той же скважине до первоначального положения. В зависимости от фильтрационных свойств пласта продолжительность эксперимента обычно составляет от первых секунд до нескольких часов.

Впервые решение для обработки таких опробований было предложено в литературе по нефти в 1951 году Hvorslev [1951; Kruseman, Ridder, 1994]. Автор представил аналитические зависимости для различных гидрогеологических схем с учетом конструкции и расположения фильтра скважины. Впоследствии его решения получили свое развитие в гидрогеологической практике и используются во многих компьютерных программах, предназначенных для интерпретации такого вида работ [Weyer, Horwood-Brown, 1982; Kemblowski, Klein, 1988; Wylie, Wood, 1990; Bohling, McElwee, 1992].

Несколько позже различные предложения были сделаны Ferris с соавт. [Ferris, Knowles, 1954, 1963], однако они предполагали бесконечно малый радиус скважины. И, как показали последующие исследования, решение Ferris работает достаточно хорошо на те времена, когда напор в скважине практически восстановился.

Наиболее приемлемое и распространенное решение для обработки экспрессопробований в условиях напорного, гомогенного, изотропного, неограниченного по протяженности водоносного пласта и совершенной по степени и характеру вскрытия скважины было предложено Соорег, Bredehoeft, Papadopulos [1967]. Их решение было взято из аналогичной теплофизической задачи — мгновенного нагрева идеального проводника в виде цилиндра конечного радиуса, описанной Карслоу и Егером [1964]. Авторы [1967] на основе этого решения построили ряд эталонных кривых для широкого диапазона водоотдачи (или, вернее, для различного безразмерного параметра β , зависящего от радиуса обсадной трубы, радиуса фильтра и самой водоотдачи). Позже они рассмотрели многие аспекты экспресс-опробований и их применение в более сложных ситуациях. Рарадориlos расширил эту работу применительно к водоносным пластам с очень низкими емкостными коэффициентами [*Papadopulos et al.*, 1973]. Другие авторы рассмотрели различные вопросы полевого применения, в частности проведение экспресс-опробований в слабопроницаемых образованиях было освещено Bredehoeft и Papadopulos [1980; *Neuzil*, 1982].

Следующий важный шаг в развитии аналитических решений для обработки экспресс-опробований был сделан Bouwer и Rice [1976] — для несовершенной или совершенной скважины в безнапорном водоносном пласте при различном расположении фильтра. Это решение может быть также использовано для напорных систем, если вода попадает в основной водоносный пласт из смежного верхнего пласта путем перетекания или упругого отжатия из разделяющего водоупора [Bouwer, 1989].

Начиная с 1980-х годов, рекомендации по проведению и обработке экспрессопробований стали все чаще появляться в гидрогеологической литературе. В основном исследования были направлены на разработку аналитических методов для интерпретации такого вида опробований в различных гидрогеологических условиях, в частности изучалось влияние неоднородной трещиноватости и гетерогенности водоносных пластов на результаты эксперимента [Barker, Black, 1983]. Были сделаны попытки учесть влияние граничных условий на стенке скважины и на ее поверхности — воздействие скин-эффекта опытных скважин [Faust, Mercer, 1984; Moench, Hsieh, 1985; Sageev, 1986; Peres et al., 1989, 1993], немгновенный налив в скважину [Connell, 1983; Picking, 1994], осцилляции на начальном этапе возмущения в пластах с высокой проводимостью [Van der Kamp, 1976;

Kabala et al., 1985; Kipp, 1985]. Важную роль в развитии экспресс-методов играют работы по оценке возможного отклика на экспресс-опробование в соседних наблюдательных скважинах [Novakovski, 1989; McElwee et al., 1995b].

Хотя экспресс-опробование осуществляется относительно легко, оно должно тщательно планироваться и проводиться по определенной методике для обеспечения максимального объема информации. А это требует обобщения всего накопленного опыта в данной области [McElwee et al., 1995a, b; Butler et al., 1996].

14.2. Опробование в напорном пласте совершенной по степени вскрытия скважиной

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, неограниченный в плане;
- опытная скважина: совершенная по степени вскрытия, учитывается емкость скважины;
- изменение напора определяется в опытной скважине;
- типовая схема: рис. 14.1.

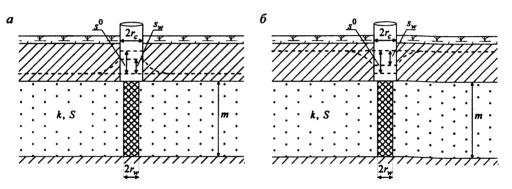


Рис. 14.1. Типовая схема проведения экспресс-опробования в напорном изотропном пласте. а – мгновенный налив в скважину; б – мгновенный забор воды из скважины.

<u>Литература:</u> Карслоу, Егер, 1964; Cooper et al., 1967; Papadopulos et al., 1973; Bredehoeft, Papadopulos, 1980.

🌣 🛮 Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

$$\frac{s_w}{s^0} = F_s \left(\frac{Tt}{r_c^2}, \frac{r_w^2}{r_c^2} S \right), \tag{14.2.1}$$

гле

 $F_{s}(u,\beta)$ – специальная функция (Приложение 11);

 r_c — радиус обсадной трубы опытной скважины, м;

 r_{w} – радиус опытной скважины, м;

 s_0 — изменение уровня в опытной скважине на момент остановки откачки (нагнетания), м;

 s_w — изменение уровня в опытной скважине, м;

 s^0 — начальное (мгновенное) изменение уровня в опытной скважине, м.

❖ Способы обработки данных экспресс-опробования

Решение Соорег

Решение Соорег и др. [1967; Papadopulos et al., 1973; Bredehoeft, Papadopulos, 1980] основано на численном интегрировании уравнения (14.2.1). По полученным значениям строят эталонные кривые (Приложение 11) на полулогарифмическом графике $\frac{s_w}{s^0} - \lg \frac{Tt}{r_c^2}$ для различных значений второго аргумента функции $F_s(u,\beta)$ (при равенстве радиусов фильтра опытной скважины и обсадной трубы вместо аргумента β используется водоотдача). На этот же график наносят фактические замеры. Изменяя проводимость, добиваются наилучшего совпадения расчетной типовой кривой и кривой, полученной по фактическим замерам. Точность определения проводимости будет во многом зависеть от знания водоотдачи водоносного пласта на участке опробования.

Ошибки в определении самой водоотдачи по данным экспресс-опробования можно уменьшить, используя решение, приведенное Karasaki с соавт. [1988]. Оно основано на дифференцировании уравнения (14.2.1). Полученное уравнение подобно исходному, но, как пишут авторы, форму кривой на предлагаемом ими графике (отношение производной нормализованного напора (s/s^0) к логарифму безразмерного времени от безразмерного времени: $\frac{\partial (s/s^0)}{\partial ln} - u$) легче различать при разной водоотдаче.

В настоящее время типовые кривые построены для широкого диапазона аргумента β : от 10^{-10} до 10. Это отражает широкий спектр водовмещающих пород, по опытам в которых возможна обработка данным методом.

Несмотря на такие возможности, постановка опыта в породах с низкой проницаемостью может быть осложнена нереальной длительностью эксперимента и отсутствием данных о начальном распределении напора. Bredehoeft и Papadopulos [1980] предложили альтернативную методику проведения и обработки экспресс-опробований в слабопроницаемых образованиях.

Суть методики состоит в следующем. Скважина заполняется водой до определенного уровня. Так как породы слабопроницаемые, то уровень после налива практически не будет меняться. Этот заново «установившийся» уровень принимается за начальное распределение напора. Затем в скважине резко повышается давление (за счет нагнетания некоторого объема воды), что эквивалентно s^0 для обычного экспрессопробования. Далее все происходит, как и в изложенной выше методике. Для неконсолидированных образований за интервал опробования берется длина фильтра скважины, а для консолидированных — расстояние между пакером, который ставится сверху, и дном скважины. Обработка осуществляется по эталонным кривым Соорег. Разница состоит в том, что используются несколько иные значения аргументов функции $F_{\tau}(u, \beta)$: радиус обсадной трубы, входящий в аргументы, определяется как

$$r_c = \sqrt{V_w C_w \rho_w g / \pi} \,, \tag{14.2.2}$$

где V_w — объем подаваемой воды, м³; C_w — сжимаемость воды, Па¹; ρ_w — плотность воды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/сут².

Первые изменения напора при проведении стандартного экспресс-опробования в слабопроницаемых породах, по данным авторов, происходят через десятки или даже сотни

суток, а полное восстановление уровня может длиться сотни лет. Для предложенного же метода основная часть восстановления происходит за первые часы. Сократить время проведения стандартного экспресс-опробования можно за счет уменьшения радиуса обсадной трубы, что часто нереально, так как радиус должен равняться вышеприведенному выражению, а это при нормальных условиях много меньше одного миллиметра.

Данная методика требует осторожного подхода ввиду тех критических замечаний, которые высказываются в ее адрес. По мнению Neuzil [1982], после заполнения скважины водой уровень в ней держаться не будет, а будет стремиться к своему первоначальному положению, что приведет к неверной интерпретации результатов опробования. Второй отмеченный им недостаток — это неверное определение сжимаемости воды в скважине. Сжимаемость воды в таких условиях в 6 раз больше, чем обычно принимаемая (4.8×10⁻¹⁰ Па⁻¹). А это приведет к такому же уменьшению расчетной проводимости и водоотдачи. Neuzil для проведения экспресс-опробования в таких породах предлагает оборудовать интервал опробования пакерами, установить датчики между пакерами и в нижнем пакере, а обработку проводить по методу Воиwer и Rice [1976].

Решение Ferris

До того, как было сделано численное решение интеграла в уравнении (14.2.1), для обработки экспресс-опробований применялись зависимости, данные Ferris [Ferris, Knowles, 1954, 1963]. Как уже отмечалось, они не учитывают емкости скважины. Автор предполагал, что для практических целей скважину можно аппроксимировать линейным источником в бесконечной области, для которой изменение напора в результате нагнетания описывается уравнением

$$s_{w} = \frac{V_{w}}{4\pi T t} \exp\left(-\frac{r_{c}^{2} S}{4T t}\right), \qquad (14.2.3)$$

где V_w – объем подаваемой воды, м³.

Если учесть, что экспонента с ростом времени быстро стремится к единице, то уравнение переписывается в виде

$$\frac{s}{s^0} = \frac{r_c^2}{4Tt} \,. \tag{14.2.4}$$

Решение (14.2.4) получено из балансового уравнения. Из него видно, что изменение напора не зависит от водоотдачи. Соорег и др. показали практически полную несостоятельность обработки по формуле (14.2.4). Она работает только на ограниченном и непредставительном участке графика восстановления напора: отношение текущего напора к его начальному изменению меньше 0.0025 или для времени $t > \frac{100r_c^2}{T}$. Обработка по этому участку типовой кривой затруднена даже по результатам, которые получены на «идеальной» численной модели.

Решение Peres

Регез с соавт. [1989] предложили точное решение для обработки экспрессопробований в напорном пласте с учетом емкости скважины и «скина». Обработка по данному решению основана на построении эталонных кривых в достаточно сложной и не наглядной системе координат. Авторы дали более удобное для практических целей решение

для определения водоотдачи и емкости пласта по способу прямой линии. В его основе лежит следующее уравнение:

$$\frac{2T}{r_c^2 \left(s_w - s^0\right)} \int_0^t s_w dt = 1.151 \cdot \lg \frac{2.246Tt}{Sr_w^2}.$$
 (14.2.5)

Это решение дано для нулевого «скина», а его учет требует добавления в правую часть выражения (14.2.5) численного значения скин-эффекта. Построив график фактических

понижений в координатах $\int_{0}^{t} \frac{s_{w}dt}{s_{w}-s^{0}} - \lg t$, по углу наклона прямой C и величине A,

которую отсекает прямая на оси ординат, определяют проводимость $T=\frac{1.151\cdot r_c^2}{2C}$ и логарифм водоотдачи $\lg S=\lg\frac{2.246\cdot T}{r_c^2}-\frac{A}{C}$. Интеграл, входящий в решение (14.2.5),

находят любым методом (например, методом трапеций).

Решение Picking

При проведении экспресс-опробований трудно мгновенно поднять или опустить начальный уровень. Обычно на это требуется некоторое время, что при обработке может привести к значительным погрешностям в определении фильтрационных параметров. Ріскіпд [1994] предложил решение, которое позволяет учитывать немгновенное изменение начального уровня. В решении используется принцип сложения течений и функция, данная Papadopulos для совершенных скважин большого диаметра в напорном, однородном, неограниченном пласте [Papadopulos, Cooper, 1967], которое взято из аналогичной теплофизической проблемы [Карслоу, Егер, 1964].

Если из скважины откачивалась или в скважину нагнеталась (за некоторое известное время t_0) вода с постоянным расходом Q, а затем уровень в скважине восстанавливался, то изменение уровня в скважине на любое время t_r после остановки возмущения будет определяться методом суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[F\left(\frac{r^2 S}{4T(t_0 + t_r)}, \frac{r_w^2}{r_c^2} S\right) - F\left(\frac{r^2 S}{4Tt_r}, \frac{r_w^2}{r_c^2} S\right) \right].$$
 (14.2.6)

На время окончания откачки понижение

$$s_0 = \frac{Q}{4\pi T} F\left(\frac{r^2 S}{4Tt_0}, \frac{r_w^2}{r_0^2} S\right), \tag{14.2.7}$$

где

 $F(u, \beta)$ – функция для скважин большого диаметра (Приложение 6);

 $s_0\,$ – изменение уровня в опытной скважине на момент остановки откачки (нагнетания), м;

 t_0 – длительность откачки (нагнетания), сут;

 t_r – время от начала восстановления уровня, сут.

На основе равенств (14.2.6) и (14.2.7) получаем безразмерное выражение для изменения уровня:

$$\frac{s}{s_0} = \frac{F\left(\frac{r^2S}{4T(t_0 + t_r)}, \frac{r_w^2}{r_c^2}S\right) - F\left(\frac{r^2S}{4Tt_r}, \frac{r_w^2}{r_c^2}S\right)}{F\left(\frac{r^2S}{4Tt_0}, \frac{r_w^2}{r_c^2}S\right)},$$
(14.2.8)

которое дает конечное уравнение для обработки экспресс-опробований при немгновенном изменении начального уровня. Преимущество данного выражения в том, что в него не входит расход откачки (нагнетания), который обычно трудно точно определить в такого рода экспериментах. Для обработки требуется только знание длительности откачки (нагнетания). Чем меньше время возмущения, тем более точно график восстановления уровня будет совпадать с эталонными кривыми Cooper (14.2.1). По уравнению (14.2.8) способом подбора на графике $s-\lg t$, определяют проводимость и водоотдачу пласта.

При небольших понижениях автор решения рекомендует использовать данный метод и для безнапорных пластов.

14.3. Несовершенная по степени вскрытия скважина в напорном пласте

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: напорный, изотропный, неограниченный в плане;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия;
- изменение напора определяется в опытной скважине:
- типовая схема: рис. 14.2.

Способы обработки данных экспрессопробования

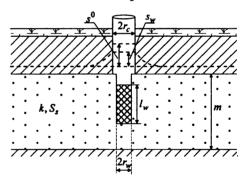


Рис. 14.2. Типовая схема проведения экспрессопробования в напорном изотропном пласте несовершенной по степени вскрытия опытной скважиной.

Решение Nguyen и Pinder

При мгновенном наливе или заборе воды из скважины, фильтр которой меньше мощности водоносного пласта, нарушается одномерность фильтрационного потока, и, следовательно, обработка экспресс-опробований по выражению (14.2.1) будет давать завышенные значения проводимости исследуемого пласта. Nguyen и Pinder [1984] предложили графоаналитическое решение, учитывающее несовершенство опробуемой скважины. Оно основано на их же зависимости для понижения уровня в опробуемой скважине при откачке с постоянным расходом. Решение определяет осредненный напор по стволу скважины. Приравняв расход скважины нулю, авторы получили следующие зависимости для определения удельной водоотдачи S, и коэффициента фильтрации:

$$S_s = \frac{r_c^2}{l_{\cdots}r_{\cdots}^2}C_1, \tag{14.3.1}$$

$$k = \frac{r_w^2}{4l_w} \frac{C_1}{C_2},\tag{14.3.2}$$

где

 C_1 – угол наклона прямой на графике $\lg s_w - \lg t$;

 C_2 – угол наклона прямой на графике $\lg \frac{s_1 - s_2}{t_2 - t_1} - \frac{1}{t}$;

 s_1, s_2 — изменения уровня на два момента времени, м;

 t_1, t_2 — время первого и второго замеров, сут.

14.4. Опробование в безнапорном пласте

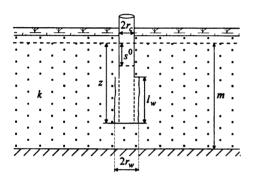


Рис. 14.3. Типовая схема проведения экспрессопробования в безнапорном изотропном пласте несовершенной по степени вскрытия опытной скважиной.

Схема проведения опыта:

- водоносный пласт: безнапорный, изотропный, неограниченный в плане;
- опытная скважина: несовершенная по степени вскрытия;
- изменение напора определяется в опытной скважине;
- типовая схема: рис. 14.3.

Поток к скважине на период стационара

$$Q = 2\pi k l_w \frac{s^0}{\ln(R/r_w)},$$
 (14.4.1)

где

 l_w — длина фильтра опытной скважины, м;

R — радиус влияния, м;

 $r_{\rm w}$ — горизонтальное расстояние между центром скважины и ненарушенной частью водоносного пласта, м.

Способы обработки данных экспресс-опробования

Решение Bouwer и Rice

Воиwer и Rice представили решение для экспресс-опробований в безнапорных пластах с частично проницаемой или частично перфорированной скважиной при мгновенном понижении уровня в ней [Bouwer, Rice, 1976; Brown, Narasimhan, 1995]. Их решение основано на уравнении стационарного потока (14.4.1) к скважине при постоянном

расходе. Подставив в уравнение (14.4.1) выражение для скорости поднятия уровня $\frac{ds}{dt} = -\frac{Q}{\pi r_c^2}$ и проинтегрировав его по времени, авторы получили конечное уравнение для

определения коэффициента фильтрации:

$$k = \frac{r_c^2 \ln \frac{R}{r_w}}{2l_{w}} \frac{1}{t} \ln \frac{s^0}{s}.$$
 (14.4.2)

Это уравнение прямой линии. Следовательно, построив график в координатах $\ln \frac{s^0}{s} - t$, по углу наклона $C = \frac{2kl_w}{r_c^2} \ln \frac{R}{r_w}$ можно определить искомый коэффициент фильтрации.

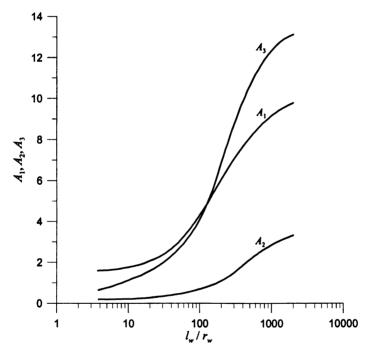


Рис. 14.4. График для определения безразмерных эмпирических коэффициентов.

Для нахождения радиуса влияния, который, как правило, заранее неизвестен (это является главным недостатком решения), авторы предлагают аналитические зависимости, построенные ими на основании многочисленных экспериментов для частично проницаемой скважины

$$\ln \frac{R}{r_{w}} = \left(1.1 \ln \frac{r_{w}}{z} + \frac{A_{1} + A_{2} \ln \frac{m - z}{r_{w}}}{\frac{l_{w}}{r_{w}}}\right)^{-1},$$
(14.4.3)

для полностью проницаемой

$$\ln \frac{R}{r_{w}} = \left(1.1 \ln \frac{r_{w}}{z} + \frac{r_{w} A_{3}}{l_{w}}\right)^{-1},$$
(14.4.4)

где

т – начальная обводненная мощность пласта, м;

z - вертикальное расстояние от дна фильтра до уровня грунтовых вод, м;

 A_1 , A_2 , A_3 — безразмерные параметры, которые зависят от длины фильтра и радиуса опытной скважины; получены эмпирическим путем и определяются по графику (рис. 14.4) [Bouwer, Rice, 1976]. Для этих графиков автором подобрана удобная для практических расчетов аппроксимация, которая зависит от величины отношения $\frac{l_w}{l_w}$:

$$- \quad \text{для диапазона} \ 1 \leq \frac{l_w}{r_w} \leq 200 \quad \text{параметры} \ A_1, A_2, A_3 \quad \text{аппроксимируются полиномами}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.4773306 + 0.02741954 \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right) + 8.0340006 \cdot 10^{-5} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^2 - 2.5045234 \cdot 10^{-7} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^3 - 1.2204508 \cdot 10^{-8} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^4 + 9.7196356 \cdot 10^{-11} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^5 - 2.1463808 \cdot 10^{-13} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^6 \end{bmatrix},$$

$$A_{2} = \begin{bmatrix} 0.166753 + 0.004970107 \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right) + 5.4654427 \cdot 10^{-5} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{2} - 1.278645 \cdot 10^{-6} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{3} + \\ + 1.1887909 \cdot 10^{-8} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{4} - 5.1785833 \cdot 10^{-11} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{5} + 8.6501211 \cdot 10^{-14} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{6} \end{bmatrix},$$

$$A_{3} = \begin{bmatrix} 0.3905696 + 0.08310949 \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right) - 0.001515863 \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{2} + 2.1736242 \cdot 10^{-5} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{3} - \\ - 1.653479 \cdot 10^{-7} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{4} + 6.3107187 \cdot 10^{-10} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{5} - 9.4937404 \cdot 10^{-13} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{6} \end{bmatrix};$$

$$-\qquad \text{для диапазона} \ \ 200 < \frac{l_w}{r_w} < 2000 \ \ \text{параметры} \ \ A_1, \ A_2, \ A_3 \ \ \text{аппроксимируются полиномами}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 2.510366 + 0.0260556 \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right) - 5.08597807 \cdot 10^{-5} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^2 + 5.8230884 \cdot 10^{-8} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^3 - \\ -3.7929349 \cdot 10^{-11} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^4 + 1.2935074 \cdot 10^{-14} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^5 - 1.7859607 \cdot 10^{-18} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^6 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.0651429 + 0.006547392 \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right) - 4.1237584 \cdot 10^{-6} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^2 - \\ -2.1340524 \cdot 10^{-9} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^3 + 4.5603083 \cdot 10^{-12} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^4 - 2.3529733 \cdot 10^{-15} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^5 + \\ +4.0923695 \cdot 10^{-19} \left(\lg \frac{l_w}{r_w} \right)^6 \end{bmatrix},$$

$$A_{3} = \begin{bmatrix} 0.2593157 + 0.04869992 \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right) - 9.4552972 \cdot 10^{-5} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{2} + 1.05714921 \cdot 10^{-7} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{3} - \left[-6.7058679 \cdot 10^{-11} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{4} + 2.2286538 \cdot 10^{-14} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{5} - 3.004312102 \cdot 10^{-18} \left(\lg \frac{l_{w}}{r_{w}} \right)^{6} \end{bmatrix}.$$

Экспериментально установлено, что для выражения $\ln \frac{m-z}{r_w}$ существует эффективный верхний предел, равный 6, который необходимо учитывать при расчете радиуса влияния.

По мнению авторов [Bouwer, Rice, 1976],

- по данной методике можно обрабатывать как мгновенный забор воды, так и нагнетание;
- уровень не должен падать ниже фильтра, иначе проводимость будет завышена;
- экспресс-опробование можно проводить и в напорном пласте, когда скважина несовершенна по степени вскрытия;
- метод можно применять для любого диаметра скважины, если отношение $\frac{l_w}{r_w}$ попадает
 - на кривые для их определения (см. рис. 14.4);
- при наличии на графике двух прямых участков обработку следует проводить по второму из них, так как первый свидетельствует о нарушенной зоне вокруг скважины или о перетекании; на графике может быть и третий участок (не прямой), который возникает в результате малых понижений, когда восстановление напора практически завершилось.

14.5. Учет профильной анизотропии при обработке экспресс-опробований

Решения Hvorslev

Все предыдущие решения подразумевали изотропность водоносного пласта. При наличии существенной профильной анизотропии на участке опробования рекомендуется использовать зависимости, полученные Hvorslev [1951], по которым определяется коэффициент фильтрации вдоль напластования.

602 Раздел 14.

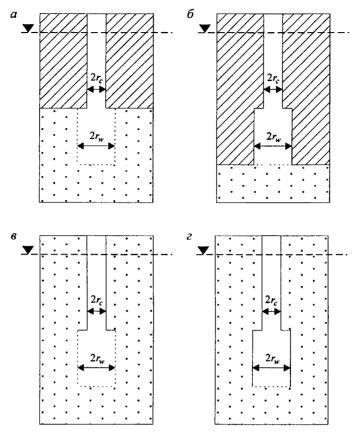


Рис. 14.5. Схемы расположения опытной скважины в водоносном пласте для обработки экспресс-опробований по методу Hvorslev.

a — несовершенная скважина в напорном пласте; b — скважина в непроницаемой толще вскрывает напорный пласт своим дном; b, b — несовершенная скважина в безнапорном пласте (b — открыта только нижняя часть фильтра).

Данные им уравнения линейны, и поэтому искомый параметр находят методом прямой по угловому коэффициенту. Фактические замеры удобно наносить на график $\lg \frac{s^0}{s} - t$. Для различных конструкций скважины, ее расположения и с учетом геологических условий решения Hvorslev выглядят следующим образом:

несовершенная скважина в напорном пласте, фильтр примыкает к кровле (рис. 14.5, a):

$$k = \frac{2.3r_c^2}{8l_w}C\ln\left(\frac{2}{\chi r_w^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{\chi r_w^2}\right)^2}\right);$$
 (14.5.1)

- скважина в непроницаемом пласте вскрывает напорный пласт своим дном (рис. 14.5, б):

$$k = \frac{2.3\pi r_c^2}{8\,\gamma r_c^2}C\;; (14.5.2)$$

- несовершенная скважина в безнапорном пласте (рис. 14.5, в):

$$k = \frac{2.3r_c^2}{8l_w} C \ln \left(\frac{1}{\chi r_w^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\chi r_w^2}\right)^2} \right);$$
 (14.5.3)

- несовершенная скважина в безнапорном пласте, открыта только нижняя часть фильтра (рис. 14.5, z):

$$k = \frac{2.3\pi \chi r_c^2}{11r_w^2}C; (14.5.4)$$

 несовершенная скважина в безнапорном изотропном пласте, скважина сверху и снизу ограничена пакерами:

$$k = \frac{2.3r_c^2}{2l_w}C\ln\frac{l_w}{r_w^2}$$
 (14.5.5)

или то же, но с учетом зажатого в прискважинной зоне воздуха:

$$k = \frac{2.3}{2l_w} \left(r_c^2 - r_c^2 \frac{s^0 - s_g}{s^0} \right) C \ln \frac{l_w}{r_w^2},$$
 (14.5.6)

где S_g — предполагаемое поднятие уровня без учета воздуха, м.

Решение (14.5.6) предложено Keller и Kamp [1992] для слабопроницаемых образований и маленького радиуса скважины (по их данным, это решение работает при условии, что отношение длины фильтра скважины к ее радиусу больше 8), когда на результаты эксперимента может влиять воздух, находящийся между скважиной и породой. При этом во время опыта фильтр должен быть обводнен.

Последующие исследователи решений Hvorslev [Wylie, Wood, 1990] указывают на ограничения по их применению. В хорошо проницаемых образованиях трудно добиться мгновенного изменения начального напора. Авторы ссылаются на Pandit и Miner [1986], которые предлагают изменять начальный уровень посредством опускания в скважину закрытой трубы диаметром r_0 на глубину z_0 . Трубу резко вытаскивают, а начальный уровень рассчитывают по формуле

$$s^0 = \frac{r_0^2 z_0}{r_w^2 - r_0^2} \,. \tag{14.5.7}$$

14.6. Экспресс-опробования при наличии скин-эффекта

Решение Faust и Mercer

Наиболее часто упоминаемое в этой области решение Faust и Mercer [1984] предназначено для определения проницаемости «скина» по данным экспресс-опробования несовершенной по характеру вскрытия скважиной. Проницаемость прискважинной зоны должна быть намного меньше проницаемости водоносного пласта.

Свое решение авторы выводят из выражения для квазистационарного потока через радиальный «скин»:

$$Q = \frac{2\pi k_{skin} ms_w}{\ln(r_{chin}/r_{cu})},$$
(14.6.1)

где

Q – расход через «скин», м 3 /сут;

 $k_{\it skin}$ — коэффициент фильтрации закальматированной зоны, м/сут;

m — мощность интервала опробования, м;

 s_w – изменение уровня в опытной скважине, м;

 r_{skin} – внешний радиус «скина», м.

Понижение уровня в опытной скважине

$$s_w = s^0 \exp \left[-\frac{2k_{skin}mt}{r_c^2 \ln(r_{skin}/r_w)} \right],$$
 (14.6.2)

 s^0 – начальное мгновенное изменение напора в опытной скважине, м.

Форма индикаторных кривых при наличии скин-эффекта и без него подобна, поэтому определение коэффициента фильтрации «скина» удобнее производить на графике в координатах $\frac{s_w}{s^0} - \lg \frac{k_{skin}mt}{r^2}$.

Решение Sageev

Sageev [1986] представил несколько наборов типовых кривых в табличной форме, которые позволяют определять фильтрационные параметры водоносного пласта и проницаемость «скина». Эталонные кривые для определения фильтрационных параметров строятся в зависимости от длительности проведения опробования и от наличия «скина».

1. Обработка начального временного интервала опыта без наличия «скина». Изменение уровня в опытной скважине

$$s_{w} = s^{0} \left[1 - \exp\left(\frac{4TStr_{w}^{2}}{r_{c}^{4}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{4TStr_{w}^{2}}{r_{c}^{4}}}\right) \right], \tag{14.6.3}$$

для начальных моментов времени уравнение (14.6.3) упрощается:

$$s_w \approx 4s^0 \frac{r_w}{r_c^2} \sqrt{\frac{TSt}{\pi}} . \tag{14.6.4}$$

2. Обработка начального временного интервала опыта при наличии «скина». Изменение уровня в опытной скважине

$$s_w = s^0 \left[1 - \exp\left(-\frac{2Tt}{S_w r_c^2}\right) \right],$$
 (14.6.5)

для начальных моментов времени уравнение (14.6.5) упрощается:

$$s_w \approx s^0 \left(1 - \frac{2Tt}{S_w r_c^2} \right),$$
 (14.6.6)

$$S_{w} \cong \frac{k_{skin} m \Delta H_{skin}}{O}, \qquad (14.6.7)$$

где

 S_w – безразмерная величина «скина» скважины;

 ΔH_{skin} — перепад напора в пределах закальматированной зоны.

3. Обработка конечного временного интервала опыта при наличии «скина». Изменение уровня в опытной скважине

$$s_w = s^0 \frac{r_c^2}{4T_t} \,. \tag{14.6.8}$$

Обработку можно производить подбором фильтрационных параметров на графике временного прослеживания на основе уравнений (14.6.3) – (14.6.6) и (14.6.8).

14.7. Экспресс-опробование в скважине, пересекающей трещину

Решение Karasaki и др.

Кагазакі с соавт. [1988] приводит интересное и практичное с точки зрения возможности использования решение для скважины, пересекающей трещину (решение взято из [Карслоу, Егер, 1964]). Понижение на расстоянии от опытной скважины, пересекающей трещину,

$$s = s^{0} \exp \left[\frac{A_f S_s}{\pi r_c^2} \left(r + \frac{A_f kt}{\pi r_c^2} \right) \right] \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{S_s}{\pi r_c^2}} \left(\frac{r}{2} \sqrt{\frac{\pi r_c^2}{kt}} + A_f \sqrt{\frac{kt}{\pi r_c^2}} \right) \right].$$
 (14.7.1)

Изменение уровня в опытной скважине

$$s_w = s^0 \exp\left(\frac{A_f^2 k S_s}{\pi^2 r_c^4} t\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{A_f}{\pi r_c^2} \sqrt{S_s t}\right), \tag{14.7.2}$$

где

r – расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 S_s — удельная водоотдача, 1/м;

 A_f – площадь потока, м².

Недостатком этого решения является то, что в реальных условиях сложно определить площадь фильтрационного потока, так как размер трещины и ее пространственное положение в пределах опробуемой скважины не всегда ясны.

На основе уравнений (14.7.1) и (14.7.2) подбором определяют коэффициент фильтрации и удельную водоотдачу пласта на графике временного прослеживания изменения уровня в опытной или наблюдательной скважине.

14.8. Колебания уровня при мгновенном наливе (отборе) воды из скважины

Все решения, данные выше, предполагают плавное восстановление напора в опробуемой скважине. В природных условиях в течение некоторого времени часто возникают осцилляции уровня, которые связаны с инерционными эффектами и емкостью скважины и характерны в основном для хорошо проницаемых образований. Не учет этого явления на начальном этапе опробования может привести к ошибкам при интерпретации; кроме того, оно представляет самостоятельный интерес.

В основу решений для такого рода эффектов положено представление о синусоидальном затухающем движении. В этом разделе рассмотрены два решения для

совершенных по степени вскрытия скважин в напорном пласте, на основе которых определяются проводимость и водоотдача опробуемого водоносного пласта. Используя эти решения вместе с решением Соорег (14.2.1), можно точно оценить фильтрационные параметры при данной схеме опробования. Оба решения имеют ограничения на использование в зависимости от соотношения водоотдачи и проводимости.

Решение Кірр

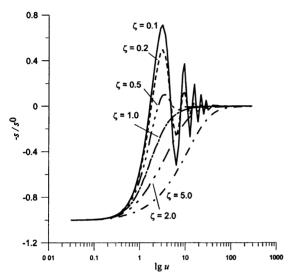


Рис. 14.6. Эталонные кривые для решения Кірр.

нетрудно рассчитать водоотдачу. Для работы с эталонными кривыми необходимо определить ряд параметров:

Решение Kipp [1985] построено на достаточно сложных математических преобразованиях. На их основе автор дает набор типовых кривых, которые ставят соответствие нормализованный (s/s^0) параметр напор проводимости зависящий OT водоотдачи пласта и геометрических Совмещая размеров скважины. график фактических замеров, построенный

координатах
$$\left(-\frac{s}{s^0}\right) - \lg u$$
 (рис. 14.6)

и эталонные кривые для наиболее подходящего параметра ς (табл. 14.8.1) (предварительно задав предполагаемую проводимость), эталонными кривыми необходимо

$$u = \frac{tT}{r_w^2 S},\tag{14.8.1}$$

$$\alpha = \frac{r_c^2}{2r_w^2 S},\tag{14.8.2}$$

$$\beta = \frac{1}{g} \left(L_c + \frac{r_c^2 m}{2r_w^2} \right) \left(\frac{T}{r_w^2 S} \right)^2, \tag{14.8.3}$$

$$\varsigma = \frac{\alpha \ln \beta}{8\sqrt{\beta}},\tag{14.8.4}$$

где

 L_c — начальная высота столба жидкости в обсадной трубе (расстояние от кровли водоносного пласта до уровня подземных вод), м;

g – ускорение свободного падения, м/сут².

Эталонные кривые построены для значения $\beta = 10^{-11}$, и, следовательно, равенство (14.8.4) можно записать в виде

$$\zeta \approx 10^{-5} \alpha . \tag{14.8.5}$$

Таблица 14.8.1 Таблица значений нормализованного напора для построения эталонных кривых

	ца зпач		P	Bannul	manopa	дли пос	poenna	JIAJIUH	пых крг	
,9	0.1	0.2	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	5
0.0316228	-0 9994887	-0 9994902	-0 9994990	-0 9995070	-0 9995190	-0 9995363	-0 9995504	-0.9995713		-0 9995993
0.0363662	-0 9993281	-0 9993263	-0 9993397	-0 9993420	-0 9993614	-0 9993806	-0 9993964	-0 9994208	-0 9994397	-0 9994555
0.0395285 0.0426908	-0 9992086 -0 9990793	-0 9992107 -0 9990815	-0 9992213 -0 9990932	-0 9992401 -0 9991031	-0 9992445 -0 9991182	-0 9992652 -0 9991407	-0 9992824 -0 9991596	-0 9992801 -0 9991903	-0 9993315	-0 9993500
0.0474342	-0 9988666	-0 9988695	-0 9988829	-0 9988941	-0 9989111	-0 9989368	-0 9989589	-0 9991903	-0 9992153 -0 9990266	-0 9992370 -0 9990540
0.0537587	-0 9985483	-0 9985520	-0 9985688	-0 9985822	-0 9986024	-0 9986336	-0 9986610	-0 9987081	-0 9987391	-0 9987858
0.0632456	-0 9979965	-0 9980024	-0 9980257	-0 9980437	-0 9980706	-0 9981127	-0 9981509	-0 9982186	-0 9982789	-0 9983344
0.0711513	-0 9974688	-0 9974810	-0 9975079	-0 9975307	-0 9975651	-0 9976193	-0 9976692	-0 9977595	-0.9978410	-0 9979164
0.0790569 0.0869626	-0 9968794 -0 9962284	-0 9968908 -0.9962437	-0 9969310 -0 9962956	-0 9969601 -0 9963325	-0 9970039 -0.9963876	-0 9970732 -0 9964754	-0 9971377 -0 9965578	-0 9972559	-0 9973634	-0 9974631
0.0948683	-0 9955161	-0 9955360	-0 9956020	-0 9956483	-0.9963876	-0 9958272	-0 9959308	-0.9967096 -0 9961227	-0 9968485 -0 9962983	-0 9969772 -0 9964608
0.1106797	-0 9939077	-0 9939399	-0.9940425	-0.9941127	-0 9942169	-0 9943835	-0 9945412	-0 9948334	-0 9951003	-0 9953459
0.1264911	-0 9920552	-0 9921040	-0 9922559	-0 9923583	-0 9925094	-0 9927509	-0 9929793	-0 9934017	-0 9937850	-0 9941348
0.1423025	-0 9899599 -0 9876230	-0 9900304 -0 9877207	-0 9902461 -0 9880166	-0 9903899 -0 9882121	-0 9906011 -0 9884982	-0 9909379	-0 9912556 -0 9893797	-0.9918402	-0 9923664	-0 9928421
0.1739253	-0 9850456	-0 9851770	-0 9855713	-0 9882121	-0 9884982	-0 9889526 -0 9868033	-0 9893797	-0 9901608 -0 9883746	-0 9908572 -0 9892689	-0 9914807 -0 9900617
0.1897367	-0 9822293	-0 9824014	-0 9829139	-0 9832480	-0 9837333	-0 9844978	-0 9852094	-0 9864919	-0 9876121	-0 9885951
0.2213594	-0 9758851	-0 9761622	-0 9769780	-0 9775043	-0 9782635	-0 9794484	-0 9805395	-0 9824744	-0 9841292	-0 9855521
0.2529822	-0 9686026	-0 9690205	-0.9702398	-0 9710195	-0 9721364	-0 9738631	-() 9754347	-0 9781767	-0 9804724	-0 9824077
0.2846050 0.3162278	-0 9603946 -0.9512748	-0 9609942 -0 9521021	-0 9627300 -0 9544800	-0 9638311 -0 9559768	-0 9653980 -0 9580927	-0 967 79 64 -0 9612998	-0 9699542 -0 9641512	-0 9736570	-0 9766928	-0 9792032
0.3636619	-0.9312748	-0 9371834	-0 9407848	-0 9430270	-0 9461653	-0 9508522	-0 9549461	-0 9689648 -0 9616917	-0 9728306 -0 9669495	-0 9759688 -0 9711069
0.3952847	-0 9259452	-0 9262139	-0 9321798	-0 9350272	-0 9389866	-0 9448418	-0 9498965	-0 9580948	-0 9630034	-0 9678791
0.4269075	-0 9084819	-0 9105352			-0 9247502	-0 9319204	-0 9380387			-0 9607577
0.4743416	-0 8947298	-0 8975464	-0 9053980							
0.5375872 0.6324555	-0 8632514 -0 8135785	-0 8673412 -0 8201831	-0 8786102 -0 8380771	-0 8853626 -0 8485776	-0 8944811 -0 8624921	-0 9073899 -0 8816423	-0 9179758 -0 8968434	-0 9340335 -0 9189910	-0 9453R51 -0 9339662	-0 9536742 -0 9445502
0.7115125	-0 7673017	-0 7766091	-0 8014756	-0 8158209	-0 8345350	-0 8597084	-0 8791796	-0 9066885	-0 9339662	-0 9371475
0.7905694	-0 7169702	-0 7295735	0 7627801	-0 7816147	-0 8058093	-0 8376400	-0 8616598	-0 8946509	-0 9156473	-0 9299074
0.8696264	-0 6629659	-0 6794859	-0 7224138	-0.7463554	-0 7766480	-0.8156531	-0 8444851	-0 8828959	-0 9068039	-0 9228118
0.9486833	-0 6056883	-0 6267637	-0 6807796	-0 7104052	-0 7473366	-0 7939129	-0 8274940	-0 8714239	-0 8981501	-0 9158457
1.1067970	-0 4829810 -0 3522848	-0 5151022 -0 3979593	-0 5952065 -0 5088214	-0 6377118 -0 5657711	-0 6891964 -0 6328903	-0 7516347 -0 7114323	-0 7948821 -0 7639855	-0 8492890 -0 8281398	-0 8813505 -0 8651446	-0 9022552 -0 8890648
1.4230250	-0 2171309	-0 2786373	-0 4239899	-0 4963320	-0 5794237	-0 6735824	-0 7347865	-0 8078648	-0 8494578	-0 8762274
1.5811390	-0 0810520	-0 1602887	-0 3426759	-0 4307045	-0 5294147	-0 6381472	-0 7071872	-0 7883699	-0 8342370	-0 8637098
1.7392530	0 0597477	-0 0386037	-0 2592066	-0 3625714	-0 4759468	-0 6050646	-0 6738222	-0 7623399	-0 8194373	-0 8442461
1.8973670 2.2135940	0 1802728 0 4066508	0 0620478 0.2492937	-0 1964942 -0.0784390	-0 3142473 -0.2201264	-0 4408436 -0.3675417	-0 5742069 -0 5185081	-0 6562890 -0 6103452	-0 75143R8 -0 7169161	-0 8050439 -0 7773380	-0 8395387 -0 8164029
2.5298220	0 5647406	0.2492937	-0.0784390	-0 1617035	-0.3073417	-0 4831462	-0 5819047	-0 6978197	-0 7509616	-0 8075058
2.8460500	0 6811030	0 4694111	0 0650168	-0 0968489	-0 2602688	-0 4270546	-0 5304684	-0 6540089	-0 7257946	-0 7728430
3.1622780	0 7100277	0 4939368	0 0949209	-0 0621304	-0 2219805	-0 3890578	-0 4954981	-0 6252020	-0 7016959	-0 7522230
3.6366190 3.9528470	0 6204110 0 4871206	0 4349310 0 3465758	0 1012577 0 0882034	-0 0335466	-0 1781301 -0 1556584	-0 3398395 -0 3113242	-0 4198530	-0 5849806 -0 5599474	-0 6675513 -0 6459305	-0 7227334
4.2690750	0 3138511	0 2343067	0.0676211	-0 0251592 -0 0219888	-0 1371938	-0 3113242	-0 4198530	-0 5362293	-0 6252068	-0 7039170 -0 6857313
4.7434160	0 0221868	0 0516035	0 0321753	-0 0224633	-0 1151268	-0 2520498	-0 3578603	-0 5029083	-0 5956538	-0 6595645
5.3758720	-0 3226809	-0 1543438	-0 0083375	-0 0259789	-0 0931193	-0 2144593	-0 3161236	-0 4623004	-0 5588830	-0 6266026
6.3245550 7.1151250	-0.5191564 -0 3413663	-0 2671865 -0 1818502	-0 0364754 -0 0347609	-0 0284103	-0 0702290 -0 0570098	-0 1702739 -0 1419167	-0 2640067 -0 2283612	-0 4085330	-0 5087715	-0 5809008
7.9056940	0 0000345	-0 0260065	-0.0237358	-0 0267037 -0 0234349	-0 0370098	-0 1419167	-0 1984082	-0 3693645 -0 3345921	-0 4711058 -0 4367299	-0 5458994 -0 5134182
8.6962640	0 2889492	0 0976436	-0.0133871	-0 0201256	-0 0398682	-0 1012090	-0 1731322	-0 3036493	-0 4053004	-0 4832304
9.4868330	0 3712172	0 1324266	-0 0076810	-0 0174314	-0 0342002	-0 0865608	-0 1517201	-0 2760565	-0 3765203	-0 4551380
11.0679700 12.6491100	-0 0175825	0 0038717	-0 0067373 -0 0078797	-0 0138969	-0 0262392	-0 0648749	-0 1179834	-0 2293403	-0 3259029	-0 4045587
14.2302500	-0 2697976 0 0210926	-0 0/30436	-0 00/8/9/	-0 0117142 -0 0101100	-0 0210572 -0 0174922	-0 0501425 -0 0398784	-0 0932710 -0 0749361	-0 1918026 -0 1614586	-0 2831426 -0 2468765	-0 3604938 -0 3219817
15.8113900	0 1919487	0 0343077	-0 0057706	-0 0088652	-0 0149222	-0 0325499	-0 0611644	-0 1367944	-0 2160073	-0 2882303
17.3925300	-0 0245533	-0 0023975	-0 0051544	-0 0078860	-0 0129959	-0 0271915	-0 0506946	-0 1166434	-0 1896467	-0 2585794
18.9736700	-0 1392019	-0 0205130	-0 0047403	-0 0071000	-0 0115044	-0 0231824	-0 0426395	-0 1000984	-0 1670685	-0 2324735
22.1359400 25.2982200	0 0982621 -0 0712917	0 0081874 -0 0062591	-0 0039915 -0 0034473	-0 0059164 -0 0050685	-0 0093529 -0 0078791	-0 0177218 -0 0142700	-0 0314278 -0 0243153	-0 0751356 -0 0578340	-0 1309732 -0 1040662	-0 1890850 -0 1550702
28.4605000	0 0497607	0 0014029	-0 0030330	-0 0044320	-0 0068071	-0 0119318	-0 0195916	-0 0456193	-0 0838062	-0 1282238
31.6227800	-0 0362603	-0 0023312	-0 0027070	-0 0039369	-0 0059923	-0 0102553	-0 0163146	-0 0368358	-0 0684017	-0 1069007
36,3661900	-0 0099974	-0 0010312	-0 0023307	-0 0033713	-0.0050806	-0.0084791	-0 0130016	-0 0278316	-0 0517069	-0 0826443
39.5284700 42.6907500	0 0072009	-0 0007348 -0 0008051	-0 0021328 -0 0019664	-0 0030764	-0 0046129 -0 0042241	-0 0076061 -0 0068984	-0 0114492 -0 0102321	-0 0236555 -0 0204524	-0 0436080 -0 0372390	-0 0703363 -0 0603551
47.4341690	0 0058930	-0 0006352	-0 0017590	-0 0028288 -0 0025239	-0 0037499	-0 0060562	-0 0088334	-0 0169026	-0 03 723 90	-0 0487112
53.7587206	0 0027371	-0 0005871	-0 0015426	-0 0022067	-0 0032618	-0 0052108	-0 0074804	-0 0136693	-0 0234323	-0 0376251
63.2455500	-0 0012546	-0 0005088	-0 0013021	-0 0018564	-0 0027289	-0 0043105	-0 0060936	-0 0106130	-0 0172775	-0 0269885
71.1512500 79.0569400	0 0002961 -0 0000576	-0.0004500 -0.0004047	-0 0011523 -0 0010334	-0 0016395	-0 0024018	-0 0037688 -0 0033483	-0 0052825 -0 0046637	-0 0089592 -0 0077622	-0 0140791 -0 0118652	-0 0213978 -0 0175581
86.9626400	-0 0000376	-0.0003676	-0 0010334	-0 0014679 -0 0013287	-0 0021447 -0 0019373	-0 0033483	-0 0046637	-0 0077622	-0 0118652	-0 0175581
94.8683300	-0 0002991	-0.0003366	-0 0009366	-0 0013287	-0 0017675	-0 0027397	-0 0037803	-0 9061409	-0 0090427	-0 0128077
110.6797000	-0 0001427	-0 0002881	-0 0007313	-0 0010345	-0 0015015	-0 0023155	-0 0031791	-0 0050883	-0 0073280	-0 0100703
126.4911000	-0 0001250	-0 0002518	-0 0006380	-0 0009014	-0 0013057	-0 0020061	-0 0027432	-0 0043468	-0 0061726	-0 0083160
142.3025000 158.1139000	-0 0001116 -0 0001002	-0 0002236 -0 0002011	-0 0005658 -0 0005083	-0.0007986 -0.0007168	-0 0011529 -0 0010355	-0 0017697 -0 0015831	-0 0024125 -0 0021530	-0 0037952 -0 0033684	-0 0053378 -0 0047047	-0 0070963 -0 0061968
173.9253000	-0.0000911	-0 0002011	-0.0004614	-0 0007168 -0 0006502	-0 0010355	-0 0013831	-0 0021310	-0 0030282	-0 0047047	-0 0055040
189.7367000	-0 0000835	-0 0001675	-0 0004198	-0 0005950	-0 0008579	-0 0013073	-0 0017718	-0 0027505	-0 0038054	-0 0049529
221.3594000	-0.0000715	-0.0001434	-0.0003613	-0.0005085	-0 0007323	-0 0011134	0 0014687	-0 0023243	-0 0031684	-0 0041294
252.9822000 284.6050000	-0 0000626	-0 0001254	-0 0003157	-0 0004440	-0 0006387	-0 0009695	-0 0013085 -0 0011571		-0 0027555 -0 0024219	-0 0035424
204.0030000	-0 0000556	-0 0001114	-0.0002803	-0 0003939	-0 0005663	-0 0008585	-0 00113/1	i	-0 0024219	-0 0031021

Отсюда при равенстве диаметров обсадной трубы и фильтра опытной скважины получаем эталонные кривые для водоотдачи пласта, выраженной формулой

$$S \approx \frac{10^{-5}}{2\varsigma}$$
. (14.8.6)

Таблииа 14.9.1

Решение Катр

10

Катр [Van der Kamp, 1976] выводит свое решение из волнового уравнения для затухающих колебаний. Изменение уровня в опытной скважине при его осцилляции записывается в следующем виде:

$$s_{w} = s^{0} \exp \left(-\sqrt{\frac{g}{L_{c} + 0.375l_{w}}} \lambda t\right) \cos \left[\sqrt{\frac{g(1 - \lambda^{2})}{L_{c} + 0.375l_{w}}} t\right],$$
 (14.8.7)

$$\lambda = -\frac{r_c^2}{8T} \sqrt{\frac{g}{L_c + 0.375l_w}} \ln \left(0.79r_w^2 \frac{S}{T} \sqrt{\frac{g}{L_c + 0.375l_w}} \right). \tag{14.8.8}$$

На основе уравнения (14.8.7) подбором определяют водоотдачу проводимость водоносного пласта на графике временного прослеживания.

14.9. Радиус влияния при экспресс-опробовании

Guyonnet с соавт. [1993] предложили аналитические решения для определения радиуса влияния экспресс-опробования в напорном, полностью проницаемом пласте. Радиус влияния оценивается с различной точностью (в процентном отношении от начального изменения напора: 1, 5 и 10 %) и рассчитывается на любое время от начала опробования для заданных параметров водоотдачи и проводимости пласта. Аналитические зависимости для определения радиуса влияния и максимального радиуса влияния приведены в табл. 14.9.1.

Определение радиуса влияния

Точность Зависимость радиуса влияния от Максимальное значение определения, % времени, м радиуса влияния, м $R_{\text{max}} = 8.37 \left(\frac{r_c^2}{2Sr_{...}^2} \right)$ $R = 3.54 \left(\frac{at}{r_{\cdots}^2} \right)$ 1 $R_{\text{max}} = 3.53 \left(\frac{r_c^2}{2Sr_w^2} \right)^{0.5}$ $R = 2.74 \left(\frac{at}{r_{\rm co}^2}\right)^{0.4}$ 5 $R_{\text{max}} = 2.32 \left(\frac{r_c^2}{2.5r^2} \right)^{0.44}$ $R = 2.36 \left(\frac{at}{r^2} \right)^{3}$

14.10. Аналитическая обработка экспресс-опробований на основе решений для стандартных опытно-фильтрационных расчетных схем

Разработанных расчетных схем, в которых может проводиться экспрессопробование, явно не достаточно (особенно учитывая то, что опробование обычно проводится не в специально для этого оборудованных скважинах, а в уже имеющихся, пробуренных и спроектированных для других целей). Автором была предпринята попытка адаптировать аналитические решения для стандартных опытно-фильтрационных опробований к экспресс-методам. Для этого на основе данных об изменении во времени напора рассчитываем расход на каждый временной интервал:

$$Q_i = \pi r_w^2 \frac{s_{i+1} - s_i}{t_{i+1} - t_i}, \qquad (14.10.1)$$

гле

i – номер замера;

 Q_i, s_i, t_i – расход (м³/сут), изменение уровня (м) и время (сут) *i*-го замера.

Предварительно рассчитав расход, приходим к условиям кратковременной откачки (нагнетания) при переменном во времени расходе (см. раздел 13). Чем подробнее информация о восстановлении напора, тем точнее последующая обработка. Такое представление эксперимента позволяет использовать для обработки и получения искомых параметров все доступные аналитические решения и способы обработки по ним для любой расчетной схемы. Преимущество данного способа заключается также в том, что появляется возможность при интерпретации использовать наблюдательные скважины. Особенно выигрышной эта обработка становится при немгновенном изменении начального уровня, опробовании в слоистых системах, наличии границ фильтрационного потока или при существенной профильной анизотропии.

14.11. Рекомендации по проведению экспресс-опробований

Большой вклад в улучшение качества проведения экспресс-опробований сделали Butler с соавт. [1996]. Геологической службой Канзаса были проведены многочисленные опробования водоносных пластов при помощи экспресс-методов. Для улучшения качества оценки фильтрационных параметров при проведении экспресс-опробований авторы на основе собственного опыта предлагают ряд советов, которых, как нам кажется, следует придерживаться при проведении опытов и их последующей обработке.

- 1. На одной скважине должно быть проведено не менее трех опробований.
- 2. На каждой скважине должно быть не менее двух различных начальных изменений напора.
 - Первые два условия легко осуществить на практике ввиду кратковременности эксперимента и несложности его проведения. Независимо от количества опытов перед началом эксперимента требуется провести прокачку скважины.
- 3. Экспресс-опробование должно проводиться с мгновенным наливом или забором воды, а также требуется точное измерение начального изменения напора.
- 4. Необходимо иметь подходящее оборудование для записи изменений напоров во времени (для коэффициентов фильтрации больше 10-15 м/сут желательно пользоваться электронными записывающими устройствами).

- 5. Для оценки емкостных параметров, по возможности, следует пользоваться наблюдательными скважинами. Здесь особенно подходит использование аналитических решений для стандартных ОФО.
- 6. Для анализа проведенного опробования необходимо выбрать правильный метод:
 - метод Hvorslev для полностью или частично проницаемой скважины в напорном пласте;
 - метод Bouwer и Rice для безнапорного пласта при наличии фильтра ниже уровня грунтовых вод;
 - эталонные кривые Соорег для напорного полностью проницаемого пласта;
 - метод Nguyen и Pinder для частично проницаемых скважин в напорных пластах.

Сюда, несомненно, следует добавить численное моделирование и обработку с учетом замены восстановления напора на переменный во времени расход.

- 7. При обработке экспресс-опробований предпочтительнее использовать графоаналитические метолы.
- 8. Для проведения экспресс-опробований необходимо выбирать скважины с подходящей для этого конструкцией и отсутствием скин-эффекта.

Последнее может стать решающим в правильности интерпретации эксперимента, так как обработка с наличием «скина» является достаточно субъективной. Экспрессопробование предпочтительнее проводить в трещиноватых или трещиновато-пористых породах с подчиненной ролью блоковой проницаемости по отношению к проницаемости трещин. В пористых отложениях результаты могут оказаться существенно хуже из-за трудно предсказуемого влияния скин-эффекта.



Функция $A(u,\beta)$ для скважин с постоянным понижением (самоизливающиеся скважины) в пластах без перетекания

Функция:
$$A(u,\beta) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{J_0(\tau)Y_0(\tau\beta) - Y_0(\tau)J_0(\tau\beta)}{J_0^2(\tau) + Y_0^2(\tau)} \frac{\exp(-u\tau^2)}{\tau} d\tau$$
.

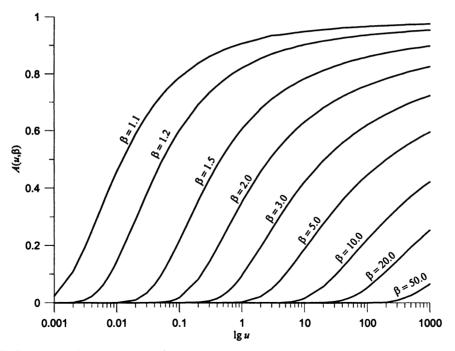


Рис. П1. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация [Hantush, 1964c]:

Диапазон	Зависимость
u < 0.05	$A(u,\beta) \approx \frac{1}{\sqrt{\beta}} \left[\operatorname{erfc} \frac{\beta - 1}{2\sqrt{u}} + \frac{(\beta - 1)\sqrt{u}}{4\beta} i \operatorname{erfc} \frac{\beta - 1}{2\sqrt{u}} \right]$
<i>u</i> > 500	$A(u,\beta) \approx \frac{W\left[\beta^2/(4u)\right]}{\ln(2.25u)}$

Условные обозначения:

 $\operatorname{erfc}(\beta)$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $i\operatorname{erfc}(\beta)$ – кратный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $J_0(eta), Y_0(eta)$ – функции Бесселя (Приложение 2);

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26).

Значения функции $A(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0.001\div 1000$, $\beta=1.0\div 100.0$.

Значения функции $A(u, \beta)$

" \begin{align*}	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	20.0			50.0	60.0				100.0
0.001	1.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.002	1.000	0.109	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.003	1.000	0.188	0 009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.004	1.000	0 251	0.023	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.005	1.000	0.303	0.042	0.002	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.006	1.000	0.345	0.062	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000
0.007	1.000	0.380	0.083	0.010	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.008	1.000	0.410	0.104	0.016	0.001	0.000	0.000	0.000	0 000	0 000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000
0.009	1.000	0.435	0.124	0.022	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.01	1.000	0.458	0.144	0.030	0.004	0.000	0.000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.02	1 000	0.589	0.290	0 117	0.039	0.010	0.002	0.000	0.000	0.000	0,000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.03	1.000	0.652	0.379	0.194	0 087	0 034	0.011	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.04	1.000	0.691	0.439	0.254	0.133	0.063	0.027	0.010	0.004	0.001	0,000	0.000	0,000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	1 000	0.718	0.485	0.302	0 175	0.093	0.046	0.021	0 009	0 003	0 001	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.06	1.000	0.739	0.517	0.341	0.211	0.122	0 066	0.033	0 016	0 007	0 003	0.000	0.000	0 000	0.000	0 000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.07	1 000	0 754	0.544	0.373	0.242	0.149	0.087	0.047	0.024	0 012	0.005	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.08	1 000	0.767	0 566	0.400	0 270	0.174	0.106	0.062	0 034	0.018	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0 000	0.000	0 000	0.000	0.000	0 000	0.000

			_			-																						
, S	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
0.09	1.000	0.778	0.585	0.423	0.294	0.196	0.125	0.077	0.045	0.025	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.000	0.787	0.601	0.443	0.316	0.217	0.143	0.091	0.055	0.032	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.000	0.837	0.691	0.562	0.450	0.355	0.275	0.209	0.156	0.114	0.082	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.3	1.000	0.860	0.733	0.620	0.519	0.430	0.352	0.286	0.229	0.181	0.142	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.4	1.000	0.873	0.758	0.655	0.562	0.479	0.405	0.339	0.282	0.233	0.191	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	1.000	0.883	0.776	0.680	0.592	0.514	0.443	0.380	0.323	0.274	0.230	0.027	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.6	1.000	0.890	0.789	0.698	0.615	0.540	0.472	0.411	0.356	0.307	0.263	0.040	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.7	1.000	0.895	0.800	0.713	0.634	0.562	0.496	0.436	0.382	0.334	0.290	0.054	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.8	1.000	0.899	0.808	0.725	0.649	0.579	0.515	0.457	0.405	0.357	0.313	0 068	0.009	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.9	1.000	0.903	0.815	0.735	0.661	0.594	0.532	0.475	0.424	0.377	0.334	0.082	0.013	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	1.000	0.906	0.821	0.743	0.672	0.606	0.546	0.491	0.440	0.394	0.351	0.095	0.018	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0 000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.000	0.924	0.854	0.790	0.732	0.677	0.627	0.580	0.536	0.496	0.458	0.194	0.071	0.022	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1.000	0.935	0.870	0.812	0.760	0.711	0.665	0.623	0.583	0.546	0.511	0.256	0.119	0.049	0.018	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
4	1.000	0.937	0.879	0.826	0.777	0.731	0.689	0.649	0.612	0.577	0.544	0.300	0.157	0.076	0.034	0.014	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1.000	0.940	0.886	0.835	0.789	0.746	0.706	0.668	0.633	0.599	0.568	0.332	0.188	0.101	0.051	0.024	0.010	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.000	0.943	0.890	0.842	0.798	0.757	0.718	0.682	0.648	0.616	0.586	0.357	0.214	0.123	0.067	0.035	0.017	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.000	0.945	0.894	0.848	0.805	0.765	0.728	0.693	0.661	0.630	0.601	0.378	0.235	0.142	0.082	0.046	0.024	0.012	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.000	0.946	0.898	0.853	0.811	0.773	0.737	0.703	0.671	0.641	0.613	0.395	0.254	0.159	0.097	0.056	0.032	0.017	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.000	0.948	0.900	0.857	0.816	0.779	0.743	0.711	0.680	0.650	0.623	0.409	0.270	0.175	0.110	0.067	0.039	0.022	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.000	0.949	0.903	0.860	0.820	0.784	0.749	0.717	0.687	0.658	0.631	0.422	0.284	0.188	0.122	0.077	0.047	0.028	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
20	1.000	0.956	0.916	0.879	0.845	0.813	0.783	0.756	0.729	0.704	0.681	0.497	0.370	0.277	0.207	0.153	0.112	0.081	0.057	0.001	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	1.000	0.959	0.922	0.888	0.856	0.827	0.800	0.774	0.750	0.726	0.705	0.534	0.415	0.325	0.256	0.201	0.157	0.122	0.094	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40	1.000	0.962	0.926	0.894	0.864	0.836	0.810	0.786	0.762	0.741	0.720	0.558	0.444	0.358	0.290	0.235	0 190	0.153	0.123	0.009	0,000		0.000	0.000		0,000	0.000	0.000
50	1.000	0.963	0.929	0.898	0.869	0.843	0.818	0.794	0.772	0.751	0.731	0.574	0.464	0.381	0.314	0.260	0 215	0.177	0.146	0.016		0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
60	1.000	0.964	0.931	0.901	0.874	0.848	0.823	0.800	0.779	0.759	0.739	0.588	0.481	0.399	0.334	0.281	0.236	0.199	0.167	0.023	0.002	0.000	0.000	0.000	_	0.000	0.000	0.000
70	1.000	0.965	0.933	0.904	0.877	0.851	0.828	0.806	0.785	0.765	0.746	0.598	0.494	0.414	0.350	0.297	0.253	0.216		0.031	0.003	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
80	1.000	0.966	0.935	0.906	0.879	0.855	0.832	0.810	0.789	0.770	0.752	0.607	0.505	0.427	0.364	0.312	0.268	0.230		0.038		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	1.000	0.966	0.936	0.908	0.882	0.857	0.835	0.813	0.793	0.774	0.756	0.614	0.514	0.437	0.374	0.323	0.280	0.242	0.210	0.046	$\overline{}$	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	1.000	0.967	0.937	0.909	0.884	0.860	0.838	0.817	0.797	0.778	0.760	0.621	0.522	0.446	0.385	0.334	0.291	0.254	0.222	0.053	0.010	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
200	1.000	0.970	0.943	0.918	0.895	0.874	0.854	0.835	0.817	0.800	0.784	0.658	0.569	0.500	0.444	0.397	0.357	0.322	0.291	0.110		0.011	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	
300	1.000	0.972	0.946	0.923	0.901	0.881	0.862	0.844	0.827	0.811	0.796	0.677	0.593	0.528		0 430		0.358		0.146		0.026	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
400	1.000	0.973	0.948	0.926	0.905	0.886	0.867	0.850	0.834	0.819	0.804	0.690	0.609	0.546		0.451	0.414	0.382	0.353	0.173		0.040	_	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000
500		0.974	0.950	0.928	0.908	0.889	0.871	0.855	0.839	0.824	0.810	0.699	0.620	0.559	0.510	0.468	0.432	0.400		0.194	0.104	0.054	0.026	0.012	0.005	0 002	0.001	0.000
600	1.000	0.974	0.951	0.930	0.910	0.891	0.874	0.858	0.842	0.828	0.814	0.706	0.629	0.569	0 520	0.479	0.444	0.413	0.385	0.210	0.119	0.066	0.035	0.018	0.008	0.004	0.002	0.001
700	1.000	0.975	0.952	0.931	0.912	0.893	0.877	0.861	0.846	0.831	0.818	0.712	0.636	0.578	0.530			0.424	0 397	0.223	0.132	0.077	0.044	0.024	0.012	0.006	0.003	0.001
800	1.000	0.975	0.953	0.932	0.913	0.895	0.879	0.863	0.848	0.834	0.821	0.716	0.642	0.585	0.538	0.498	0.464	0.434	0.407	0.235	0.143	0.087	0.052	0.030	0.016	0.009	0.004	0.002
900	1.000	0.976	0.954	0.933	0.914	0.897	0.880	0.865	0.850	0.837	0.824	0 720	0.647	0.591	0.544	0 505	0.471	0 442	0.415	0.245	0.153	0.096	0.059	0.035	0 020	0.011	0.006	
1000	1.000	0.976	0.954	0.934	0.915	0.898	0.882	0.867	0.852	0.839	0.826	0.724	0.652	0.596	0.550	0.511	0.478	0.449	0.422	0.254	0.162	0.104	0.066	0.041	0.024	0.014	0.008	0.004

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции $A(u,\beta)$ взяты из [Jaeger, 1956].

<u>Литература:</u> Jaeger, 1956; Hantush, 1964с; Карслоу, Егер, 1964.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Функции Бесселя

 $J_0(u)$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка;

 $J_1(u)$ — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка;

 $Y_0(u)$ — функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка;

 $Y_1(u)$ — функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка;

 $I_0(u)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка;

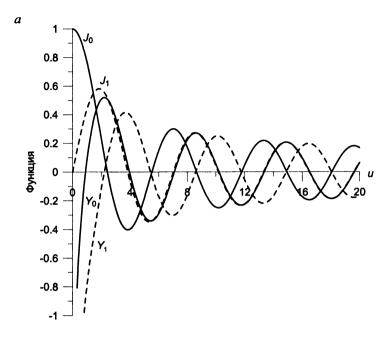
 $I_1(u)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка;

 $K_0(u)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 0-го порядка;

 $K_1(u)$ — модифицированная функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка.

Функция	Производная
$J_0(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(u \sin \tau) d\tau$	$J_0'(u) = -J_1(u)$
$J_1(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(u \sin \tau - \tau) d\tau$	$J_1'(u) = J_0(u) - \frac{1}{u}J_1(u)$
$Y_0(u) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} \cos(u\cos\tau) \left[\gamma + \ln(2u\sin^2\tau) \right] d\tau$	$Y_0'(u) = -Y_1(u)$
$Y_1(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(u \sin \tau - \tau) d\tau - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (e^{\tau} + e^{-\tau} \cos \pi) \exp(-u \sinh \tau) d\tau$	$Y_1'(u) = Y_0(u) - \frac{1}{u}Y_1(u)$
$I_0(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(u \cos \tau) d\tau$	$I_0'(u) = I_1(u)$
$I_1(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(u \cos \tau) \cos \tau d\tau$	$I_1'(u) = I_0(u) - \frac{1}{u}I_1(u)$
$K_0(u) = \int_0^\infty \cos(u \sinh \tau) d\tau$	$K_0'(u) = -K_1(u)$
$K_1(u) = \int_0^\infty \exp(-u\cosh\tau)d\tau$	$K_1'(u) = -K_0(u) - \frac{1}{u}K_1(u)$

 Π р и м е ч а н и е . $\gamma = 0.5772156649$ — постоянная Эйлера.



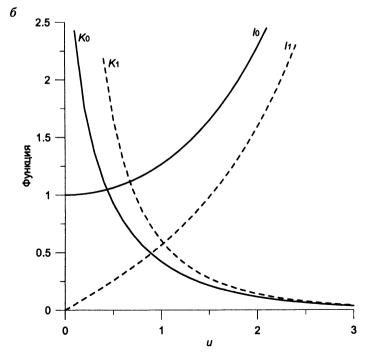


Рис. П2. Зависимость функций $J_0(u)$, $J_1(u)$, $Y_0(u)$, $Y_1(u)$ (a) и $I_0(u)$, $I_1(u)$, $K_0(u)$, $K_1(u)$ (b) от аргумента.

Функции $J_0(u)$ и $J_1(u)$

	23
Диапазон	Зависимость
u < 0.1	$J_0(u) \approx 1$ — для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> ≤ 3	$J_0(u) = 1 - 2.2499997\omega^2 + 1.2656208\omega^4 - 0.3163866\omega^6 + 0.0444479\omega^8 - 0.0039444\omega^{10} + 0.00021\omega^{12}$
<i>u</i> ≥ 3	$\begin{split} J_0(u) &= \frac{f_0}{\sqrt{u}} \cos \theta_0 , \\ f_0 &= 0.79788456 - 0.00000077\omega^{-1} - 0.0055274\omega^{-2} - 0.00009512\omega^{-3} + 0.00137237\omega^{-4} - 0.00072805\omega^{-5} + 0.00014476\omega^{-6} , \\ \theta_0 &= u - 0.78539816 - 0.04166397\omega^{-1} - 0.00003954\omega^{-2} + 0.00262573\omega^{-3} - 0.00054125\omega^{-4} - 0.00029333\omega^{-5} + 0.00013558\omega^{-6} \end{split}$
<i>u</i> > 16	$J_0(u) pprox \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \cos \left(u - \frac{\pi}{4} \right)$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
u < 0.1	$J_1(u) \approx 0.5u$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> ≤ 3	$J_1(u) = u \Big(0.5 - 0.56249985\omega^2 + 0.21093573\omega^4 - 0.03954289\omega^6 + 0.00443319\omega^8 - 0.00031761\omega^{10} + 0.00001109\omega^{12} \Big)$
<i>u</i> ≥ 3	$J_1(u) = \frac{f_1}{\sqrt{u}}\cos\theta_1,$ $f_1 = 0.79788456 + 0.00000156\omega^{-1} + 0.01659667\omega^{-2} + 0.00017105\omega^{-3} - 0.00249511\omega^{-4} + 0.00113653\omega^{-5} - 0.00020033\omega^{-6},$ $\theta_1 = u - 2.35619449 + 0.12499612\omega^{-1} + 0.0000565\omega^{-2} - 0.00637879\omega^{-3} + 0.00074348\omega^{-4} + 0.00079824\omega^{-5} - 0.00029166\omega^{-6}$
<i>u</i> > 16	$J_1(u) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \sin\left(u - \frac{\pi}{4}\right)$ — для практических расчетов [Hantush, 1964c]

Примечание. w = u/3.

Функции $Y_0(u)$ и $Y_1(u)$

	Ψynκηνη 1 ₀ (u) η 1 ₁ (u)
Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.01	$Y_0(u) \approx \frac{2}{\pi} \left(0.5772 + \ln \frac{u}{2} \right)$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
$u \leq 3$	$Y_0(u) = \frac{2}{\pi} \ln \frac{u}{2} J_0(u) + 0.36746691 + 0.60559366\omega^2 - 0.74350384\omega^4 + 0.25300117\omega^6 - 0.04261214\omega^8 + 0.00427916\omega^{10} - 0.00024846\omega^{12}$
<i>u</i> ≥ 3	$Y_0(u) = \frac{f_0}{\sqrt{u}} \sin \theta_0,$ $f_0 = 0.79788456 - 0.00000077\omega^{-1} - 0.0055274\omega^{-2} - 0.00009512\omega^{-3} + 0.00137237\omega^{-4} - 0.00072805\omega^{-5} + 0.00014476\omega^{-6},$ $\theta_0 = u - 0.78539816 - 0.04166397\omega^{-1} - 0.00003954\omega^{-2} + 0.00262573\omega^{-3} - 0.00054125\omega^{-4} - 0.00029333\omega^{-5} + 0.00013558\omega^{-6}$
<i>u</i> > 16	$Y_0(u) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \sin\left(u - \frac{\pi}{4}\right)$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> < 0.01	$Y_1(u) \approx -\frac{2}{\pi u}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> ≤ 3	$Y_1(u) = \frac{1}{u} \left(\frac{2u}{\pi} \ln \frac{u}{2} J_1(u) - 0.6366198 + 0.2212091\omega^2 + 2.1682709\omega^4 - 1.3164827\omega^6 + 0.3123951\omega^8 - 0.0400976\omega^{10} + 0.0027873\omega^{12} + 0.0027873\omega^{12} \right)$
<i>u</i> ≥ 3	$Y_{1}(u) = \frac{f_{1}}{\sqrt{u}}\sin\theta_{1},$ $f_{1} = 0.79788456 + 0.00000156\omega^{-1} + 0.01659667\omega^{-2} + 0.00017105\omega^{-3} - 0.00249511\omega^{-4} + 0.00113653\omega^{-5} - 0.00020033\omega^{-6},$ $\theta_{1} = u - 2.35619449 + 0.12499612\omega^{-1} + 0.0000565\omega^{-2} - 0.00637879\omega^{-3} + 0.00074348\omega^{-4} + 0.00079824\omega^{-5} - 0.00029166\omega^{-6}$
u > 16	$Y_1(u) \approx -\sqrt{\frac{2}{\pi u}}\cos\left(u - \frac{\pi}{4}\right)$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]

Функции $I_0(u)$ и $I_1(u)$

Диапазон	Зависимость
u < 0.1	$I_0(u) \approx 1$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
$u \le 3.75$	$I_0(u) = 1 + 3.5156229\omega^2 + 3.0899424\omega^4 + 1.2067492\omega^6 + 0.2659732\omega^8 + 0.0360768\omega^{10} + 0.0045813\omega^{12}.$
<i>u</i> ≥ 3.75	$I_0(u) = \frac{e^u}{\sqrt{u}} \left(0.39894228 + 0.01328592\omega^{-1} + 0.00225319\omega^{-2} - 0.00157565\omega^{-3} + 0.00916281\omega^{-4} - 0.02057706\omega^{-5} + 0.002635537\omega^{-6} - 0.01647633\omega^{-7} + 0.00392377\omega^{-8} \right)$
<i>u</i> > 5	$I_0(u) \approx \left(1 + \frac{1}{8u}\right) \frac{e^u}{\sqrt{2\pi u}}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> < 0.1	$I_1(u) \approx 0.5u$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
$u \le 3.75$	$I_1(u) = u \Big(0.5 + 0.87890594\omega^2 + 0.51498869\omega^4 + 0.15084934\omega^6 + 0.02658733\omega^8 + 0.00301532\omega^{10} + 0.00032411\omega^{12} \Big)$
<i>u</i> ≥ 3.75	$I_1(u) = \frac{e^u}{\sqrt{u}} \begin{pmatrix} 0.39894228 - 0.03988024\omega^{-1} - 0.00362018\omega^{-2} + 0.00163801\omega^{-3} - 0.01031555\omega^{-4} + 0.02282967\omega^{-5} - 0.02895312\omega^{-6} + 0.01787654\omega^{-7} - 0.00420059\omega^{-8} \end{pmatrix}$
<i>u</i> > 5	$I_1(u) \approx \left(1 - \frac{3}{8u}\right) \frac{e^u}{\sqrt{2\pi u}}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]

Примечание. $\omega = u/3.75$.

Функции $K_0(u)$ и $K_1(u)$

Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.05	$K_0(u) \approx \ln \frac{1.12}{u}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c)]
<i>u</i> ≤ 2	$K_0(u) = -\ln \omega I_0(u) - 0.57721566 + 0.4227842\omega^2 + 0.23069756\omega^4 + 0.0348859\omega^6 + 0.00262698\omega^8 + 0.0001075\omega^{10} + 0.0000074\omega^{12}$
<i>u</i> ≥ 2	$K_0(u) = \frac{e^{-u}}{\sqrt{u}} \begin{pmatrix} 1.25331414 - 0.07832358\omega^{-1} + 0.02189568\omega^{-2} - 0.01062446\omega^{-3} + 0.00587872\omega^{-4} - \\ -0.0025154\omega^{-5} + 0.00053208\omega^{-6} \end{pmatrix}$
<i>u</i> > 5	$K_0(u) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \left(1 - \frac{1}{8u}\right) e^{-u}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
	
<i>u</i> < 0.05	$K_1(u) \approx \frac{1}{u}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]
<i>u</i> ≤ 2	$K_1(u) = \frac{1}{u} \left(u \ln \omega I_1(u) + 1 + 0.15443144 \omega^2 - 0.67278579 \omega^4 - 0.18156897 \omega^6 - 0.01919402 \omega^8 - 0.00110404 \omega^{10} - 0.00004686 \omega^{12} \right)$
<i>u</i> ≥ 2	$K_1(u) = \frac{e^{-u}}{\sqrt{u}} \left(1.25331414 + 0.23498619\omega^{-1} - 0.0365562\omega^{-2} + 0.01504268\omega^{-3} - 0.00780353\omega^{-4} + \right)$
<i>u</i> > 5	$K_1(u) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \left(1 + \frac{3}{8u}\right) e^{-u}$ – для практических расчетов [Hantush, 1964c]

 Π римечание. $\omega = u/2$.

Значения функций Бесселя даны в табличном виде для диапазонов аргумента $u=0\div 20.0$ и $u=0\div 1.0$.

Значения функций Бесселя для аргумента $u = 0 \div 20.0$

# 1	$J_0(u)$	$J_1(u)$	Y ₀ (u)	Y ₁ (u)	I ₀ (u)	I ₁ (u)	K ₀ (u)	K ₁ (u)
0.0	1	0	00	0 0	1	0	80	o o
0.1	9.97502E-01	4.99375E-02	-1 53424E+00	-6.45895E+00	1.00250E+00	5.00625E-02	2.42707E+00	9.85384E+00
0.2	9.90025E-01	9.95008E-02	-1.08111E+00	-3.32382E+00	1.01003E+00	1.00501E-01	1.75270E+00	4.77597E+00
0.3	9.77626E-01	1.48319E-01	-8.07274E-01	-2.29311E+00	1.02263E+00	1.51694E-01	1.37246E+00	3.05599E+00
0.4	9.60398E-01	1.96027E-01 2.42268E-01	-6.06025E-01 -4.44519E-01	-1 78087E+00 -1.47147E+00	1.04040E+00 1.06348E+00	2.04027E-01 2.57894E-01	1.11453E+00 9 24419E-01	2.18435E+00 1.65644E+00
0.5	9.38470E-01 9.12005E-01	2.86701E-01	-3 08510E-01	-1.26039E+00	1.09205E+00	3.13704E-01	7.77522E-01	1.30283E+00
0.6	8.81201E-01	3.28996E-01	-1.90665E-01	-1.10325E+00	1.12630E+00	3.71880E-01	6 60520E-01	1.05028E+00
0.8	8 46287E-01	3.68842E-01	-8.68023E-02	-9.78144E-01	1.16651E+00	4.32865E-01	5 65347E-01	8 61782E-01
0.9	8.07524E-01	4.05950E-01	5 62831E-03	-8.73127E-01	1 21299E+00	4.97126E-01	4 86730E-01	7.16534E-01
1.0	7 65198E-01	4.40051E-01	8.82570E-02	-7.81213E-01	1.26607E+00	5.65159E-01	4.21024E-01	6.01907E-01
1.1	7.19622E-01	4.70902E-01	1.62163E-01	-6.98120E-01	1.32616E+00	6.37489E-01	3.65602E-01	5.09760E-01
1.2	6.71133E-01	4.98289E-01	2.28084E-01	-6.21136E-01	1.39373E+00	7.14678E-01	3 18508E-01	4 34592E-01
1.3	6.20086E-01	5.22023E-01	2.86535E-01	-5.48520E-01 -4.79147E-01	1.46928E+00 1.55340E+00	7.97329E-01 8.86092E-01	2 78248E-01 2.43655E-01	3.72547E-01 3.20836E-01
1.4	5.66855E-01 5.11828E-01	5.41948E-01 5.57937E-01	3.37895E-01 3.82449E-01	-4.12309E-01	1.53340E+00	9 81666E-01	2.13806E-01	2.77388E-01
1.6	4 55402E-01	5.69896E-01	4 20427E-01	-3 47578E-01	1.74998E+00	1.08481E+00	1 87955E-01	2.40634E-01
1.7	3.97985E-01	5.77765E-01	4.52027E-01	-2 84726E-01	1.86396E+00	1 19635E+00	1 65496E-01	2 09362E-01
1.8	3 39986E-01	5 81517E-01	4.77432E-01	-2 23665E-01	1 98956E+00	1 31717E+00	1 45931E-01	1 82623E-01
1.9	2.81819E-01	5.81157E-01	4 96820E-01	-1 64406E-01	2.12774E+00	1.44824E+00	1 28846E-01	1 59660E-01
2.0	2.23891E-01	5.76725E-01	5.10376E-01	-1 07032E-01	2.27959E+00	1.59064E+00	1 13894E-01	1.39866E-01
2.1	1 66607E-01	5.68292E-01	5.18294E-01	-5.16786E-02	2.44628E+00	1.74550E+00	1 00784E-01	1 22746E-01
2.2	1 10362E-01	5.55963E-01	5.20784E-01	1 48779E-03	2.62914E+00	1.91409E+00 2.09780E+00	8 92690E-02	1 07897E-01
2.3	5.55398E-02 2.50768E-03	5.39873E-01 5.20185E-01	5.18075E-01 5.10415E-01	5.22773E-02 1.00489E-01	2.82961E+00 3 04926E+00	2.29812E+00	7.91399E-02 7 02173E-02	9.49824E-02 8.37248E-02
2.5	-4.83838E-02	4.97094E-01	4.98070E-01	1.45918E-01	3.28984E+00	2.51672E+00	6 23476E-02	7 38908E-02
2.6	-9.68050E-02	4.70818E-01	4.81331E-01	1.88364E-01	3 55327E+00	2.75538E+00	5.53983E-02	6.52840E-02
2.7	-1.42449E-01	4.41601E-01	4.60504E-01	2.27632E-01	3.84165E+00	3 01611E+00	4 92554E-02	5.77384E-02
2.8	-1.85036E-01	4.09709E-01	4.35916E-01	2.63545E-01	4.15730E+00	3.30106E+00	4.38200E-02	5.11127E-02
2.9	-2.24312E-01	3.75427E-01	4 07912E-01	2.95940E-01	4.50275E+00	3.61261E+00	3 90062E-02	4 52864E-02
3.0	-2 60052E-01	3.39059E-01	3.76850E-01	3.24674E-01	4.88079E+00	3.95337E+00	3 47395E-02	4 01564E-02
3.1	-2.92064E-01	3.00921E-01	3 43103E-01	3.49629E-01	5.29449E+00	4.32621E+00	3 09547E-02	3 56341E-02
3.2	-3 20188E-01 -3 44296E-01	2.61343E-01 2.20663E-01	3.07053E-01 2.69092E-01	3.70711E-01 3.87853E-01	5.74721E+00 6 24263E+00	4.73425E+00 5.18096E+00	2.75950E-02 2 46106E-02	3.16429E-02 2.81169E-02
3.4	-3.64296E-01	1.79226E-01	2.29615E-01	4.01015E-01	6.78481E+00	5.67010E+00	2.19580E-02	2.49990E-02
3.5	-3.80128E-01	1.37378E-01	1.89022E-01	4.10188E-01	7.37820E+00	6 20583E+00	1 95989E-02	2 22394E-02
3.6	-3.91769E-01	9.54655E-02	1.47710E-01	4 15392E-01	8.02768E+00	6.79271E+00	1.74996E-02	1 97950E-02
3.7	-3.99230E-01	5.38340E-02	1.06074E-01	4 16674E-01	8 73862E+00	7 43575E+00	1 56307E-02	1.76280E-02
3.8	-4.02556E-01	1.28210E-02	6.45032E-02	4.14115E-01	9.51689E+00	8.14042E+00	1.39659E-02	1 57057E-02
3.9	-4 01826E-01	-2.72440E-02	2.33759E-02	4 07820E-01	1 03690E+01	8.91279E+00	1 24823E-02	1.39993E-02
4.0	-3 97150E-01 -3 88670E-01	-6.60433E-02 -1.03273E-01	-1.69407E-02 -5.60946E-02	3.97926E-01 3 84594E-01	1.13019E+01 1 23236E+01	9.75947E+00 1 06877E+01	1.11597E-02 9.98001E-03	1 24835E-02 1 11363E-02
4.1	-3.76557E-01	-1.38647E-01	-9.37512E-02	3.68013E-01	1.34425E+01	1.17056E+01	8.92745E-03	9.93820E-03
4.3	-3 61011E-01	-1.71897E-01	-1.29596E-01	3.48394E-01	1 46680E+01	1.28219E+01	7.98797E-03	8.87221E-03
4.4	-3.42257E-01	-2.02776E-01	-1.63336E-01	3.25971E-01	1.60104E+01	1.40462E+01	7.14911E-03	7.92325E-03
4.5	-3 20543E-01	-2.31060E-01	-1.94705E-01	3.00997E-01	1.74812E+01	1.53892E+01	6.39986E-03	7 07809E-03
4.6	-2.96138E-01	-2.56553E-01	-2.23460E-01	2.73745E-01	1.90926E+01	1.68626E+01	5.73042E-03	6.32504E-03
4.7	-2.69331E-01	-2.79081E-01	-2.49388E-01	2.44501E-01	2.08585E+01	1.84791E+01	5.13212E-03	5.65378E-03
4.8	-2.40425E-01	-2.98500E-01 -3.14695E-01	-2.72304E-01 -2.92055E-01	2.13565E-01 1.81247E-01	2.27937E+01 2.49148E+01	2.02528E+01 2.21993E+01	4.59725E-03	5 05518E-03 4.52117E-03
5.0	-2.09738E-01 -1.77597E-01	-3.14695E-01 -3.27579E-01	-2.92055E-01 -3.08518E-01	1.47863E-01	2.49148E+01 2.72399E+01	2.43356E+01	4 11894E-03 3.69110E-03	4.5211/E-03 4.04461E-03
5.1	-1.44335E-01	-3.37097E-01	-3.21602E-01	1.13736E-01	2.97889E+01	2 66804E+01	3.30831E-03	3.61918E-03
5.2	-1.10290E-01	-3.43223E-01	-3.31251E-01	7.91903E-02	3.25836E+01	2.92543E+01	2.96575E-03	3 23926E-03
5.3	-7 58031E-02	-3.45961E-01	-3.37437E-01	4.45476E-02	3.56481E+01	3.20799E+01	2.65911E-03	2.89988E-03
5.4	-4 12101E-02	-3.45345E-01	-3.40168E-01	1.01273E-02	3.90088E+01	3 51821E+01	2.38457E-03	2.59663E-03
5.5	-6.84387E-03	-3.41438E-01	-3.39481E-01	-2.37582E-02	4.26946E+01	3.85882E+01	2 13871E-03	2 32557E-03
5.6	2.69709E-02	-3.34333E-01	-3.35444E-01	-5.68056E-02	4.67376E+01	4.23283E+01	1.91849E-03	2.08322E-03
5.7	5.99200E-02 9.17026E-02	-3.24148E-01 -3.11028E-01	-3.28157E-01 -3.17746E-01	-8 87233E-02 -1.19234E-01	5.11725E+01 5.60381E+01	4.64355E+01 5.09462E+01	1.72121E-03 1.54443E-03	1.86650E-03 1.67263E-03
5.8	9.17026E-02 1.22033E-01	-3.11028E-01	-3.17/46E-01	-1.19234E-01 -1.48077E-01	6.13766E+01	5.59003E+01	1.34443E-03 1.38601E-03	1.49916E-03
6.0	1.50645E-01	-2.76684E-01	-2.88195E-01	-1.75010E-01	6.72344E+01	6.13419E+01	1.24399E-03	1.34392E-03
6.1	1.77291E-01	-2.55865E-01	-2.69435E-01	-1.99812E-01	7.36628E+01	6.73194E+01	1.11668E-03	1.20495E-03
6.2	2.01747E-01	-2.32917E-01	-2.48310E-01	-2.22284E-01	8.07179E+01	7.38859E+01	1.00252E-03	1.08053E-03
6.3	2.23812E-01	-2.08087E-01	-2.25062E-01	-2.42250E-01	8.84616E+01	8.11000E+01	9.00139E-04	9.69109E-04
6.4	2.43311E-01	-1.81638E-01	-1.99949E-01	-2.59560E-01	9 69616E+01	8.90261E+01	8.08310E-04	8.69306E-04
6.5	2.60095E-01	-1 53841E-01	-1.73242E-01	-2.74091E-01	1 06293E+02	9.77350E+01	7.25932E-04	7.79894E-04

				триложен				
			77.					
- "	J ₉ (u)	J ₁ (u)	Y ₀ (u)	Y ₁ (u)	I ₀ (u)	I ₁ (u)	K ₀ (u)	K ₁ (u)
6.6	2.74043E-01	-1.24980E-01	-1.45226E-01	-2.85747E-01	1.16537E+02	1.07305E+02	6.52021E-04	6.99778E-04
6.7	2.85065E-01	-9.53421E-02	-1.16191E-01	-2.94459E-01	1.27785E+02	1.17821E+02	5.85699E-04	6.27977E-04
6.8	2.93096E-01	-6.52187E-02	-8.64339E-02	-3.00187E-01	1.40136E+02	1.29378E+02	5.26178E-04	5.63617E-04
6.9	2.98102E-01	-3.49021E-02	-5.62537E-02	-3.02918E-01	1.53699E+02	1.42079E+02	4.72754E-04	5.05918E-04
7.0	3.00079E-01	-4.68282E-03	-2.59497E-02	-3.02667E-01	1.68594E+02	1.56039E+02	4.24796E-04	4.54182E-04
7.1	2.99051E-01	2.51533E-02	4.18179E-03	-2.99479E-01	1.84953E+02	1.71383E+02	3.81739E-04	4.07786E-04
7.2	2.95071E-01	5.43274E-02	3.38504E-02	-2.93423E-01	2.02921E+02	1.88250E+02	3.43079E-04	3.66172E-04
7.3	2.88217E-01	8.25704E-02	6.27739E-02	-2.84594E-01	2.22659E+02	2.06792E+02	3 08362E-04	3.28842E-04
7.4	2.78596E-01	1.09625E-01	9.06809E-02	-2.73115E-01	2.44341E+02	2.27175E+02	2.77183E-04	2.95350E-04
7.5	2.66340E-01	1.35248E-01	1.17313E-01	-2.59129E-01	2.68161E+02	2.49584E+02	2.49178E-04	2.65297E-04
7.6	2.51602E-01	1.59214E-01	1.42429E-01	-2.42801E-01	2.94332E+02	2.74222E+02	2.24021E-04	2 38327E-04
7.7	2.34559E-01	1.81313E-01	1.65802E-01	-2.24318E-01	3.23088E+02	3 01312E+02	2.01420E-04	2.14121E-04
7.8	2.15408E-01	2.01357E-01	1.87227E-01	-2.03885E-01	3.54685E+02	3.31099E+02	1.81114E-04	1.92392E-04
7.9	1.94362E-01	2.19179E-01	2.06521E-01	-1.81721E-01	3.89406E+02	3.63854E+02	1.62868E-04	1.72884E-04
8.0	1.71651E-01	2.34636E-01	2.23521E-01	-1.58060E-01	4.27564E+02	3.99873E+02	1.46471E-04	1.55369E-04
8.1	1.47517E-01	2.47608E-01	2.38091E-01	-1.33149E-01	4.69501E+02	4.39484E+02	1.31734E-04	1.39641E-04
8.2	1.22215E-01	2.57999E-01	2.50118E-01	-1.07241E-01	5.15593E+02	4.83048E+02	1.18489E-04	1.25516E-04
8.3	9.60061E-02	2.65739E-01	2.59515E-01	-8.05975E-02	5.66255E+02	5.30960E+02	1.06583E-04	1.12830E-04
8.4	6.91573E-02	2.70786E-01	2.66222E-01	-5.34845E-02	6.21944E+02	5 83657E+02	9.58800E-05	1.01434E-04
8.5	4 19393E-02	2.73122E-01	2.70205E-01	-2.61687E-02	6 83162E+02	6.41620E+02	8.62576E-05	9.11972E-05
8.6	1.46230E-02	2.72755E-01	2.71458E-01	1.08399E-03	7.50461E+02		7.76059E-05	8.19997E-05
8.7	-1.25227E-02	2.69719E-01	2.69999E-01	2.80110E-02	8 24450E+02	7.05377E+02 7.75512E+02	6.98265E-05	7.37355E-05
8.8	-3.92338E-02	2.64074E-01	2.65875E-01	5.43556E-02	9.05797E+02	8.52663E+02	6.28309E-05	6.63093E-05
8.9	-6.52532E-02	2.55902E-01	2.59156E-01	7.98694E-02	9.95240E+02	9.37539E+02	5.65396E-05	5.96353E-05
9.0	-9.03336E-02	2.45312E-01	2.49937E-01	1.04315E-01	1.09359E+03	1.03091E+03	5.08813E-05	5 36370E-05
9.1	-1.14239E-01	2.32431E-01	2.38336E-01	1.27466E-01	1 20173E+03	1.13365E+03	4 57920E-05	4.82454E-05
9.2	-1.36748E-01	2.17409E-01	2.24494E-01	1.49113E-01	1.32066E+03	1.24668E+03	4.12141E-05	4.33988E-05
9.3	-1.57655E-01	2.00414E-01	2 08570E-01	1.69061E-01	1.45145E+03	1 37104E+03	3.70959E-05	3 90417E-05
9.4	-1.76772E-01	1.81632E-01	1.90744E-01	1.87136E-01	1.59528E+03	1 50788E+03	3.33911E-05	3.51243E-05
9.5	-1.93929E-01	1 61264E-01	1.71211E-01	2.03180E-01	1.75348E+03	1.65845E+03	3.00579E-05	3.16020E-05
9.6	-2.08979E-01	1.39525E-01	1.50180E-01	2.17059E-01	1.92748E+03	1.82414E+03	2.70588E-05	2.84348E-05
9.7	-2.21795E-01	1.16639E-01	1.27875E-01	2.28660E-01	2 11886E+03	2 00648E+03	2.43603E-05	2 55865E-05
9.8	-2.32276E-01	9 28401E-02	1.04527E-01	2.37893E-01	2.32939E+03	2.20713E+03	2.19320E-05	2.30250E-05
9.9	-2.40341E-01	6.83698E-02	8.03773E-02	2.44692E-01	2.56096E+03	2.42796E+03	1.97467E-05	2.07211E-05
10.0	-2.45936E-01	4.34727E-02	5.56712E-02	2.49015E-01	2.81572E+03	2 67099E+03	1.77801E-05	1.86488E-05
10.1	-2.49030E-01	1.83955E-02	3.06574E-02	2.50844E-01	3.09598E+03	2.93847E+03	1.60100E-05	1.67847E-05
10.2	-2.49617E-01	-6.61574E-03	5.58523E-03	2.50186E-01	3.40431E+03	3 23286E+03	1.44169E-05	1.51078E-05
10.3	-2.47717E-01	-3.13178E-02	-1.92978E-02	2.47070E-01	3.74354E+03	3.55689E+03	1.29829E-05	1.35991E-05
10.4	-2.43372E-01	-5.54728E-02	-4.37486E-02	2.41551E-01	4.11677E+03	3.91355E+03	1.16920E-05	1.22418E-05
10.5	-2.36648E-01	-7.88500E-02	-6.75304E-02	2.33704E-01	4 52744E+03	4.30613E+03	1.05300E-05	1.10205E-05
10.6	-2.27635E-01	-1.01229E-01	-9.04152E-02	2.23629E-01	4.97932E+03	4.73828E+03	9.48385E-06	9.92153E-06
10.7	-2.16443E-01	-1.22399E-01	-1.12186E-01	2.11445E-01	5.47655E+03	5.21400E+03	8.54202E-06	8 93261E-06
10.8	-2.03202E-01	-1.42167E-01	-1 32638E-01	1.97289E-01	6.02371E+03	5.73768E+03	7.69403E-06	8.04266E-06
10.9	-1.88062E-01	-1.60350E-01	-1.51583E-01	1.81319E-01	6 62585E+03	6.31418E+03	6 93052E-06	7.24173E-06
11.0	-1.71190E-01	-1.76785E-01	-1.68847E-01	1.63706E-01	7.28849E+03	6 94886E+03	6 24302E-06	6.52086E-06
11.1	-1.52768E-01	-1.91328E-01	-1.84276E-01	1.44637E-01	8.01775E+03	7.64760E+03	5 62395E-06	5.87202E-06
11.2	-1.32992E-01	-2.03853E-01	-1.97733E-01	1.24313E-01	8 82036E+03	8.41688E+03	5.06646E-06	5.28799E-06
11.3	-1.12068E-01	-2.14255E-01	-2.09103E-01	1.02942E-01	9.70372E+03	9.26387E+03	4 56441E-06	4 76225E-06
11.4	-9.02145E-02	-2.22451E-01	-2.18294E-01	8.07440E-02	1.06760E+04	1.01964E+04	4.11226E-06	4.28897E-06
11.5	-6.76539E-02	-2.28379E-01	-2.25232E-01	5.79425E-02	1.17461E+04	1.12232E+04	3.70504E-06	3.86289E-06
11.6	-4.46157E-02	-2.32000E-01	-2.29870E-01	3.47665E-02	1.29241E+04	1.23538E+04	3 33826E-06	3.47929E-06
11.7	-2.13313E-02	-2.33300E-01	-2.32181E-01	1.14460E-02	1.42207E+04	1.35987E+04	3 00791E-06	3.13391E-06
11.8	1.96717E-03	-2.32285E-01	-2.32162E-01	-1.17890E-02	1.56480E+04	1 49695E+04	2.71034E-06	2.82293E-06
11.9	2.50494E-02	-2.28983E-01	-2.29833E-01	-3.47115E-02	1.72192E+04	1.64791E+04	2.44229E-06	2.54291E-06
12.0	4.76893E-02	-2.23447E-01	-2.25237E-01	-5.70992E-02	1.89489E+04	1.81413E+04	2.20083E-06	2.29076E-06
12.1	6.96668E-02	-2.15749E-01	-2.18438E-01	-7.87369E-02	2.08531E+04	1.99719E+04	1.98330E-06	2.06369E-06
12.2	9.07701E-02	-2.05982E-01	-2.09522E-01	-9.94184E-02	2.29495E+04	2.19878E+04	1.78734E-06	1 85920E-06
12.3	1.10798E-01	-1.94259E-01	-1.98593E-01	-1.18948E-01	2.52575E+04	2.42079E+04	1.61078E-06	1.67503E-06
12.4	1.29561E-01	-1.80710E-01	-1.85777E-01	-1.37144E-01	2.77986E+04	2.66530E+04	1.45172E-06	1.50916E-06
12.5	1.46884E-01	-1.65484E-01	-1.71214E-01	-1.53838E-01	3.05963E+04	2.93457E+04	1.30840E-06	1.35977E-06
12.6	1.62607E-01	-1.48742E-01	-1.55064E-01	-1.68878E-01	3 36768E+04	3.23115E+04	1.17927E-06	1 22521E-06
12.7	1.76588E-01	-1.30662E-01	-1.37498E-01	-1.82129E-01	3.70687E+04	3.55779E+04	1.06292E-06	1.10400E-06
12.8	1.88701E-01	-1.11432E-01	-1.18702E-01	-1.93474E-01	4.08034E+04	3.91756E+04	9.58072E-07	9 94817E-07
12.9	1.98842E-01	-9.12483E-02	-9.88704E-02	-2.02817E-01	4.49159E+04	4.31383E+04	8.63593E-07	8.96462E-07
13.0	2.06926E-01	-7.03181E-02	-7.82079E-02	-2.10081E-01	4.94445E+04	4.75030E+04	7.78454E-07	8.07859E-07
13.1	2.12888E-01	-4.88525E-02	-5.69253E-02	-2.15212E-01	5.44313E+04	5.23107E+04	7.01729E-07	7.28036E-07
13.2	2.16686E-01	-2.70667E-02	-3.52379E-02	-2.18173E-01	5.99229E+04	5.76064E+04	6.32584E-07	6 56122E-07
13.3	2.18298E-01	-5.17748E-03	-1.33634E-02	-2.18953E-01	6.59705E+04	6.34398E+04	5.70267E-07	5.91330E-07
13.4	2.17725E-01	1.65990E-02	8.48021E-03	-2.17559E-01	7.26306E+04	6 98656E+04	5.14104E-07	5.32953E-07
13.5	2.14989E-01	3.80493E-02	3.00770E-02	-2.14023E-01	7.99654E+04	7.69442E+04	4.63484E-07	4.80354E-07
13.6	2.10133E-01	5.89646E-02	5.12150E-02	-2.08394E-01	8.80434E+04	8.47420E+04	4.17860E-07	4.32958E-07
13.7	2.03221E-01	7.91428E-02	7.16883E-02	-2.00742E-01	9 69402E+04	9.33323E+04	3.76736E-07	3 90251E-07
13.8	1.94336E-01	9.83905E-02	9.12990E-02	-1.91159E-01	1.06739E+05	1.02796E+05	3.39669E-07	3.51767E-07
13.9	1.83580E-01	1.16525E-01	1.09859E-01	-1.79751E-01	1.17531E+05	1.13221E+05	3.06256E-07	3.17087E-07
14.0	1.71073E-01	1.33375E-01	1.27193E-01	-1.66645E-01	1.17331E+05	1.13221E+05	2.76137E-07	2.85834E-07
14.0	1./10/3E-01	1.333/36-01	1.4/1736-01]	-1.00043E-01	1.474176703	1.47/U/ETU3	4./013/E-0/	4.0J0J4E*U/

	7(0)	1(1)	V (m)	V (m)	1(4)	T(m)	K (a) 1	K (n)
14.1	J ₀ (u) 1.56953E-01	J ₁ (u) 1.48784E-01	Y ₀ (u) 1.43136E-01	Y ₁ (u) -1.51981E-01	I ₀ (u) 1.42512E+05	I ₁ (u) 1.37361E+05	K _e (u) 2.48986E-07	<u>K₁(u)</u> 2.57669E-07
14.2	1.41369E-01	1.62611E-01	1.57542E-01	-1.35916E-01	1.56934E+05	1.51303E+05	2.24511E-07	2.32286E-07
14.3	1.24488E-01	1.74729E-01	1.70278E-01	-1.18617E-01	1.72820E+05	1.66663E+05	2 02446E-07	2.09408E-07
14.4	1.06484E-01	1.85032E-01	1.81230E-01	-1.00263E-01	1.90318E+05	1.83586E+05	1.82554E-07	1.88789E-07
14.5	8.75449E-02	1.93429E-01	1.90302E-01	-8.10421E-02	2.09594E+05	2.02233E+05	1.64620E-07	1.70205E-07
14.6	6.78641E-02	1.99853E-01	1.97416E-01	-6.11506E-02	2.30828E+05	2.22777E+05	1.48452E-07	1.53454E-07
14.7	4.76418E-02	2.04251E-01	2.02516E-01	-4.07888E-02	2.54220E+05	2.45414E+05	1.33874E-07	1.38355E-07
14.8	2.70823E-02	2.06596E-01	2 05565E-01	-2 01607E-02	2.79988E+05	2.70357E+05	1.20731E-07	1.24745E-07
14.9	6.39154E-03	2.06876E-01	2.06546E-01	5.28275E-04	3.08376E+05	2.97841E+05	1.08881E-07	1.12477E-07
15.0	-1.42245E-02	2.05104E-01	2.05464E-01	2.10736E-02	3.39649E+05	3.28125E+05	9 81954E-08	1.01417E-07
15.1	-3.45619E-02	2.01310E-01	2.02343E-01	4.12735E-02	3.74103E+05	3.61496E+05	8.85607E-08	9 14476E-08
15.2	-5.44208E-02	1.95545E-01	1.97228E-01	6.09309E-02	4.12062E+05	3.98268E+05	7.98731E-08	8.24599E-08
15.3	-7.36075E-02	1.87879E-01	1.90182E-01	7.98551E-02	4.53882E+05	4.38789E+05	7.20393E-08	7.43573E-08
15.4	-9.19362E-02	1.78400E-01	1.81287E-01	9.78642E-02	4.99957E+05	4.83442E+05	6.49751E-08	6.70524E-08
15.6	-1.09231E-01 -1.25326E-01	1.67213E-01 1.54440E-01	1.70645E-01 1.58372E-01	1.14786E-01 1.30461E-01	5.50722E+05 6.06655E+05	5.32650E+05 5.86877E+05	5.86048E-08 5.28602E-08	6.04666E-08 5.45288E-08
15.7	-1.40070E-01	1.40216E-01	1.44599E-01	1.44741E-01	6.68282E+05	6.46636E+05	4.76796E-08	4.91753E-08
15.8	-1.53326E-01	1.24691E-01	1.29474E-01	1.57495E-01	7.36185E+05	7.12493E+05	4.30076E-08	4.91733E-08
15.9	-1.64970E-01	1.08028E-01	1.13155E-01	1.68606E-01	8.11004E+05	7.85072E+05	3.87941E-08	3 99960E-08
16.0	-1.74899E-01	9.03972E-02	9.58110E-02	1.77975E-01	8.93446E+05	8 65059E+05	3.49941E-08	3.60716E-08
16.1	-1.83024E-01	7.19794E-02	7.76208E-02	1.85520E-01	9.84288E+05	9.53213E+05	3.15669E-08	3 25329E-08
16.2	-1.89275E-01	5.29615E-02	5.87700E-02	1.91177E-01	1.08439E+06	1.05037E+06	2.84759E-08	2.93420E-08
16.3	-1.93602E-01	3.35351E-02	3.94498E-02	1.94902E-01	1.19469E+06	1.15745E+06	2.56881E-08	2 64647E-08
16.4	-1.95975E-01	1.38947E-02	1.98549E-02	1.96670E-01	1.31624E+06	1.27546E+06	2.31736E-08	2.38699E-08
16.5	-1.96381E-01	-5.76421E-03	1.81232E-04	1.96476E-01	1.45019E+06	1.40553E+06	2.09056E-08	2 15300E-08
16.6	-1.94828E-01	-2.52471E-02	-1.93753E-02	1.94333E-01	1.59779E+06	1.54889E+06	1 88599E-08	1 94199E-08
16.7	-1.91344E-01	-4.43624E-02	-3 86214E-02	1.90274E-01	1.76045E+06	1.70690E+06	1.70147E-08	1.75169E-08
16.8	-1.85974E-01	-6.29232E-02	-5.73679E-02	1.84350E-01	1.93971E+06	1.88107E+06	1.53503E-08	1.58007E-08
16.9	-1.78783E-01	-8.07493E-02	-7.54315E-02	1.76631E-01	2.13726E+06	2 07303E+06	1.38490E-08	1.42530E-08
17.0 17.1	-1.69854E-01	-9.76685E-02	-9 26372E-02 -1.08819E-01	1 67205E-01 1 56174E-01	2.35497E+06	2.28462E+06	1.24947E-08	1.28570E-08
17.1	-1 59285E-01 -1.47191E-01	-1.13519E-01 -1.28150E-01	-1.08819E-01	1.43657E-01	2.59490E+06 2.85933E+06	2.51785E+06 2.77493E+06	1.12730E-08 1.01709E-08	1.15981E-08 1.04625E-08
17.3	-1.33701E-01	-1.28130E-01	-1.37505E-01	1.29785E-01	3 15077E+06	3.05830E+06	9.17677E-09	9.43837E-09
17.4	-1.18956E-01	-1.53216E-01	-1.49739E-01	1.14705E-01	3.47196E+06	3.37067E+06	8.27992E-09	8.51461E-09
17.5	-1.03110E-01	-1.63420E-01	-1.60411E-01	9.85728E-02	3.82597E+06	3.71499E+06	7.47084E-09	7.68140E-09
17.6	-8.63279E-02	-1.71943E-01	-1.69424E-01	8.15532E-02	4 21613E+06	4 09455E+06	6.74092E-09	6.92984E-09
17.7	-6.87804E-02	-1.78710E-01	-1.76698E-01	6.38202E-02	4.64617E+06	4.51295E+06	6.08241E-09	6.25193E-09
17.8	-5 06464E-02	-1.83663E-01	-1.82170E-01	4.55532E-02	5.12015E+06	4.97418E+06	5.48832E-09	5.64043E-09
17.9	-3.21095E-02	-1.86765E-01	-1.85797E-01	2 69361E-02	5.64258E+06	5 48263E+06	4.95233E-09	5.08883E-09
18.0	-1.33558E-02	-1.87995E-01	-1.87552E-01	8.15513E-03	6.21841E+06	6.04313E+06	4.46875E-09	4.59125E-09
18.1	5.42702E-03	-1 87350E-01	-1.87429E-01	-1.06028E-02	6 85312E+06	6.66103E+06	4.03246E-09	4.14239E-09
18.2	2.40523E-02	-1.84848E-01	-1.85439E-01	-2.91520E-02	7.55273E+06	7.34221E+06	3.63881E-09	3.73747E-09
18.3	4.23358E-02	-1.80523E-01	-1.81611E-01	-4.73100E-02	8.32389E+06	8 09316E+06	3.28364E-09	3.37219E-09
18.4	6.00979E-02	-1.74428E-01	-1.75996E-01	-6.48990E-02	9.17392E+06	8 92104E+06	2.96318E-09	3 04266E-09
18.5	7.71648E-02	-1.66634E-01	-1.68656E-01	-8.17479E-02	1.01109E+07	9 83374E+06	2 67403E-09	2.74538E-09
18.6 18.7	9.33708E-02 1 08559E-01	-1.57225E-01 -1.46305E-01	-1.59676E-01 -1.49153E-01	-9.76937E-02 -1.12583E-01	1.11438E+07 1.22823E+07	1.08400E+07 1.19493E+07	2.41314E-09 2.17772E-09	2.47718E-09 2 23521E-09
18.8	1 22585E-01	-1.33990E-01	-1.37199E-01	-1.12383E-01	1.35374E+07	1.31723E+07	1.96531E-09	2.01691E-09
18.9	1.35315E-01	-1.20408E-01	-1.23942E-01	-1.38639E-01	1.49210E+07	1.45207E+07	1.77363E-09	1.81996E-09
19.0	1.46629E-01	-1.05701E-01	-1.09520E-01	-1.49560E-01	1.64462E+07	1.60074E+07	1.60067E-09	1 64227E-09
19.1	1 56423E-01	-9.00216E-02	-9.40816E-02	-1.58938E-01	1 81275E+07	1.76464E+07	1.44460E-09	1 48194E-09
19.2	1.64607E-01	-7.35290E-02	-7.77865E-02	-1.66687E-01	1.99811E+07	1.94536E+07	1.30376E-09	1 33729E-09
19.3	1.71107E-01	-5.63913E-02	-6.08008E-02	-1.72739E-01	2.20244E+07	2.14460E+07	1 17667E-09	1 20678E-09
19.4	1.75869E-01	-3.87816E-02	-4.32970E-02	-1.77043E-01	2.42771E+07	2.36429E+07	1.06198E-09	1 08901E-09
19.5	1.78854E-01	-2.08771E-02	-2.54517E-02	-1.79565E-01	2.67605E+07	2.60651E+07	9.58482E-10	9.82759E-10
19.6	1.80041E-01	-2.85657E-03	-7.44407E-03	-1.80289E-01	2.94984E+07	2.87358E+07	8.65082E-10	8 86883E-10
19.7	1.79427E-01	1.51006E-02	1.05461E-02	-1.79217E-01	3.25168E+07	3.16805E+07	7.80794E-10	8 00371E-10
19.8	1.77029E-01	3.28168E-02	2.83402E-02	-1.76370E-01	3.58446E+07	3 49273E+07	7.04727E-10	7.22309E-10
19.9	1 72878E-01	5.01174E-02	4.57621E-02	-1.71783E-01	3.95134E+07	3.85074E+07	6.36078E-10	6 51869E-10
20.0	1.67025E-01	6.68331E-02	6.26406E-02	-1.65512E-01	4.35583E+07	4.24550E+07	5.74124E-10	5.88306E-10

Значения функций Бесселя для аргумента $u = 0.0 \div 1.0$

и	$J_{\theta}(u)$	$J_1(u)$	Y ₀ (u)	Y ₁ (u)	I ₀ (u)	$I_1(u)$	K ₀ (u)	K ₁ (u)
0.00	1	0	80	8	1	0	00	00
0.01	9 99975E-01	4 99994E-03	-3 00546E+00	-6 36786E+01	1 00003E+00	5 00006E-03	4.72124E+00	9.99739E+01
0.02	9.99900E-01	9.99950E-03	-2.56396E+00	-3.18598E+01	1.00010E+00	1.00005E-02	4.02846E+00	4.99547E+01
0.03	9 99775E-01	1.49983E-02	-2.30549E+00	-2.12600E+01	1.00023E+00	1.50017E-02	3.62353E+00	3 32715E+01
0.04	9.99600E-01	1.99960E-02	-2.12190E+00	-1.59643E+01	1.00040E+00	2.00040E-02	3.33654E+00	2.49233E+01
0.05	9.99375E-01	2.49922E-02	-1.97931E+00	-1.27899E+01	1 00063E+00	2 50078E-02	3.11423E+00	1.99097E+01
0.06	9.99100E-01	2.99865E-02	-1.86263E+00	-1.06758E+01	1.00090E+00	3.00135E-02	2.93288E+00	1.65637E+01
0.07	9 98775E-01	3 49786E-02	-1.76380E+00	-9.16749E+00	1.00123E+00	3 50214E-02	2.77982E+00	1.41710E+01
0.08	9.98401E-01	3.99680E-02	-1.67803E+00	-8 03767E+00	1.00160E+00	4.00320E-02	2.64749E+00	1.23742E+01
0.09	9 97976E-01	4.49545E-02	-1.60221E+00	-7.16007E+00	1.00203E+00	4 50456E-02	2.53102E+00	1.09749E+01
0.10	9.97502E-01	4.99375E-02	-1.53424E+00	-6.45895E+00	1.00250E+00	5.00625E-02	2.42707E+00	9 85384E+00

								
<u>"</u>	$J_{0}(u)$	$J_1(u)$	Y ₀ (u)	Y ₁ (u)	I _B (u)	I ₁ (u)	K ₀ (u)	K ₁ (u)
0.11	9 96977E-01	5.49169E-02	-1.47260E+00	-5.88612E+00	1.00303E+00	5.50832E-02	2.33327E+00	8.93534E+00
0.12	9.96403E-01	5.98921E-02	-1.41620E+00	-5.40944E+00	1.00360E+00	6.01081E-02	2 24786E+00	8.16878E+00
0.13	9.95779E-01	6.48628E-02	-1.36417E+00	-5.00669E+00	1 00423E+00	6 51374E-02	2.16950E+00	7.51919E+00
0.14	9.95106E-01	6.98286E-02	-1.31587E+00	-4.66199E+00	1.00491E+00	7.01716E-02	2 09717E+00	6.96154E+00
0.15	9.94383E-01	7.47893E-02	-1.27078E+00	-4.36368E+00	1.00563E+00	7 52111E-02	2.03003E+00	6 47750E+00
0.16	9 93610E-01	7.97443E-02	-1.22847E+00	-4.10305E+00	1 00641E+00	8.02563E-02	1.96742E+00	6 05330E+00
0.17	9.92788E-01	8.46933E-02	-1.18861E+00	-3.87342E+00	1.00724E+00	8 53074E-02	1.90880E+00	5.67842E+00
0.18	9.91916E-01	8.96360E-02	-1.15092E+00	-3 66960E+00	1.00812E+00	9.03650E-02	1.85371E+00	5.34467E+00
0.19	9.90995E-01	9.45720E-02	-1.11515E+00	-3.48750E+00	1.00905E+00	9.54293E-02	1.80179E+00	5 04558E+00
0.20	9.90025E-01	9.95008E-02	-1.08111E+00	-3.32382E+00	1 01003E+00	1.00501E-01	1.75270E+00	4.77597E+00
0.21	9 89005E-01	1.04422E-01	-1.04862E+00	-3.17594E+00	1.01106E+00	1 05580E-01	1 70619E+00	4.53167E+00
0.22	9 87937E-01	1.09336E-01	-1.01754E+00	-3.04167E+00	1.01214E+00	1.10667E-01	1 66200E+00	4 30923E+00
0.23	9 86819E-01	1.14241E-01	-9.87746E-01	-2.91923E+00	1.01327E+00	1.15762E-01	1 61994E+00	4.10582E+00
0.24	9.85652E-01	1.19138E-01	-9.59122E-01	-2 80713E+00	1.01445E+00	1.20866E-01	1 57983E+00	3 91908E+00
0.25	9.84436E-01	1.24026E-01	-9 31573E-01	-2 70411E+00	1.01569E+00	1 25979E-01	1 54151E+00	3 74703E+00
0.26	9.83171E-01	1.28905E-01	-9.05013E-01	-2 60911E+00	1 01697E+00	1 31102E-01	1 50484E+00	3.58797E+00
0.27	9 81858E-01	1 33774E-01	-8 79367E-01	-2.52123E+00	1 01831E+00	1 36234E-01	1.46971E+00	3 44049E+00
0.28	9.80496E-01	1.38632E-01	-8.54568E-01	-2 43970E+00	1.01970E+00	1 41376E-01	1.43600E+00	3 30335E+00
0.29	9.79085E-01	1.43481E-01	-8 30554E-01 -8 07274E-01	-2 36385E+00	1 02114E+00	1 46530E-01 1 51694E-01	1 40361E+00 1 37246E+00	3 17549E+00 3 05599E+00
0.30	9.77626E-01	1.48319E-01	-7 84677E-01	-2.29311E+00	1 02263E+00 1 02417E+00	1.56869E-01	1 34247E+00	2 94406E+00
0.31	9 76119E-01 9 74563E-01	1.53146E-01 1.57961E-01	-7.62720E-01	-2 22696E+00 -2 16499E+00	1.02417E+00 1.02576E+00	1.62057E-01	1.31356E+00	2 83898E+00
0.32	9.72960E-01	1.37961E-01	-7.41365E-01	-2 10499E+00	1 02741E+00	1.67256E-01	1.31336E+00	2 74016E+00
0.34	9.71308E-01	1.67555E-01	-7.41363E-01	-2 05202E+00	1.02911E+00	1.72468E-01	1 25873E+00	2 64703E+00
0.34	9.69609E-01	1.0/333E-01	-7.20373E-01	-2 03202E+00	1 03086E+00	1.72468E-01	1 23271E+00	2 55912E+00
0.36	9 67861E-01	1.77100E-01	-6.80556E-01	-1 95164E+00	1.03266E+00	1 82932E-01	1 20754E+00	2 47601E+00
0.37	9.66067E-01	1 81852E-01	-6 61272E-01	-1.90551E+00	1 03452E+00	1 88184E-01	1 18317E+00	2 39730E+00
0.38	9 64224E-01	1 86591E-01	-6.42438E-01	-1 86179E+00	1 03643E+00	1 93450E-01	1 15958E+00	2 32265E+00
0.39	9 62335E-01	1 91316E-01	-6.24029E-01	-1.82031E+00	1 03839E+00	1 98731E-01	1 13671E+00	2 25176E+00
0.40	9 60398E-01	1.96027E-01	-6.06025E-01	-1.78087E+00	1 04040E+00	2 04027E-01	1 11453E+00	2.18435E+00
0.41	9.58414E-01	2.00723E-01	-5.88405E-01	-1.74333E+00	1 04247E+00	2 09338E-01	1 09301E+00	2 12018E+00
0.42	9 56384E-01	2.05403E-01	-5.71152E-01	-1.70755E+00	1 04459E+00	2 14665E-01	1 07212E+00	2 05900E+00
0.43	9.54306E-01	2.10069E-01	-5.54249E-01	-1.67341E+00	1.04676E+00	2 20008E-01	1 05182E+00	2 00062E+00
0.44	9 52183E-01	2.14719E-01	-5 37679E-01	-1 64077E+00	1.04899E+00	2 25367E-01	1 03209E+00	1 94485E+00
0.45	9.50012E-01	2 19353E-01	-5.21428E-01	-1.60954E+00	1 05127E+00	2 30744E-01	1 01291E+00	1 89152E+00
0.46	9 47796E-01	2.23970E-01	-5.05484E-01	-1 57963E+00	1 05360E+00	2 36137E-01	9 94256E-01	1 84048E+00
0.47	9 45533E-01	2.28571E-01	-4.89832E-01	-1 55095E+00	1 05599E+00	2 41549E-01	9 76098E-01	1 79157E+00
0.48	9 43224E-01	2 33154E-01	-4.74461E-01	-1 52341E+00	1.05843E+00	2 46979E-01	9.58418E-01	1 74467E+00
0.49	9 40870E-01	2.37720E-01	-4 59360E-01	-1 49694E+00	1.06093E+00	2 52427E-01	9 41198E-01	1 69967E+00
0.50	9 38470E-01	2 42268E-01	-4.44519E-01	-1.47147E+00	1 06348E+00	2 57894E-01	9 24419E-01	1.65644E+00
0.51	9 36024E-01	2 46799E-01	-4.29927E-01	-1.44695E+00	1 06609E+00	2 63381E-01	9 08064E-01	1 61489E+00
0.52	9 33534E-01	2.51310E-01	-4 15577E-01	-1 42331E+00	1 06875E+00	2 68888E-01	8 92116E-01	1 57492E+00
0.53	9 30998E-01	2 55803E-01	-4.01458E-01	-1 40050E+00	1 07147E+00	2 74414E-01	8 76560E-01	1 53645E+00
0.54	9 28418E-01	2.60277E-01	-3 87564E-01	-1.37847E+00	1.07424E+00	2 79962E-01	8 61382E-01	1 49938E+00
0.55	9.25793E-01	2 64732E-01	-3 73887E-01	-1.35718E+00	1.07707E+00	2 85530E-01 2.91120E-01	8 46568E-01	1 46366E+00
0.56	9.23123E-01 9 20410E-01	2.69166E-01 2 73581E-01	-3 60418E-01 -3 47153E-01	-1.33659E+00 -1 31664E+00	1 07995E+00 1 08289E+00	2.91120E-01 2.96732E-01	8.32105E-01 8.17980E-01	1 42921E+00 1 39596E+00
0.57	9.17652E-01	2.77975E-01	-3 4/133E-01	-1 29732E+00	1.08588E+00	3.02367E-01	8 04182E-01	1 36385E+00
0.59	9.14850E-01	2.82349E-01	-3.21204E-01	-1.27858E+00	1 08894E+00	3.08024E-01	7.90700E-01	1.33282E+00
0.60	9 12005E-01	2 86701E-01	-3 08510E-01	-1 26039E+00	1 09205E+00	3.13704E-01	7 77522E-01	1 30283E+00
0.61	9 09116E-01	2 91032E-01	-2 95995E-01	-1.24273E+00	1 09203E+00	3.13704E-01	7.64640E-01	1 27383E+00
0.62	9.06184E-01	2.95341E-01	-2 83654E-01	-1 22556E+00	1 09843E+00	3 25136E-01	7.52042E-01	1 24576E+00
0.63	9.03209E-01	2 99628E-01	-2.71482E-01	-1 20886E+00	1 10171E+00	3 30889E-01	7.39721E-01	1 21859E+00
0.64	9 00192E-01	3 03893E-01	-2.59475E-01	-1.19260E+00	1.10505E+00	3 36666E-01	7 27668E-01	1 19227E+00
0.65	8 97132E-01	3.08135E-01	-2 47629E-01	-1.17677E+00	1 10845E+00	3.42469E-01	7 15873E-01	1 16676E+00
0.66	8.94029E-01	3.12355E-01	-2 35938E-01	-1 16134E+00	1 11190E+00	3 48298E-01	7 04330E-01	1 14204E+00
0.67	8.90885E-01	3.16551E-01	-2.24400E-01	-1.14629E+00	1 11541E+00	3 54153E-01	6.93030E-01	1.11806E+00
0.68	8.87698E-01	3 20723E-01	-2 13011E-01	-1 13160E+00	1 11898E+00	3 60034E-01	6 81966E-01	1 09479E+00
0.69	8.84470E-01	3.24871E-01	-2.01767E-01	-1 11726E+00	1.12261E+00	3 65943E-01	6 71132E-01	1 07221E+00
0.70	8 81201E-01	3.28996E-01	-1.90665E-01	-1.10325E+00	1 12630E+00	3.71880E-01	6.60520E-01	1 05028E+00
0.71	8.77890E-01	3.33096E-01	-1.79701E-01	-1.08955E+00	1 13005E+00	3.77844E-01	6.50124E-01	1 02898E+00
0.72	8.74539E-01	3 37170E-01	-1.68873E-01	-1 07615E+00	1 13386E+00	3.83837E-01	6 39938E-01	1.00829E+00
0.73	8.71147E-01	3 41220E-01	-1 58177E-01	-1.06303E+00	1 13773E+00	3 89859E-01	6.29956E-01	9 88170E-01
0.74	8 67715E-01	3 45245E-01	-1 47611E-01	-1 05018E+00	1.14166E+00	3.95911E-01	6 20173E-01	9.68608E-01
0.75	8 64242E-01	3 49244E-01	-1.37173E-01 -1 26859E-01	-1.03759E+00 -1.02525E+00	1 14565E+00 1 14970E+00	4 01992E-01 4 08104E-01	6 10582E-01 6 01180E-01	9.49580E-01 9 31067E-01
0.76	8 60730E-01 8.57178E-01	3 53216E-01 3.57163E-01	-1 26859E-01	-1.02323E+00	1 15381E+00	4 14247E-01	5 91959E-01	9.13049E-01
0.77	8.53587E-01	3.5/163E-01	-1 16667E-01	-1 00127E+00	1 15798E+00	4 20421E-01	5 82917E-01	8.95507E-01
0.79	8.49956E-01	3 64976E-01	-9 66408E-02	-9 89603E-01	1 16222E+00	4 26627E-01	5.74048E-01	8 78423E-01
0.80	8.46287E-01	3 68842E-01	-8 68023E-02	-9 78144E-01	1 16651E+00	4 32865E-01	5 65347E-01	8.61782E-01
0.81	8.42580E-01	3.72681E-01	-7.70773E-02	-9.66882E-01	1 17087E+00	4 39136E-01	5 56811E-01	8 45566E-01
0.82	8 38834E-01	3 76492E-01	-6 74640E-02	-9 55809E-01	1 17530E+00	4 45440E-01	5 48434E-01	8 29762E-01
0.83	8 35050E-01	3 80275E-01	-5 79605E-02	-9 44917E-01	1 17978E+00	4 51777E-01	5 40214E-01	8 14355E-01
0.84	8 31228E-01	3 84029E-01	-4 85651F-02	-9 34197E-01	1 18433E+00	4 58149E-01	5 32146E-01	7 99331E-01
0.85	8.27369E-01	3.87755E-01	-3 92760E-02	-9 23643E-01	1 18895E+00	4 64556E-01	5 24226E-01	7 84676E-01

u	$J_{0}(u)$	$J_1(u)$	$Y_{\mathbf{g}}(u)$	Y ₁ (u)	I ₀ (u)	<i>I</i> ₁ (<i>u</i>)	K ₀ (u)	K ₁ (u)
0.86	8.23473E-01	3.91453E-01	-3.00917E-02	-9.13247E-01	1.19362E+00	4.70998E-01	5.16451E-01	7.70379E-01
0.87	8.19541E-01	3.95121E-01	-2.10106E-02	-9.03004E-01	1.19837E+00	4.77475E-01	5.08818E-01	7.56427E-01
0.88	8.15571E-01	3.98760E-01	-1.20311E-02	-8.92907E-01	1.20317E+00	4.83989E-01	5.01322E-01	7.42810E-01
0.89	8.11565E-01	4.02370E-01	-3.15196E-03	-8.82950E-01	1.20805E+00	4.90539E-01	4.93960E-01	7.29515E-01
0.90	8.07524E-01	4.05950E-01	5.62831E-03	-8.73127E-01	1.21299E+00	4.97126E-01	4.86730E-01	7.16534E-01
0.91	8.03447E-01	4.09499E-01	1.43110E-02	-8.63432E-01	1.21799E+00	5.03752E-01	4.79629E-01	7.03855E-01
0.92	7.99334E-01	4.13018E-01	2.28974E-02	-8.53862E-01	1.22306E+00	5.10415E-01	4.72652E-01	6.91469E-01
0.93	7.95186E-01	4.16507E-01	3.13886E-02	-8.44411E-01	1.22820E+00	5.17117E-01	4.65798E-01	6.79367E-01
0.94	7.91004E-01	4.19965E-01	3.97860E-02	-8.35073E-01	1.23340E+00	5.23858E-01	4.59064E-01	6.67540E-01
0.95	7.86787E-01	4.23392E-01	4.80905E-02	-8.25846E-01	1.23868E+00	5.30639E-01	4.52447E-01	6.55980E-01
0.96	7.82536E-01	4.26787E-01	5.63032E-02	-8.16724E-01	1.24402E+00	5.37461E-01	4.45944E-01	6.44678E-01
0.97	7.78251E-01	4.30151E-01	6.44253E-02	-8.07704E-01	1.24942E+00	5.44323E-01	4 39552E-01	6.33627E-01
0.98	7.73933E-01	4.33483E-01	7.24576E-02	-7.98781E-01	1.25490E+00	5.51226E-01	4.33270E-01	6.22820E-01
0.99	7.69582E-01	4.36783E-01	8.04012E-02	-7.89952E-01	1.26045E+00	5.58171E-01	4.27095E-01	6.12249E-01
1.00	7.65198E-01	4.40051E-01	8.82570E-02	-7.81213E-01	1.26607E+00	5.65159E-01	4.21024E-01	6.01907E-01

Примечание. Значения функций рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> Янке и др., 1964; Справочник..., 1979; Hantush, 1964с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Функция $B(u, \beta_1, \beta_2)$

Функция:
$$B(u, \beta_1, \beta_2) = \int_0^\infty \frac{J_0(\beta_1 \tau)}{\tau} \left[1 - \frac{\cosh(\beta_2 \tau)}{\cosh \tau + u \tau \sinh(\beta_2 \tau)} \right] d\tau$$
, где $J_0(\beta)$ — функция Бесселя (Приложение 2).

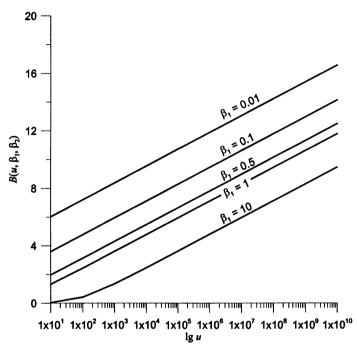


Рис. П3. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента при третьем аргументе $\beta_2=0.8$.

Значения функции $B(u, \beta_1, \beta_2)$

β ₂			0.6			0.8					1				
βι	0.01	0.1	0.5	1	10	0.01	0.1	0.5	1	10	0.01	0.1	0.5	1	10
10	6.057	3.628	2.000	1.340	0.030	6.025	3.595	1.974	1.322	0.030	5.964	3.542	1.940	1.298	0.029
100	7.208	4.778	3.136	2.444	0.429	7.203	4.773	3.132	2.441	0.429	7.195	4.765	3.127	2.437	0.428
103	8.375	5.944	4.301	3.604	1.345	8.374	5.944	4.301	3.604	1.345	8.373	5.943	4.300	3.603	1.345
104	9.543	7.112	5.469	4.771	2.464	9.543	7.112	5.469	4.771	2.464	9.542	7.112	5.468	4.771	2.464
10 ⁵	10.711	8.281	6.637	5.939	3.625	10.711	8.281	6.637	5.939	3.625	10.711	8.281	6.637	5.939	3.625
106	11.879	9.449	7.805	7.107	4.792	11.879	9.449	7.805	7.107	4.792	11.879	9,449	7.805	7.107	4.792
107	13.048	10.617	8.974	8.276	5.960	13.048	10.617	8.974	8.276	5.960	13.048	10.617	8.974	8.276	5.960
102	14.216	11.785	10.142	9,444	7.128	14.216	11.785	10.142	9,444	7.128	14.216	11.785	10.142	9.444	7.128
109	15.384	12.954	11.310	10.612	8.297	15.384	12.954	11.310	10.612	8.297	15.384	12.954	11.310	10.612	8.297
1010	16.550	14.122	12.478	11.780	9.465	16.550	14.122	12.478	11.780	9.465	16.550	14.122	12.478	11.780	9.465

Примечание. Значения функции взяты из [Abdul Khader, Veerankutty, 1975].

<u>Литература:</u> Abdul Khader, Veerankutty, 1975.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Интеграл вероятностей erf u н дополнительный интеграл вероятностей erfc u

Функции:

- интеграл вероятностей (интеграл ошибок):

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{u} \exp(-\tau^{2}) d\tau, \ \operatorname{erf}(-u) = -\operatorname{erf} u;$$

предельные значения интеграла вероятностей: erf 0 = 0, erf $\infty = 1$;

- дополнительный интеграл вероятностей:

$$\operatorname{erfc} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u}^{\infty} \exp(-\tau^2) d\tau ;$$

предельные значения дополнительного интеграла вероятностей: erfc 0 = 1, erfc $\infty = 0$, erfc $(-\infty) = 2$.

Взаимосвязь функций: erf u = 1 - erfc u, erfc u = 1 - erf u, erfc (-u) = 1 + erf u.

Производные функций: erf'
$$u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2)$$
; erfc' $u = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2)$.

Разложение в ряд: erf
$$u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n u^{2n+1}}{n!(2n+1)}$$
.

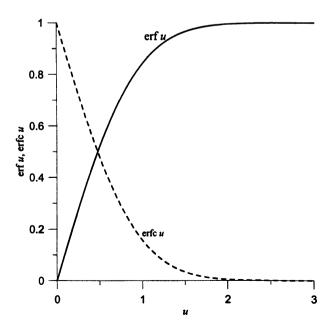


Рис. П4. Зависимость функций от аргумента.

Значения функций erf u и erfc u для аргумента $u=0.0\div 4.0$

w erf u erf cu u cu<	# erf # 2.80 0.99992 2.81 0.99993 2.82 0.99993 2.83 0.99993 2.84 0.99994 2.85 0.99994 2.85 0.99994 2.86 0.99995 2.88 0.99995 2.88 0.99995 2.89 0.99995 2.90 0.99995 2.91 0.99995 2.91 0.99995 2.92 0.99995 2.92 0.999995 2.92 0.999995 2.92 0.999995 2.92 0.99999999999999999999999999999999	9 0.000071 3 0 000067 7 0 000063 1 0.000059 4 0.000056 8 0.000052 1 0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.01 0.011283 0.988717 0.71 0.684666 0.315334 1.41 0.953852 0.046148 2.11 0.997155 0.00284 0.02 0.025565 0.977435 0.72 0.691430 3.038567 1.42 0.953376 0.044624 2.12 0.997284 0.002716 0.03 0.033841 0.966159 0.73 0.698104 0.301896 1.43 0.958297 0.043143 2.13 0.997407 0.00247 0.04 0.045111 0.954889 0.74 0.704678 0.295322 1.44 0.958297 0.041703 2.14 0.997525 0.00247 0.05 0.056722 0.943628 0.75 0.711156 0.288844 1.45 0.959695 0.040305 2.15 0.997639 0.00236 0.06 0.067622 0.93378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961054 0.038946 2.16 0.997747 0.00225 0.07 0.078858 0.921142 0.77 0.723822 0.276178	2.81 0.99992 2.82 0.99993 2.83 0.99993 2.84 0.99994 2.85 0.99994 2.86 0.99994 2.87 0.99995 2.88 0.99995 2.89 0.99995 2.90 0.99995 2.91 0.99996 2.92 0.99999	9 0.000071 3 0 000067 7 0 000063 1 0.000059 4 0.000056 8 0.000052 1 0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.02 0.022565 0.977435 0.72 0.691433 0.308567 1.42 0.955376 0.044624 2.12 0.997284 0.02716 0.03 0.033841 0.966159 0.73 0.698104 0.301896 1.43 0.956857 0.043143 2.13 0.997407 0.02593 0.04 0.045111 0.954889 0.74 0.704678 0.295322 1.44 0.958297 0.041703 2.14 0.997525 0.002473 0.05 0.056372 0.943628 0.75 0.711156 0.288844 1.45 0.959695 0.040305 2.15 0.997639 0.00236 0.06 0.067622 0.932378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961054 0.038946 2.16 0.997747 0.002253 0.07 0.078858 0.921142 0.77 0.723822 0.261788 1.47 0.962373 0.036346 2.18 0.997951 0.02043 0.08 0.09078 0.990922 0.78 0.730010 0.269990	2.82 0 99993 2.83 0 99993 2.84 0 99994 2.85 0 99994 2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99995 2.92 0 99995	3 0 000067 7 0 000063 1 0.000059 4 0.000056 8 0.000052 1 0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.03 0.03841 0.966159 0.73 0.698104 0.301896 1.43 0.956857 0.043143 2.13 0.997407 0.02599 0.04 0.045111 0.954889 0.74 0.704678 0.295322 1.44 0.958297 0.041703 2.14 0.997525 0.00247 0.05 0.056372 0.943628 0.75 0.71156 0.288844 1.45 0.959695 0.040305 2.15 0.997639 0.00236 0.06 0.067622 0.932378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961054 0.038946 2.16 0.997747 0.002253 0.07 0.078858 0.921142 0.77 0.723822 0.276178 1.47 0.962373 0.036267 2.17 0.997851 0.00145 0.08 0.909078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0.00245	2.83 0 99993 2.84 0 99994 2.85 0 99994 2.86 0 99995 2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	7 0 000063 1 0.000059 4 0.000056 8 0.000052 1 0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.04 0.045111 0.954889 0.74 0.704678 0.295322 1.44 0.958297 0.041703 2.14 0.997525 0.002473 0.05 0.05372 0.943628 0.75 0.711156 0.288844 1.45 0.959695 0.040305 2.15 0.997639 0.002361 0.06 0.067622 0.932378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961054 0.038946 2.16 0.997747 0.002253 0.07 0.778858 0.921142 0.77 0.723822 0.276178 1.47 0.962373 0.037627 2.17 0.979851 0.00144 0.08 0.090078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0.002045	2.84 0 99994 2.85 0 99994 2.86 0 99994 2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	1 0.000059 4 0.000056 8 0.000052 1 0.000049 4 0.000046 6 0.000044
0.05 0.056372 0.943628 0.75 0.711156 0.288844 1.45 0.959695 0.040305 2.15 0.997639 0.02361 0.06 0.067622 0.932378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961034 0.038946 2.16 0.997747 0.02252 0.07 0.07858 0.077 0.723822 0.276178 1.47 0.962373 0.037627 2.17 0.979851 0.002142 0.08 0.909078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0.02043	2.85 0 99994 2.86 0 99994 2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	4 0.000056 8 0.000052 1 0.000049 4 0.000046 6 0.000044
0.06 0 067622 0.932378 0.76 0.717537 0.282463 1.46 0.961054 0.038946 2.16 0.997747 0 00225 0.07 0 078858 0.921142 0.77 0.723822 0 276178 1.47 0.962373 0.037627 2.17 0.997851 0 002149 0.08 0 090078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0 002049	2.86 0 99994 2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	8 0.000052 1 0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.07 0.078858 0.921142 0.77 0.723822 0.276178 1.47 0.962373 0.037627 2.17 0.997851 0.002149 0.08 0.090078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0.002049	2.87 0 99995 2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	0 000049 4 0 000046 6 0.000044
0.08 0.090078 0.909922 0.78 0.730010 0.269990 1.48 0.963654 0.036346 2.18 0.997951 0.002049	2.88 0 99995 2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	0 000046 0 0.000044
	2.89 0 99995 2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	6 0.000044
	2.90 0 99995 2.91 0 99996 2.92 0 99996	
	2.91 0 99996 2.92 0 99996	
0.10 0.112463 0.887537 0.80 0.742101 0.257899 1.50 0.966105 0.033895 2.20 0.998137 0.01865 0.11 0.123623 0.876377 0.81 0.748003 0.251997 1.51 0.967277 0.032723 2.21 0.998224 0.001776	2.92 0 99996	
0.12 0.134758 0.865242 0.82 0.753811 0.246189 1.52 0.968413 0.031587 2.22 0.998308 0.016162 0.13 0.145867 0.854133 0.83 0.759524 0.240476 1.53 0.969516 0.030484 2.23 0.998388 0.01617	2.93 0 99996	
	2.93 0 99996 2.94 0 99996	
	2.95 0 99997	
	2.96 0 99997	
0.16 0.179012 0.820988 0.86 0.776100 0.223900 1.56 0.972628 0.027372 2.26 0.98607 0.01393 0.17 0.189992 0.810008 0.87 0.781440 0.218560 1.57 0.973603 0.026397 2.27 0.99867 0.01326	2.97 0 99997	
0.18 0.200936 0.799064 0.88 0.786687 0.213313 1.58 0.974547 0.025453 2.28 0.998738 0.001262	2.98 0 99997	
0.19 0.211840 0.788160 0.89 0.791843 0.208157 1.59 0.975462 0.024538 2.29 0.998799 0.001201	2.99 0 99997	
0.20 0.222703 0.777297 0.90 0.796908 0.203092 1.60 0.976348 0.023652 2.30 0.998857 0.01143	3.00 0 99997	
0.21 0.233522 0.766478 0.91 0.801883 0.198117 1.61 0.977207 0.022793 2.31 0.998912 0.001081	3.02 0 99998	
0.22 0.244296 0.755704 0.92 0.806768 0.193232 1.62 0.978038 0.021962 2.32 0.998966 0.001034	3.04 0.99998	
0.23 0.255023 0.744977 0.93 0.811564 0.188436 1.63 0.978843 0.021157 2.33 0.999016 0.000984	3.06 0 99998	
0.24 0 265700 0 734300 0.94 0 816271 0 183729 1.64 0.979622 0.020378 2.34 0.999065 0 00093	3.08 0 99998	
0.25 0 276326 0 723674 0.95 0 820891 0 179109 1.65 0 980376 0 019624 2.35 0 999111 0 000889	3.10 0 99998	
0.26 0.286900 0 713100 0.96 0 825424 0.174576 1.66 0 981105 0.018895 2.36 0 999155 0 000845	3.12 0.99999	
0.27 0.297418 0 702582 0.97 0.829870 0.170130 1.67 0.981810 0.018190 2.37 0 999197 0.00080	3.14 0.99999	
0.28 0 307880 0 692120 0.98 0 834232 0 165768 1.68 0 982493 0.017507 2.38 0 999237 0 000765	3.16 0.99999	
0.29 0.318283 0.681717 0.99 0.838508 0.161492 1.69 0.983153 0.016847 2.39 0.999275 0.00072	3.18 0 99999	0 000007
0.30 0 328627 0 671373 1.00 0.842701 0.157299 1.70 0.983790 0 016210 2.40 0 999311 0 000689	3.20 0 99999	4 0 000006
0.31 0.338908 0 661092 1.01 0.846810 0.153190 1.71 0.984407 0.015593 2.41 0.999346 0.000654	3.25 0 99999	6 0 000004
0.32 0 349126 0 650874 1.02 0.850838 0 149162 1.72 0 985003 0 014997 2.42 0.999379 0 00062	3.30 0.99999	7 0 000003
0.33 0.359279 0.640721 1.03 0.854784 0.145216 1.73 0.985578 0.014422 2.43 0.999411 0.000589	3.40 0 99999	8 0 000002
0.34 0 369365 0 630635 1.04 0 858650 0 141350 1.74 0.986135 0 013865 2.44 0 999441 0 000559	3.50 0.99999	0 000001
0.35 0 379382 0 620618 1.05 0 862436 0.137564 1.75 0 986672 0.013328 2.45 0 999469 0 00053	4.00 1 00000	0 000000
0.36 0.389330 0.610670 1.06 0.866144 0.133856 1.76 0.987190 0.012810 2.46 0.999497 0.000503		
0.37 0.399206 0.600794 1.07 0.869773 0.130227 1.77 0.987691 0.012309 2.47 0.999523 0.00047		
0.38 0 409009 0 590991 1.08 0 873326 0.126674 1.78 0 988174 0.011826 2.48 0.999547 0 00045		ļ
0.39 0.418739 0.581261 1.09 0.876803 0.123197 1.79 0.988641 0.011359 2.49 0.999571 0.000429		
0.40 0 428392 0.571608 1.10 0 880205 0.119795 1.80 0 989091 0.010909 2.50 0.999593 0 00040		_
0.41 0.437969 0.562031 1.11 0.883533 0.116467 1.81 0.989525 0.010475 2.51 0.999614 0.000386	ļ	
0.42 0.447468 0.552532 1.12 0.886788 0.113212 1.82 0.989943 0.010057 2.52 0.999635 0.000369		
0.43	<u> </u>	
0.44 0.466225 0.533775 1.14 0.893082 0.106918 1.84 0.990736 0.009264 2.54 0.999672 0.000326		
0.45 0.475482 0.524518 1.15 0.896124 0.103876 1.85 0.991111 0.008889 2.55 0.999689 0.00031		
0.46 0.484655 0.515345 1.16 0.899096 0.100904 1.86 0.991472 0.008528 2.56 0.999706 0.000294 0.47 0.493745 0.506255 1.17 0.902000 0.098000 1.87 0.991821 0.008179 2.57 0.999722 0.000274	 	+
		
0.48 0.502750 0.497250 1.18 0.904837 0.095163 1.88 0.992156 0.007844 2.58 0.999736 0.00266 0.49 0.511668 0.488332 1.19 0.907608 0.092392 1.89 0.992479 0.007521 2.59 0.999751 0.000246		+
0.50 0 520500 0 479500 1.20 0.910314 0 089686 1.90 0 992790 0 007210 2.60 0 999764 0 000230		
0.51 0 529244 0 470756 1.21 0.912956 0 087044 1.91 0 993090 0 006910 2.61 0 999777 0 000223		
0.52 0 537899 0.462101 1.22 0.915534 0.084466 1.92 0.993378 0.006622 2.62 0 999789 0.00021		
0.53		1
0.54 0.554939 0.445061 1.24 0.920505 0.79495 1.94 0.993923 0.006077 2.64 0.999811 0.00018		
0.55 0 563323 0 436677 1.25 0 922900 0 077100 1.95 0 994179 0 005821 2.65 0 999822 0.00017		
0.56 0 571616 0.428384 1.26 0.925236 0 074764 1.96 0 994426 0 005574 2.66 0 999831 0.00016		
0.57 0 579816 0.420184 1.27 0.927514 0 072486 1.97 0 994664 0 005336 2.67 0.999841 0.00015		
0.58 0.587923 0.412077 1.28 0.929734 0.070266 1.98 0.994892 0.005108 2.68 0.999849 0.00015		
0.59 0.595936 0.404064 1.29 0.931899 0.068101 1.99 0.995111 0.004889 2.69 0.999858 0.000143		
0.60 0.603856 0.396144 1.30 0.934008 0.065992 2.00 0.995322 0.004678 2.70 0.999866 0.00013		
0.61 0.611681 0.388319 1.31 0.936063 0.063937 2.01 0.995525 0.004475 2.71 0.999873 0.00012		
0.62 0.619411 0.380589 1.32 0.938065 0.061935 2.02 0.995719 0.004281 2.72 0.999880 0.000120		<u> </u>
0.63 0 627046 0 372954 1.33 0.940015 0 059985 2.03 0.995906 0 004094 2.73 0 999887 0 000113		
0.64 0 634586		
0.65 0 642029 0 357971 1.35 0 943762 0 056238 2.05 0 996258 0 003742 2.75 0.999899 0 00010		+
0.66 0 649377 0.350623 1.36 0 945561 0 054439 2.06 0 996423 0.003577 2.76 0.999905 0.00009		
0.67 0.656628 0.343372 1.37 0.947312 0.052688 2.07 0.996582 0.003418 2.77 0.999910 0.00099		
0.68 0 663782 0 336218 1.38 0 949016 0 050984 2.08 0 996734 0 003266 2.78 0 999916 0 00008		
0.69 0.670840 0.329160 1.39 0.950673 0.049327 2.09 0.996880 0.003120 2.79 0.999920 0.00086		ı

Примечание. Значения функций рассчитаны на программе МАРLЕ7.

Аппроксимация:

Диапазон	Зависимость
0 < u < ∞	$ \begin{split} & \text{erf } u = 1 - \exp \left(-u^2 \begin{pmatrix} 0.254829592t - 0.284496736t^2 + 1.421413741t^3 - \\ -1.453152027t^4 + 1.061405429t^5 \end{pmatrix}, \\ & \text{где } t = \frac{1}{1 + 0.3275911u} \ [\textit{Справочник, 1979}] \end{split} $
$u \leq 0.1$	$\operatorname{erf} u \approx \frac{2u}{\sqrt{\pi}} [Hantush, 1964c]$

Кратные интегралы вероятностей

Функция:
$$i^n \operatorname{erfc} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u}^{\infty} \frac{(\tau - u)^n}{n!} \exp(-\tau^2) d\tau$$
, $i^n \operatorname{erfc} u = \frac{i^{n-2} \operatorname{erfc} u}{2n} - \frac{u i^{n-1} \operatorname{erfc} u}{n}$,

где для n = -1, 0, 1:

n	Уравнение
-1	$i^{-1}\operatorname{erfc} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\exp(-u^2)$
0	i^0 erfc $u = \text{erfc } u$
1	$i^{1}\operatorname{erfc} u = -u\operatorname{erfc} u + \frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp(-u^{2})$

Предельное значение: i^n erfc $0 = \frac{1}{2^n \Gamma(1 + n/2)}$, где $\Gamma(u)$ – гамма-функция (Приложение 40).

Производная функции: $\left(i^n \operatorname{erfc} u\right)' = -i^{n-1} \operatorname{erfc} u$.

<u>Литература:</u> Янке и др., 1964; Справочник..., 1979; Hantush, 1964с.

приложение 5

Функция $f(u) = \exp(u)K_0(u)$

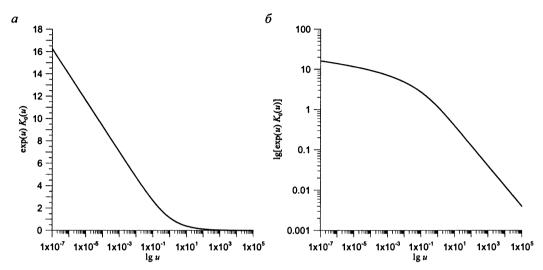


Рис. П5. Зависимость функции (а) и логарифма функции (б) от логарифма аргумента.

Аппроксимация (подобрана автором):

Область применения	Зависимость
$u \le 0.002$	$f(u) = -2.3015809 \lg u + 0.1259732$
$0.002 < u \le 0.03$	$f(u) = \begin{pmatrix} 7.568789441 - 823.0658537u + 126316.6921u^2 - \\ -12592266.47u^3 + 762939238.9u^4 - 27130458070u^5 + \\ +519417689000u^6 - 4124599984000u^7 \end{pmatrix}$
$0.03 \le u < 1.0$	$f(u) = \begin{pmatrix} 4.816990234 - 49.08455646u + 504.0724154u^2 - \\ -3381.502272u^3 + 14527.24701u^4 - 40631.9317u^5 + \\ +74640.35927u^6 - 89182.27025u^7 + 66644.50943u^8 - \\ -28264.97397u^9 + 5189.907926u^{10} \end{pmatrix}$
$1.0 \ge u < 3.0$	$f(u) = \begin{pmatrix} 1.795507589 - 0.8956633752u + \\ + 0.2742761734u^2 - 0.03263788485u^3 \end{pmatrix}$
$u \ge 3.0$	$\lg f(u) = -0.4975789 \lg u + 0.0811126$

Значения функции для аргумента $u = 10^{-7} \div 10^4$

ш	f(u)	и и	f(u)	4	f(u)	и	f(u)	u u	f(u)	и	f(u)	u I	f(u)
1e-7	16 234029	0.015	4 381163	0.065	3 044996	0.25	1 979334	0.75	1 292603	3.5	0 649026	8.5	0 423936
2e-7	15 540883	0.015	4 320004	0.066	3 031850	0.26	1 951675	0.76	1 285488	3.6	0 640456	8.6	0 421529
3e-7	15 135419	0.017	4 262702	0.067	3 018922	0.27	1 925266	0.77	1 278494	3.7	0 632218	8.7	0 419162
4e-7	14 847739	0.018	4 208812	0.068	3 006205	0.28	1 900011	0.78	1 271617	3.8	0 624292	8.8	0 416835
5e-7	14 624597	0.019	4 157962	0.069	2 993692	0.29	1 875824	0.79	1 264855	3.9	0 616657	8.9	0 414547
6e-7	14 442276	0.020	4 109838	0.070	2 981377	0.30	1 852627	0.80	1 258203	4.0	0 609298	9.0	0 412296
7e-7	14 288127	0.021	4 064171	0.071	2 969256	0.31	1 830352	0.81	1 251659	4.1	0 602197	9.1	0 410081
8e-7	14 154597	0.022	4 020731	0.072	2 957321	0.32	1 808934	0.82	1 245220	4.2	0 595339	9.2	0 407901
9e-7	14 036815	0.023	3 979319	0.073	2.945568	0.33	1 788319	0.83	1 238883	4.3	0 588711	9.3	0 405756
le-6	13 931456	0.024	3 939759	0.074	2 933993	0.34	1 768455	0.84	1 232645	4.4	0 582301	9.4	0 403644
2e-6	13 238321	0.025	3 901900	0.075	2 922589	0.35	1 749295	0.85	1 226504	4.5	0 576097	9.5	0 401565
3e-6	12 832868	0.026	3 865606	0.076	2.911352	0.36	1 730796	0.86	1 220457	4.6	0 570087	9.6	0 399518
4e-6	12 545198	0.027	3 830758	0.077	2 900278	0.37	1 712920	0.87	1 214502	4.7	0 564262	9.7	0 397502
5e-6	12 322066	0.028	3 797250	0.078	2 889363	0.38	1 695630	0.88	1 208636	4.8	0 558613	9.8	0 395516
6e-6	12 139755	0.029	3 764987	0.079	2 878602	0.39	1 678894	0.89	1 202857	4.9	0 553131	9.9	0 393560
7e-6	11 985616	0.030	3 733882	0.080	2 867991	0.40	1 662682	0.90	1 197163	5.0	0 547808	10.0	0 391632
8e-6	11 852095	0.031	3 703861	0.081	2 857527	0.41	1 646966	0.91	1 191552	5.1	0 542635	11	0 39163
9e-6	11 734323	0.032	3 674851	0.082	2 847205	0.42	1 631719	0.92	1 186022	5.2	0 537607	12	0 37380
1e-5	11 628973	0.033	3 646792	0.083	2 837023	0.43	1 616918	0.93	1 180570	5.3	0 532717	13	0 35819
2e-5	10 935929	0.034	3 619625	0.084	2 826977	0.44	1 602541	0.94	1 175195	5.4	0 527958	14	0 34440
3e-5	10 530561	0.035	3 593297	0.085	2 817063	0.45	1 588566	0.95	1 169896	5.5	0 523325	15	0 33208
4e-5	10 242972	0.036	3 567762	0.086	2 807279	0.46	1 574976	0.96	1 164669	5.6	0.518812	16	0 32100
5e-5	10 019920	0.037	3 542974	0.087	2 797620	0.47	1 561751	0.97	1 159514	5.7	0 514414	17	0 31096
6e-5	9 837688	0.038	3 518893	0.088	2 788085	0.48	1 548875	0.98	1 154429	5.8	0 510126	18	0 30181
7e-5	9 683625	0.039	3 495483	0.089	2 778671	0.49	1 536333	0.99	1 149413	5.9	0 505944	19	0 29342
8e-5	9 550179	0.040	3 472708	0.090	2 769374	0.50	1 524109	1.00	1 144463	6.0	0 501863	20	0 28569
9e-5	9 432481	0.041	3 450537	0.091	2 760192	0.51	1 512191	1.1	1 098330	6.1	0 497880	22	0 27854
le-4	9 327205	0.042	3 428941	0.092	2 751122	0.52	1 500564	1.2	1 057485	6.2	0 493990	24	0 26573
2e-4	8 634852	0.043	3 407891	0.093	2 742162	0.53	1 489217	1.3	1 020973	6.3	0 490191	26	0 25453
3e-4	8 230128	0.044	3 387362	0.094	2 733310	0.54	1 478138	1.4	0 988070	6.4	0 486477	28	0 24464
4e-4	7 943155	0.045	3 367330	0.095	2 724563	0.55	1 467317	1.5	0 958210	6.5	0 482847	30	0 23582
5e-4	7 720694	0.046	3 347774	0.096	2 715918	0.56	1 456743	1.6	0 930946	6.6	0 479298	35	0 22789
6e-4	7 539035	0.047	3 328672	0.097	2 707375	0.57	1 446407	1.7	0 905918	6.7	0 475825	40	0 21110
7e-4	7 385531	0.048	3 310005	0.098	2 698929	0.58	1 436300	1.8	0 882834	6.8	0 472428	45	0 19756
8e-4	7 252631	0.049	3 291755 3 273904		2 690581	0.59	1 426413	1.9	0 861451	7.0	0 469102	50	0 18632
9e-4 0.001	7 135468 7 030716	0.050	3 256437	0.10	2 682326 2 604576	0.60	1 416738 1 407267	2.0	0 841568 0 823017	7.1	0 465845 0 462656	60 70	0 17681
0.001	6 343221	0.051	3 239337	0.11	2 534452	0.62	1 397993	2.1	0 805654	7.1	0 462636	80	0 14953
0.002	5 942892	0.052	3 222592	0.12	2.470692	0.62	1 388909	2.3	0 789356	7.3	0 456469	90	0 13991
0.004	5 660014	0.054	3 206187	0.13	2 412317	0.64	1 380008	2.4	0 774018	7.4	0 453467	100	0 13193
0.005	5 441428	0.055	3 190110	0.15	2 358556	0.65	1 371284	2.5	0 759549	7.5	0 450524	200	0 12518
0.006	5 263470	0.056	3 174348	0.16	2 308787	0.66	1 362732	2.6	0 745868	7.6	0 447637	300	0 08857
0.007	5 113521	0.057	3.158891	0.17	2 262507	0.67	1 354345	2.7	0 732907	7.7	0 444806	400	0 07233
0.007	4 984054	0.058	3 143727	0.18	2 219298	0.68	1 346118	2.8	0 720604	7.8	0 442027	500	0 06265
0.009	4 870215	0.059	3 128846	0.19	2 178813	0.69	1 338046	2.9	0 708905	7.9	0 439300	600	0 05604
0.010	4 768694	0.060	3 114239	0.20	2 140757	0.70	1 330124	3.0	0 697762	8.0	0 436623	700	0.05116
0.011	4 677128	0.061	3.099896	0.21	2 104883	0.71	1 322347	3.1	0 687131	8.1	0 433994	800	0 04736
0.012	4.593775	0.062	3 085808	0.22	2 070977	0.72	1 314710	3.2	0 676975	8.2	0 431413	900	0 04430
0.013	4 517313	0.063	3 071967	0.23	2 038853	0.73	1 307210	3.3	0 667259	8.3	0 428877	1000	0 04177
0.014			3.058366	0.24	2.008352	0.74	1 299842	3.4	0 657952	8.4	0 426385	10000	0 03963
0.014		0.004	2.020200	0.24	3.000002	, 5.,741	. =		0 03//02	0.41	3 .20303		0 03,05

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

приложение 6

Функция $F(u, oldsymbol{eta})$ для скважин большого диаметра

Функция:
$$F(u,\beta) = \frac{32\beta^2}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{1 - \exp[-\tau^2/(4u)]}{[\tau J_0(\tau) - 2\beta J_1(\tau)]^2 + [\tau Y_0(\tau) - 2\beta Y_1(\tau)]^2} \frac{d\tau}{\tau^3}$$
.

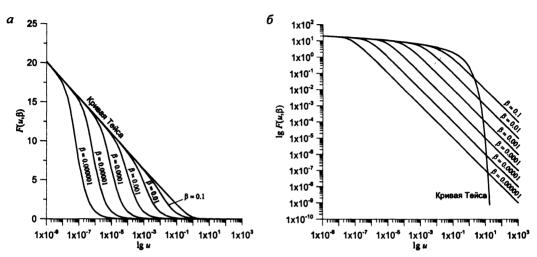


Рис. Пб. Зависимость функции (a) и логарифма функции (б) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация:

Диапазон	Зависимость
$u/\beta < 0.001$	$F(u,\beta)=W(u)$
Для больших значений аргумента <i>и</i>	$F(u,\beta) = \beta / u$

Условные обозначения:

 $\overline{J_0(\beta), J_1(\beta), Y_0(\beta), Y_1(\beta)}$ – функции Бесселя (Приложение 2);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

Значения функции $F(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-9}\div 1000.0$; $\beta=5\cdot 10^{-7}\div 10.0$.

Значения функции $F(u,\beta)$ для аргумента $\beta = 0.002 \div 10.0$

~~	10.0	5.0	2.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.005	0.002	0.001	0.005	0.002
10-9	2.0146e+1											
20-9	1.9453e+1											
3e-9	1.9047e+1											
			1.8760e+1			1.8760e+1		1.8760c+1				
50-9	1.8537e+1											
6e-9	1.8354e+1	1.8354e+1	1.8354e+1	1.8354c+1	1.8354e+1	1.8354c+1	1.8354e+1	1.8354e+1	1.8354c+1	1.8354c+1	1.8354e+1	1.8354e+1
70-9	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200c+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1	1.8200e+1
8e-9	1.8067e+1	1.8066e+1										

							Y		r			
<u>" 8</u>	10.0	5.0	2.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.005	0.002	0.001	0.005	0.002
9e-9	1.7949c+1 1.7843c+1	1.7949c+1 1.7843c+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1.7949c+1 1.7843e+1	1.7949c+1 1.7843c+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1.7949e+1 1.7843e+1	1 7949e+1 1.7843e+1	1.7949e+1 1.7843e+1
	1.7150e+1	1.7150c+1	1.7150e+1	1.7150e+1	1.7150e+1	1.7150e+1	1.7150e+1		1.7150e+1		1.7150c+1	
3e-8		1.6745e+1	1.6745e+1	1.6745e+1	1.6745e+1	1 6745c+1	1.6745c+1	1.6745e+1	1.6745e+1	1.6745e+1	1 6745e+1	1.6744e+1
	1 6457e+1 1.6234e+1	1 6457c+1 1.6234c+1	1.6457c+1 1.6234e+1	1.6457c+1 1.6234c+1	1.6457e+1 1.6234e+1	1.6457e+1 1.6234e+1	1 6457e+1 1.6234e+1	1.6457c+1 1.6234e+1	1.6457e+1 1.6234e+1	1.6457e+1 1.6234e+1	1.6457e+1 1.6234e+1	1.6457e+1 1.6233e+1
	1 6052e+1	1.6052e+1	1 6052e+1	1.6052e+1	1.6052e+1	1.6052e+1	1.6052e+1	1.6052e+1	1 6052c+1	1.6052e+1	16051e+1	1.6051e+1
	1.5898c+1	1 5898e+1	1.5898e+1	1.5898c+1	1.5898c+1	1.5898e+1	1.5898e+1	1.5898e+1	1.5897c+1	1.5897e+1	1.5897e+1	
	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764c+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5764c+1 1.5646c+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1 5764e+1 1.5646e+1	1.5764e+1 1.5646e+1	1.5763e+1 1.5645e+1
	1.5541c+1	1.5541e+1	1.5541e+1	1.5541c+1	1.5541e+1	1.5541e+1	1.5541e+1	1.5541c+1	1.5541e+1	1.5541e+1	1.5540e+1	1.5539e+1
	1.4848c+1	1.4848e+1	1.4848e+1	1.4848c+1	1.4848e+1	1.4848c+1	1.4848c+1	1.4848c+1	1.4847e+1	1.4847e+1	1 4847e+1	
3e-7	1.4442e+1 1.4155e+1	1.4442e+1 1.4155e+1	1.4442c+1 1.4155e+1	1.4442e+1 1.4155e+1	1.4442e+1 1.4155e+1	1.4442e+1 1.4155e+1	1.4442e+1 1.4154e+1	1.4442c+1 1.4154c+1	1.4442e+1 1.4154e+1	1.4441e+1 1.4153e+1	1.4152e+1	1.4438c+1 1.4149c+1
	1.3931e+1	1.3931e+1	1.3931e+1	1.3931e+1	1.3931e+1	1.3931e+1	1 3931c+1	1.3931e+1	1.3931e+1	1.3930e+1	1.3929e+1	
	1.3749e+1	1.3749e+1	1.3749e+1	1.3749e+1	1.3749c+1	1.3749e+1	1.3749e+1	1.3749e+1	1.3748e+1	1.3747c+1	1.3746e+1	
	1.3595e+1 1.3461e+1	1.3594e+1 1.3460e+1	1.3593e+1 1 3459e+1	1.3591e+1 1.3457e+1	1.3585e+1 1.3451e+1							
	1.3344e+1	1.3344c+1	1.3344e+1	1.3344e+1	1.3344e+1	1.3344c+1	1.3343e+1	1.3343c+1	1.3342e+1	1.3341e+1	1.3339e+1	
	1.3238e+1	1.3238c+1	1.3238c+1	1.3238e+1	1.3238c+1	1.3238e+1	1.3238c+1	1.3238e+1	1.3237e+1	1.3236e+1	1.3233e+1	
	1.2545e+1	1.2544c+1	1.2543e+1 1.2136e+1	1.2540e+1	1.2535e+1	1.2520e+1 1.2102e+1						
	1.2140e+1 1.1852e+1	1 2140e+1 1.1852e+1	1.2140c+1 1.1852c+1	1.2140e+1 1.1852e+1	1.2140e+1 1.1852e+1	1.2139e+1 1.1852e+1	1.2139e+1 1.1851e+1	1.2138c+1 1.1850c+1	1.2136e+1	1.2132e+1 1.1843e+1	1.2125e+1 1 1833e+1	1 1803e+1
5e-6	1.1629e+1	1 1629e+1	1.1629e+1	1.1629e+1	1.1629e+1	1.1628e+1	1.1628e+1	1.1627e+1	1.1623e+1	1.1617e+1	1.1605c+1	1.1569e+1
6e-6	1.1447e+1	1.1447e+1	1.1447c+1	1.1447e+1	1.1446e+1	1.1446e+1	1.1445e+1	1.1444e+1	1.1440e+1	1.1433e+1	1 1419c+1	1.1375e+1 1.1209e+1
7e-6 8e-6	1.1293e+1 1.1159e+1	1.1293e+1 1.1159e+1	1.1292e+1 1.1159e+1	1.1292e+1 1.1159e+1	1.1292e+1 1.1159e+1	1.1292e+1 1.1158e+1	1 1291c+1 1.1157c+1	1 1289c+1 1.1155c+1	1.1285c+1 1 1150c+1	1 1277e+1 1.1141e+1	1.1260e+1 1.1123e+1	1.1209e+1 1.1065e+1
	1 1041e+1	1.1041e+1	1.1041e+1	1.1041c+1	1.1041e+1	1.1040c+1	1.1039e+1	1.1037c+1	1.1031e+1	1.1021e+1	11001c+1	1 0935e+1
	1.0936e+1	1 0936e+1	1.0936e+1	1.0936e+1	1.0936e+1	1.0935e+1	1.0934c+1	1.0932e+1	1.0925e+1	1.0914e+1	1.0891e+1	1.0819e+1
2e-5 3e-5	1.0243e+1 9.8377e+0	1.0243c+1 9.8376e+0	1.0243e+1 9.8375e+0	1.0243c+1 9.8372e+0	1.0242e+1 9.8366e+0	1.0241e+1 9.8348e+0	1.0239c+1 9.8318e+0	1.0235e+1 9.8259e+0	1.0222e+1 9.8077e+0	1.0201e+1 9.7766e+0	1.0157e+1 9.7107e+0	1 0007e+1 9.4728e+0
4e-5	9.5502e+0	9.5501e+0	9.5499e+0	9.5495e+0	9.5487c+0	9.5464c+0	9.5426e+0	9.5349e+0	9.5112c+0	9.4703e+0	93819e+0	9 0433e+0
5e-5	9.3272e+0	9.3271e+0	9.3268e+0	9.3264e+0	9.3254e+0	9.3226c+0	9.3179e+0	9.3085e+0	9.2794e+0	9.2287e+0	9.1170e+0	8.6676e+0
6e-5 7e-5	9.1451e+0 8.9911e+0	9.1449e+0 8 9909e+0	9.1446e+0 8.9906e+0	9.1441e+0 8.9899e+0	9.1430e+0 8.9887e+0	9.1397e+0 8.9849e+0	9.1341e+0 8.9785e+0	9.1230e+0 8.9657e+0	9.0886e+0 8.9260e+0	9.0280e+0 8.8555e+0	8 8920e+0 8 6941e+0	8 3256e+0 8.0086e+0
8e-5	8 8577c+0	8 8576e+0	8.8571e+0	8.8564e+0	8 8550e+0	8.8507e+0	8.8436c+0	8.8291e+0	8.7841c+0		8.5157e+0	7.7124e+0
9e-5	8.7401e+0	8.7399e+0	8.7395e+0	8 7387e+0	8.7371e+0	8.7324e+0	8.7244c+0	8.7083c+0	8.6580e+0	8.5673e+0	83519e+0	7.4346c+0
1e-4 2e-4	8.6349e+0 7.9432e+0	8.6347e+0 7.9429e+0	8.6342e+0 7.9420e+0	8.6333e+0 7.9404e+0	8.6316e+0 7.9372e+0	8.6264e+0 7.9276e+0	8.6177e+0 7.9114e+0	8.5999e+0 7.8780e+0	8.5444e+0 7.7700e+0	8.4434e+0 7.5573e+0	8.1995e+0 7.0057e+0	7.1736e+0 5.2613e+0
3e-4		7.5387e+0	7.5374e+0	7.5351e+0	7.5306e+0	7.5169e+0	7.4936e+0	7.4452e+0	7.2832e+0			4 1332e+0
4e-4	7.2528e+0	7 2523c+0	7.2505e+0	7.2476c+0	7.2418e+0	7.2242e+0	7.1941c+0	7.1308e+0	6.9131e+0	6.4534e+0	5.4288e+0	3.4011e+0
5e-4	7.0310e+0 6.8499e+0	7.0303e+0 6.8491e+0	7.0282e+0	7.0247e+0	7.0177c+0 6.8343c+0	6.9962e+0	6.9595e+0 6.7660e+0	6.8816c+0 6 6734e+0	6.6068e+0 6.3411e+0	6.0309e+0		2.8895e+0 2.5122e+0
6e-4 7e-4	6.6970e+0	6.6961e+0	6.8467e+0 6.6933e+0	6.8426e+0 6.6886e+0	6.6792e+0	6.8092e+0 6.6506e+0	6.6009e+0	6.4937e+0	6.1042e+0			2.2226e+0
8e-4	6.5647e+0	6 5636e+0	6.5605e+0	6.5553e+0	6.5448c+0	6.5126c+0	6.4566e+0	6 3349e+0	5.8891c+0	5.0424e+0	3.7186e+0	1.9932e+0
9e-4	6.4480c+0	6 4469e+0	6 4435e+0	6.4377e+0	6.4261e+0	6.3905e+0	6.3282e+0	6.1920e+0	5.6915e+0	4.7806e+0	3 4464e+0	1.8070e+0
1e-3 2e-3	6.3438e+0 5.6614e+0	6 3426e+0 5.6592e+0	6.3388e+0 5.6525e+0	6.3325c+0 5.6414e+0	6.3199e+0 5.6188e+0	6.2808e+0 5.5482e+0	6.2124e+0 5.4207e+0	6.0616e+0 5.1306e+0	5.5086e+0 4.1897e+0	4.5444c+0 3.0429e+0	3.2115e+0 1.9147e+0	1.6529e+0 8.9444e-1
	5 2656e+0	5 2625e+0	5.2534e+0	5.2380e+0	5.2065e+0	5.1071e+0	4.9248e+0	4.5161e+0	3.3893e+0		1 3677e+0	6.1433e-1
	4.9869e+0	4.9831e+0	4.9716e+0	4.9523e+0	4.9127e+0	4.7866e+0	4.5540e+0	4.0519e+0	2.8498e+0		1.0653e+0	4.6820e-1
	4.7723e+0 4 5980e+0	4.7677e+0 4.5929e+0	4.7541e+0 4.5773e+0	4.7312e+0 4.5508e+0	4.6840e+0 4.4965e+0	4.5329e+0 4.3219e+0	4.2548e+0 4.0033e+0	3.6821e+0 3.3783e+0	2.4611e+0 2.1674e+0		8.7310e-1 7.4003e-1	3.7838e-1 3.1756e-1
7e-3	4.4516c+0	4.4459e+0	4.4284e+0	4 3987 c+ 0	4.3376c+0	4.1409e+0	3.7865e+0	3.1235e+0	1.9376c+0	1.1627e+0	6 4236e-1	2.7362e-1
	4.3256e+0	4.3192e+0	4.2999e+0	4 2672e+0	4.1997c+0	3 9821e+0	3 5962e+0	2 9063e+0	1 7526c+0	1 0364e+0	5 6760e-1	2 4039c-1
9e-3 0.01	4 2150e+0 4.1167e+0	4 2081e+0 4.1092e+0	4.1871c+0 4.0865c+0	4.1514e+0 4.0481e+0	4.0778e+0 3.9685e+0	3.8406e+0 3.7129e+0	3.4270e+0 3.2753e+0	2.7187e+0 2.5548e+0	1.6005e+0 1.4731e+0	9.3508e-1 8 5200e-1	5.0851c-1 4.6063e-1	2.1438e-1 1.9345e-1
0.02	3.4848c+0	3.4729e+0	3.4367e+0	3.3750e+0	3.2476e+0	2.8582e+0	2.3033c+0	1.6088c+0	8 2527e-1	4 5290e-1	2 3775c-1	9.7993c-2
	3 1304c+0				2.8276c+0				5.7569c-1	3.0922e-1	1.6045e-1	6.5654e-2
		2.8694e+0 2.6841e+0							4.4281e-1 3 6011e-1	2 3499e-1 1.8959c-1	1.2115e-1 9.7341e-2	4.9375e-2 3.9569e-2
0.06	2.5590e+0	2.5365e+0	2.4684e+0	2.3541e+0	2.1318e+0	1.6009e+0	1 0991e+0	6.6654e-1	3.0361e-1	1.5895e-1	8.1366e-2	3.3015e-2
			2.3410c+0			1.4514e+0	9.7609c-1	5.8297e-1	2.6253e-1	1.3686e-1	6 9902e-2	
		2 3110e+0 2.2215e+0	2 2328e+0 2.1390e+0	2.1032e+0 2.0033e+0	1.8599c+0 1.7527e+0	1.3291e+0 1.2270e+0	8.7860c-1 7.9932c-1	5.1831c-1 4.6674e-1	2.3130e-1 2.0675e-1	1.2017e-1 1.0713e-1	6.1274e-2 5.4544e-2	2 4802c-2 2.2059e-2
0.1	2.1717e+0	2.1429e+0	2.0566e+0	1.9154e+0		1.1403e+0	7.3354e-1	4.2464e-1	1.8694e-1	9.6642e-2	4.9148e-2	
		1.6624e+0	1 5512e+0	1.3809e+0	1.1107e+0	6.7831e-1	4.0615e-1	2.2446e-1	9.5687e-2	4.8902e-2	2.4723e-2	
	1.4561e+0 1.2975e+0		1.2890c+0 1.1195e+0	1.1097e+0 9.3840e-1	8.5091e-1 6.9521e-1	4.8794e-1 3.8271e-1	2.8264e-1 2.1729e-1	1.5310e-1 1.1633e-1	6.4400e-2 4.8561e-2	3.2758e-2 2.4636e-2	1.6522e-2 1.2408e-2	
	1.1828e+0		9.9778e-1	8.1816e-1	5.9026e-1	3.1556e-1	1.7672e-1	9.3870e-2	3.8987e-2	1.9744e-2	9.9357e-3	
	1.0945e+0	1.0432e+0	9.0481e-1	7.2817e-1	5.1424e-1	2.6884e-1	1.4904c-1	7.8714e-2	3.2572e-2	1.6475e-2	8.2851e-3	3.3256e-3
	1 0236e+0 9.6486e-1	9.7075e-1 9.1086e-1	8.3077e-1 7.7001e-1	6.0103c-1	4.5640e-1 4.1080e-1	2.3439e-1 2.0791e-1	1.2892e-1 1.1363e-1	6.7791e-2 5.9542e-2	2.7974e-2 2.4515e-2	1.4135e-2 1.2378e-2	7.1050e-3 6.2193e-3	2.8511e-3 2.4951e-3
0.8		8.6019e-1	7.7001e-1 7.1901e-1	5.5410e-1	3.7384e-1	1.8689e-1	1.1363e-1 1.0161e-1	5.3090e-2	2.4313e-2 2.1818e-2	1.23/8e-2 1.1009e-2	5.5300e-3	2.4951e-3 2.2181e-3
1	8.7231e-1	8.1658e-1	6.7543e-1	5.1455e-1	3.4325e-1	1.6980e-1	9.1913e-2	4.7904e-2	1.9657e-2	9.9137e-3	4.9783e-3	1.9965e-3

				,								
u B	10.0	5.0	2.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.005	0.002	0.001	0.005	0.002
2	6.2688c-1	5.6810e-1	4.3499c-1	3.0719e-1	1.9142c-1	8 9279c-2	4.7187c-2	2.4279c-2	9 8829e-3	4 9706c-3	2.4926e-3	9 9882c-4
3	5.1038c-1	4.5167e-1	3.2880e-1	2.2249e-1	1.3400e-1	6.0827c-2	3.1815c-2	1.6279c-2	6.6039c-3	3.3176e-3	1.6627c-3	6.6603e-4
4	4.3859e-1	3.8081e-1	2 6702c-1	1.7556e-1	1.0348c-1	4.6207c-2	2.4019c-2	1.2250e-2	4.9597c-3	2.4899e-3	1.2475c-3	4 9959c-4
5	3.8862c-1	3.3205e-1	2.2603c-1	1.4548e-1	8.4449c-2	3 7286c-2	1.9301c-2	9 8225e-3	3 9713e-3	1.9928c-3	9.9820e-4	3.9971c-4
6	3 5126c-1	2.9597e-1	1.9662e-1	1.2447e-1	7.1419c-2	3.1270c-2	1.6136c-2	8 1989c-3	3 3116e-3	1 6612e-3	8 3197e-4	3.3312c-4
7	3.2196c-1	2.6797e-1	1.7439c-1	1.0891e-1	6.1922c-2	2.6934c-2	1.3866c-2	7.0365c-3	2.8400c-3	1 4243c-3	7.1321c-4	2 8554e-4
8	2.9820e-1	2.4547e-1	1.5692c-1	9 6907c-2	5.4684c-2	2.3660c-2	1.2157e-2	6.1632e-3	2.4860e-3	1 2465e-3	6.2412e-4	2 4986c-4
9	2.7844e-1	2.2692e-1	1.4281c-1	8.7350c-2	4.8982c-2	2 1100c-2	1.0824c-2	5 4830c-3	2 2105e-3	1 1082e-3	5.5482c-4	2 2210e-4
10	2 6166e-1	2.1130e-1	1.3115c-1	7.9553e-2	4 4370c-2	1.9042c-2	9 7553c-3	4 9382c-3	1.9900c-3	9.9750e-4	4.9938e-4	1 9990c-4
20	1.7060e-1	1.2920e-1	7.3458c-2	4.2453c-2	2.2976c-2	9 6617e-3	4 9141c-3	2.4784c-3	9 9652e-4	4.9913c-4	2 4978c-4	9.9965c-5
30	1.3073c-1	9.5173e-2	5.1625c-2	2.9145c-2	1.5557e-2	6 4826c-3	3.2868c-3	1.6550c-3	6 6479e-4	3 3286e-4	1.6655e-4	6 6648c-5
40	1.0743c-1	7 6034e-2	3.9986c-2	2.2247e-2	1.1776c-2	4.8805c-3	2.4698e-3	1.2424c-3	4.9878c-4	2 4970e-4	1 2492c-4	5.0012e-5
50	9.1855e-2	6.3618e-2	3.2711e-2	1.8015c-2	9.4807c-3	3.9146c-3	1.9784c-3	9 9458c-4	3 9913c-4	1 9978c-4	9 9946e-5	4.0015e-5
60	8.0596c-2	5.4853e-2	2.7717c-2	1.5147c-2	7 9374c-3	3.2684c-3	1 6503e-3	8 2922c-4	3 3267e-4	1 6650c-4	8.3292e-5	3.3349e-5
70	7.2020c-2	4 8308e-2	2.4070c-2	1 3074c-2	6.8282c-3	2 8056c-3	1.4156e-3	7.1102c-4	2.8519c-4	1 4273c-4	7.1396c-5	2.8587e-5
30	6.5237c-2	4.3219e-2	2.1285e-2	1.1505e-2	5.9921c-3	2.4578e-3	1.2394c-3	6 2233e-4	2 4957c-4	1 2489c-4	6 2473c-5	2.5015e-5
90	5 9721c-2	3.9142e-2	1.9088e-2	1 0275c-2	5.3392c-3	2.1869e-3	1 1022c-3	5 5332c-4	2 2186c-4	1 1102c-4	5.5533e-5	2.2237e-5
100	5.5135e-2	3.5796c-2	1.7308c-2	9.2839c-3	4.8151c-3	1 9698e-3	9 9240c-4	4 9809c-4	1 9969c-4	9 9924c-5	4.9982e-5	2.0015e-5
200	3 1955e-2	1.9584e-2	9.0177c-3	4.7432e-3	2.4343c-3	9.8934c-4	4 9732c-4	2 4933c-4	9 9892c-5	4 9973c-5	2.4998e-5	1.0011e-5
300	2.2881e-2	1.3613e-2	6 1243c-3	3 1926c-3	1 6308c-3	6.6087c-4	3 3188c-4	1 6630c-4	6 6608c-5	3 3319e-5	1.6668e-5	6.6755e-6
400	1 7943e-2	1.0474e-2	4.6447c-3	2 4083c-3	1.2267c-3	4.9623e-4	2 4906c-4	1 2476c-4	4 9962c-5	2.4991e-5	1.2502e-5	5.0074e-6
500	1.4811c-2	8.5284c-3	3.7443c-3	1 9342e-3	9 8330c-4	3.9731c-4	1.9932c-4	9.9831c-5	3 9973c-5	1.9994e-5	1.0003e-5	4.0064e-6
600	1.2637e-2	7.2014e-3	3.1379c-3	1.6165c-3	8.2062c-4	3.3128c-4	1 6615c-4	8 3205c-5	3 3313c-5	1.6663e-5	8.3361e-6	3.3390e-6
700	1.1036e-2	6 2367e-3	2 7015c-3	1 3887c-3	7.0420c-4	2 8409c-4	1.4245e-4	7 1327c-5	2 8555c-5	1.4283e-5	7.1456e-6	2.8622e-6
800	9 8049c-3	5.5031e-3	2.3723c-3	1 2173c-3	6.1674e-4	2.4867c-4	1 2467c-4	6.2416c-5	2 4987c-5	1.2498e-5	6.2527e-6	2.5046e-6
900	8.8273e-3	4.9259c-3	2 1150c-3	1.0837c-3	5.4863c-4	2.2111e-4	1 1083c-4	5 5486c-5	2.2212e-5	1.1110e-5	5.5582e-6	2.2265e-6
1000	8.0316c-3	4.4597c-3	1.9082e-3	9 7658c-4	4.9408c-4	1 9905c-4	9.9761e-5	4.9940c-5	1.9991e-5	9.9992e-6	5.0026e-6	2.0040e-6

Значения функции $F(u, \beta)$ для аргумента $\beta = 5 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-3}$

1.00e-3 5.00e-4 2.046c+1 2.0146c+1 2.0146c+1 2.0146c+1 2.0142c+1 2.0142c+1 2.0132c+1 2.015c+1 2.016c+1 2.016		,	эначен	ия фун	кции Г	(u, p) μ	ія арі ум	ienia p	- 3.10	÷ 1 · 10		
2-9 19453e+1 19453e+1 19453e+1 19452e+1 19451e+1 19440e+1 19440e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19437e+1 19447e+1 18447e+1 184	W B	1.00e-3	5.00e-4		l					L	1.00e-6	
3e-9 1.9047e+1 1.9047e+1 1.9047e+1 1.9045e+1 1.9042e+1 1.903e+1 1.903e+1 1.878e+1												
4-9 1.8750e+1 1.8759e+1 1.8758e+1 1.8758e+1 1.8752e+1	2e-9											
5e-9	3e-9	1.9047c+1										
6e-9 1.8354er1 1.8354er1 1.8355er1 1.8352er1 1.8350er1 1.8350er1 1.8330er1 1.8330er1 1.8300er1 1.8200er1 1.8200er1 1.8200er1 1.8198er1 1.8198er1 1.8198er1 1.8174er1 1.8066er1	4e-9	1.8760c+1										
7e-9 1.8200e+1 1.8200e+1 1.8199e+1 1.8199e+1 1.8195e+1 1.8187e+1 1.8174e+1 1.8160e+1 1.8060e+1 1.7880e+1 1.7240e+1 1.740e+1 1.7940e+1 1.7830e+1 1.780e+1 1.780e+	5e-9	1.8536e+1										
8e-9 1.8066e+1 1.8065e+1 1.8064e+1 1.7946e+1	6e-9	1.8354e+1		1.8353e+1				1.8332c+1				
1.7949e+ 1.7948e+ 1.7947e+ 1.7947e+ 1.7947e+ 1.7942e+ 1.7932e+ 1.7916e+ 1.7881e+ 1.7766e+ 1.7502e+ 1.5632e+ 1.6483e+ 1.7843e+ 1.6532e+ 1.6637e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6693e+ 1.6994e+ 1.69	7e-9	1.8200c+1									1.7880c+1	
1.7843e+1 1.7843e+1 1.7843e+1 1.7843e+1 1.7843e+1 1.7843e+1 1.7813e+1 1.713e+1 1.7078e+1 1.699e+1 1.6963e+1 1.6963e+1 1.5565e+1 1.5565e+1 1.2659e+1 1.6474e+1 1.6473e+1 1.6693e+1 1.6693e+1 1.6607e+1 1.5846e+1 1.348e+1 1.0216e+1 1.648e+1 1.645e+1 1.646e+1 1.645e+1 1.646e+1									1.8006c+1			
2e-8 1.7150e+1 1.7149e+1 1.7149e+1 1.7143e+1 1.713e+1 1.713e+1 1.7078e+1 1.699e+1 1.6665e+1 1.5565e+1 1.2659e+1 3e-8 1.674de+1 1.6743e+1 1.6740e+1 1.6743e+1 1.6740e+1 1.6430e+1 1.6633e+1 1.6637e+1 1.6590e+1 1.5840e+1 1.3848e+1 1.0216e+1 5e-8 1.632ae+1 1.6231e+1 1.6232e+1 1.6231e+1 1.6232e+1 1.6231e+1 1.6232e+1 1.673e+1 1.6730e+1 1.579e+1 1.579e+1 1.579e+1 1.779e+1 1.2402e+1 1.070e+1 7.2864e+0 6e-8 1.6500e+1 1.5893e+1 1.5886e+1 1.5875e+1 1.5890e+1 1.5893e+1	9e-9	1.7949c+1	1.7948e+1	1.7947e+1	1 7946c+1	1.7942c+1				1 7766c+1	1 7502c+1	
3e-8 1.6744e+1 1.6743e+1 1.6740e+1 1.6735e+1 1.6724e+1 1.6693e+1 1.6637e+1 1.650e+1 1.5840e+1 1.3848e+1 1.0216e+1	1e-8	1.7843e+1		1.7842e+1							1.7324c+1	
\$\frac{4e-8}{5e-8} 1.6436e+1 16435e+1 1.6436e+1 1.6430e+1 1.6338e+1 1.6312e+1 1.6125e+1 1.5017e+1 1.2339e+1 8.5157e+0	2e-8	1.7150e+1	1.7149e+1	1.7147e+1	1.7143c+1		1.7115c+1	1.7078e+1	1 6998c+1	1.6665c+1	1.5565c+1	
5e-8 1.623e+1 1.623e+1 1.623e+1 1.623e+1 1.620e+1 1.6148e+1 1.6050e+1 1.579le+1 1.420e+1 1.1070e+1 7.2864e+0 6e-8 1.6050e+1 1.6048e+1 1.6042e+1 1.6032e+1 1.6012e+1 1.5875e+1 1.5875e+1 1.5478e+1 1.3420e+1 1.0012e+1 6.3619e+0 7c-8 1.5895e+1 1.5895e+1 1.5875e+1 1.5738e+1 1.5771e+1 1.5630e+1 1.575e+1 1.263e+1 9.248e+0 5.643e+0 5.643e+0 5.643e+0 5.643e+0 5.643e+0 5.643e+0 5.646e+1 1.545e+1 1.5476e+1 1.263e+1 1.268e+1 1.268e+1 1.264e+0 5.666e+1 1.5476e+1 1.263ee+1 1.4874e+1 1.2004e+1 8.3746e+0 5.697e+0 9e-8 1.5643e+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.553be+1 1.552be+1 1.562e+1 1.3575e+1 1.383be+1 1.2776e+1 1.353be+1 1.2776e+1 1.353be+1 1.2776e+1 1.236ee+1 1.3575e+1 1.13	3e-8	1.6744c+1	1.6743c+1	1.6740e+1	1 6735e+1	1.6724e+1	1.6693c+1	1.6637c+1	1 6509c+1	1 5840c+1	1.3848c+1	1 0216c+1
6e-8 1.6030e+1 1.6048e+1 6.042e+1 1.6032e+1 1.6012e+1 1.5949e+1 1.5827e+1 15478e+1 1.3420e+1 1.0012e+1 6.3619e+0 7e-8 1.5895e+1 1.5893e+1 1.5886e+1 1.5875e+1 1.5875e+1 1.5852e+1 1.5777e+1 1.5630e+1 1.5175e+1 1.2685e+1 9.1244e+0 5.6434e+0 8e-8 1.5761e+1 1.5759e+1 1.5751e+1 1.5738e+1 1.5712e+1 1.5626e+1 1.5451e+1 1.4874e+1 1.2004e+1 8.3746e+0 5.0697e+0 9e-8 1.5643e+1 1.5641e+1 5.5632e+1 1.5618e+1 1.5588e+1 1.5490e+1 1.5285e+1 1.4575e+1 1.378e+1 7.7346e+0 4.6014e+0 1e-7 1.5538e+1 1.5535e+1 1.5552e+1 1.5509e+1 1.5476e+1 1.5366e+1 1.5127e+1 1.4277e+1 1.0803e+1 7.1830e+0 4.2121e+0 2e-7 1.4842e+1 1.4435e+1 1.4435e+1 1.4456e+1 1.4718e+1 1.4461e+1 1.3705e+1 1.1538e+1 7.7717e+0 4.1766e+0 2.2810e+0 3e-7 1.4434e+1 1.4425e+1 1.4398e+1 1.4350e+1 1.4245e+1 1.3705e+1 1.2368e+1 9.4871e+0 5.2240e+0 2.9412e+0 1.5643e+0 4e-7 1.4143e+1 1.4132e+1 1.4096e+1 1.4032e+1 1.3859e+1 1.312e+1 1.1155e+1 8.0070e+0 4.1377e+0 2.2699e+0 1.1905e+0 5e-7 1.3917e+1 1.3913e+1 1.3626e+1 1.3563e+1 1.3579e+1 1.3579e+1 1.2512e+1 1.1155e+1 8.0070e+0 4.1377e+0 2.2699e+0 1.1905e+0 5e-7 1.3732e+1 1.3715e+1 1.3662e+1 1.3563e+1 1.3305e+1 1.1315e+1 8.4793e+0 5.4139e+0 2.5468e+0 1.3478e+0 6.9368e-1 8e-7 1.3440e+1 1.3417e+1 3.345e+1 1.3207e+1 1.2308e+1 1.0773e+1 9.2373e+0 6.0730e+0 2.2212e+0 1.5588e+0 8.0573e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.3305e+1 1.3305e+1 1.330e+0 4.485e+0 2.2274e+0 1.0608e+0 5.4278e-1 9e-7 1.3440e+1 1.3417e+1 3.345e+1 1.3053e+1 1.2371e+1 1.0273e+1	4e-8	1.6456c+1	1 6455e+1	1.6451c+1	1 6444c+1	1.6430c+1	1.6388c+1	1.6312c+1	1 6125c+1	1.5017e+1	1.2339c+1	
7c-8 15895c+1 1.5893c+1 1.5886c+1 1.5875c+1 1.5777c+1 15630c+1 15175c+1 1.2685c+1 9.1244c+0 5 6434c+0 8c-8 1.5761c+1 1.5759c+1 1.5751c+1 1.5738c+1 1.5626c+1 1.5431c+1 1.2004c+1 3.7746c+0 5 0697c+0 9c-8 1.5632c+1 1.5613c+1 1.5613c+1 1.5525c+1 1.5518c+1 1.5538c+1 1.5595c+1 1.5559c+1 1.5546c+1 1.5366c+1 1.5127c+1 1.4277c+1 1.0803c+1 7.1830c+0 4.2121c+0 2c-7 1.4842c+1 1.4836c+1 1.4786c+1 1.4786c+1 1.456c+1 1.3705c+1 1.5358c+1 7.0717c+0 4.2121c+0 3c-7 1.4842c+1 1.4836c+1 1.4398c+1 1.3376c+1 1.3856c+1 1.3378c+1 1.329c+1 1.165c+1 8.070c+0 4.137re+0 2.2699c+0 1.905c+0 5c-7 1.3917c+1 1.3903c+1	5e-8	1.6232e+1	1 6231c+1	1 6226e+1	1.6218c+1		1.6148c+1	1 6050c+1	1.5791c+1	1 4202c+1	1 1070e+1	
8e-8 1.5761e+1 1.5759e+1 1.5751e+1 1.5738e+1 1.5712e+1 1.5626c+1 1.5490e+1 1.5285e+1 1.4874e+1 1.2004e+1 8.3746e+0 5 0697e+0 9e-8 1.5643e+1 1.5632e+1 1.5632e+1 1.5588e+1 1.5496e+1 1.5285e+1 1.4575e+1 1.1378c+1 7.7346e+0 4 6014e+0 1e-7 1.5538e+1 1.5453e+1 1.5555e+1 1.5555e+1 1.5476c+1 1.5366c+1 1.5157c+1 1.4277c+1 1.0803e+1 7.1830e+0 4 2121c+0 2e-7 1.4842e+1 1.4336e+1 1.4786e+1 1.4718e+1 1.4461e+1 1.3705e+1 1.5358e+1 70717e+0 4.1766c+0 2.2810e+0 4e-7 1.4143e+1 1.4339e+1 1.4350e+1 1.3237e+1 1.3122e+1 1.165e+1 8.070e+0 4.377e+0 2.2699e+0 1.5643e+0 5e-7 1.3312e+1 1.3303e+1 1.3356e+1 1.3359e+1 1.2494e+1 1.0125e+1 8.0710e+0 4.377e+0 2.2699e+0 1.5632e+0 6e-7 1.3356e+1 1.3493e+1 1.335	6e-8	1.6050c+1	1.6048c+1	1 6042e+1	1.6032c+1	1.6012e+1	1.5949c+1	1.5827e+1	1 5478c+1	1.3420e+1	1.0012c+1	
9c-8 1.5643c+1 1.5641c+1 1.5632c+1 1.5618c+1 1.5588c+1 1.5490c+1 1.5285c+1 1.4575c+1 1.1378c+1 7.7346c+0 4.6014c+0 1.67 1.5538c+1 1.5535c+1 1.5525c+1 1.5509c+1 1.5476c+1 1.5366c+1 1.5127c+1 1.4277c+1 1.0803c+1 7.1830c+0 4.2121c+0 1.67 1.67 1.67 1.67 1.67 1.67 1.67 1.67	7e-8	1 5895e+1	1.5893e+1	1.5886c+1	1.5875e+1	1.5852c+1	1.5777e+1	1 5630c+1	1 5175c+1	1.2685e+1	9.1244c+0	5 6434c+0
9e-8 1.5643c+1 1.5641c+1 1.5632c+1 1.5618c+1 1.5588c+1 1.5476c+1 1.5285c+1 1.4776c+1 1.1378c+1 7.7346c+0 4.6014c+0 1.67 1.5338c+1 1.5535c+1 1.5552c+1 1.5509c+1 1.5476c+1 1.5366c+1 1.5170c+1 1.4277c+1 1.803ac+1 7.1830c+0 4.2121c+0 3e-7 1.4434c+1 1.4435c+1 1.4398c+1 1.4350c+1 1.4245c+1 1.3770c+1 1.2368c+1 9.4871c+0 5.2240c+0 2.9412c+0 1.5643c+0 4e-7 1.4143c+1 1.4132c+1 1.4096c+1 1.4032c+1 1.3883c+1 1.3122c+1 1.1165c+1 8.0070c+0 4.1377c+0 2.2699c+0 1.1905c+0 5e-7 1.3917c+1 1.3903c+1 1.3885c+1 1.3778c+1 1.3579c+1 1.2494c+1 1.0125c+1 6.9110c+0 3.4247c+0 1.8482c+0 9.6099c-1 6e-7 1.3732c+1 1.3715c+1 1.3662c+1 1.3563c+1 1.3306c+1 1.1890c+1 9.2373c+0 6.0730c+0 2.2912c+0 1.5588c+0 8.0573c-1 7e-7 1.3576c+1 1.3556c+1 1.3493c+1 1.3375c+1 1.3051c+1 1.1315c+1 8.4793c+0 5.4139c+0 2.3468c+0 1.3478c+0 6.9368c-1 8e-7 1.3440c+1 1.3417c+1 1.345c+1 1.307c+1 1.2808c+1 1.0776c+1 7.8290c+0 4.8458c+0 2.0274c+0 1.0608c+0 6.0901c-1 9e-7 1.3319c+1 1.3294c+1 1.3213c+1 1.3053c+1 1.2571c+1 1.0776c+1 7.2670c+0 4.4458c+0 2.0274c+0 1.0608c+0 5.4278c-1 1e-6 1.3211c+1 1.3184c+1 1.3093c+1 1.2910c+1 1.2339c+1 8.8055c+0 6.7777c+0 4.0804c+0 1.8398c+0 9.5877c-1 2e-6 1.2493c+1 1.2438c+1 1.2240c+1 1.1735c+1 1.0233c+1 6.6330c+0 4.0319c+0 2.2392c+0 9.5629c-1 4.8890c-1 2e-6 1.296c+1 1.1979c+1 1.1641c+1 1.0718c+1 8.5926c+0 4.9770c+0 2.234c+0 1.179c+0 4.8817c-1 2.4702c-1 2e-6 1.151c+1 1.1635c+1 1.1124c+1 9.8009c+0 7.3604c+0 3.9781c+0 2.2334c+0 1.179c+0 4.8817c-1 2.4702c-1 2e-6 1.1979c+1 1.1641c+1 1.0718c+1 8.5926c+0 4.9770c+0 2.234c+0 1.179c+0 4.8817c-1 2.4702c-1 2e-6 1.1950c+1 1.1952c+1 1.0643c+1 8.9909c+0 7.3604c+0 3.9781c+0 2.2334c+0 1.179c+0 4.8817c-1 2.4702c-1 2e-6 1.1950c+1 1.10	8e-8	1.5761e+1	1.5759e+1	1 5751e+1	1.5738e+1	1.5712e+1	1.5626c+1	1 5451c+1	1.4874e+1	1.2004e+1	8.3746c+0	5 0697c+0
2e-7 1.4842e+1 1.4836e+1 1.4817e+1 1.4718e+1 1.4461e+1 1.3705e+1 1.1538e+1 70717e+0 4.1766e+0 2.2810e+0 3e-7 1.4434e+1 1.4425e+1 1.4398e+1 1.4350e+1 1.3426e+1 1.3268e+1 9.4871e+0 5.2240e+0 2.9412e+0 1.5643e+0 4e-7 1.4143e+1 1.4132e+1 1.405e+1 1.3388e+1 1.312e+1 1.1165e+1 8.070e+0 4.137re+0 2.2699e+0 1.905e+0 5e-7 1.3917e+1 1.3303e+1 1.3858e+1 1.3778e+1 1.3579e+1 1.2494e+1 1.0125e+1 6.9110e+0 3.4247e+0 1.8482e+0 9 6099e-1 6e-7 1.3375e+1 1.3563e+1 1.3356e+1 1.3306e+1 1.3576e+1 1.3576e+1 1.3556e+1 1.340e+1 1.3576e+1 1.3576e+1 1.3556e+1 1.347e+0 2.588e+0 8.573e-1 7e-7 1.3340e+1 1.3345e+1 1.305e+1 1.355e+1 8.473e+0 5.413e+0 5.438e+0 2.937e+0 5.439e+0 2.246e+0 1.347e+0 6.6936e-1 <tr< th=""><th></th><th></th><th>1 5641c+1</th><th>1 5632e+1</th><th>1 5618e+1</th><th>1.5588e+1</th><th>1.5490e+1</th><th>1.5285c+1</th><th>1 4575c+1</th><th>1 1378c+1</th><th>7.7346c+0</th><th>4 6014c+0</th></tr<>			1 5641c+1	1 5632e+1	1 5618e+1	1.5588e+1	1.5490e+1	1.5285c+1	1 4575c+1	1 1378c+1	7.7346c+0	4 6014c+0
3e-7	1e-7	1.5538c+1	1.5535e+1	1.5525e+1	1.5509e+1	1.5476c+1	1.5366c+1	1.5127c+1	1.4277e+1	1.0803c+1	7.1830c+0	4 2121c+0
3e-7	2e-7	1.4842e+1	1.4836c+1	1 4817e+1	1.4786e+1	1.4718e+1	1 4461e+1	1.3705e+1	1.1538c+1	7 0717e+0	4.1766c+0	2 2810c+0
4e-7 1.4143e+1 1.4096e+1 1.4032e+1 1.3883e+1 1.3122e+1 1.1165c+1 8.0070c+0 4.1377e+0 2.2699c+0 1 1905e+0 5e-7 1.3917e+1 1.3903e+1 1.3888e+1 1.3778e+1 1.3579e+1 1.2494e+1 1.0125c+1 6.9110c+0 3.4247c+0 1 8482e+0 9 6099e-1 7e-7 1.3576e+1 1.3556e+1 1.349ae+1 1.3375e+1 1.3051e+1 1.1315c+1 8.4793e+0 5.4139c+0 2.248e+0 1.3478e+0 6.9368c-1 8e-7 1.3440c+1 1.3417e+1 13345e+1 1.3207e+1 1.2808e+1 1.0776e+1 7 8290c+0 4 8826c+0 2.2576e+0 1.1872e+0 6.9368c-1 9e-7 1.3319e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.274e+0 1.1872e+0 6.990le-1 1e-6 1.3211e+1 1.3053e+1 1.230se+1 1.2359e+1 9.8055e+0 6.7777e+0 4.4884e+0 2.274e-0 1.649ae+1 2.493e+1 1.2438e+1 1.2239e+1 1.2239e+1 1.2438e+1			1.4425c+1	1.4398c+1	1.4350e+1	1.4245e+1	1.3770c+1	1.2368c+1	9.4871e+0	5.2240e+0	2.9412c+0	1.5643c+0
6e-7 1.3732e+1 1.3715e+1 1.3662e+1 1.3563e+1 1.3306e+1 1.1890e+1 9.2373e+0 6.0730e+0 2.9212e+0 1.5588e+0 8.0573c-1 7e-7 1.35756e+1 1.35556e+1 1.3493e+1 1.3375e+1 1.3051e+1 1.1315e+1 8.4793e+0 5.4139e+0 2.5468e+0 1.3478e+0 6.9368c-1 9e-7 1.3319e+1 1.3244e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.076e+1 7.8290e+0 4.8826e+0 2.2576e+0 1.1872e+0 6.0901e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.073e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.0274e+0 1.0608e+0 5.4278e-1 1e-6 1.3211e+1 1.3184e+1 1.3093e+1 1.2910e+1 1.2339e+1 9.8055e+0 6.7777e+0 4.0804e+0 1.8398e+0 9.5877c-1 4.8954e-1 2e-6 1.2493e+1 1.2438e+1 1.2240e+1 1.1735e+1 1.0233e+1 6.6330e+0 4.0319e+0 2.2392e+0 9.5629e-1 4.8890e-1 2.4720e-1 3e-6 1.2063e+1 1.1979e+1 1.1641e+1 1.0718e+1 8.5926e+0 4.9770e+0 2.2661e+0 1.5435e+0 6.4631e-1 3.2819e-1 1.6537e-1 4e-6 1.1751e+1 1.1635e+1 1.1124e+1 9.8009e+0 7.3604e+0 3.9781e+0 2.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.4702e-1 1.2425e-1 5e-6 1.1593e+1 1.1352e+1 1.0643e+1 8.89909e+0 6.4219e+0 3.3125e+0 1.8164e+0 9.5251e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 5e-6 1.1996e+1 1.1107e+1 1.01886e+1 8.2839e+0 5.8890e+0 2.8376e+0 1.3355e+0 7.9958e-1 3.2734e-1 1.6532e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.7568e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 8e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.8662e+0 6.6602e+0 4.2314e+0 1.9847e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.8662e+0 6.6602e+0 4.2314e+0 1.9847e+0 1.0493e+0 5.3978e-1 2.1967e-1 1.1047e-1 5.5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9943e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8786e+0 2.1782e+0 9.4539e-1 2.4618e-1 9.9434e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 1.5124e+0 1.9849e-1 1.9490e-1 2.4498e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 3e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 1.5124e+0 1.9490e-1 1.9490e-1 9.9490e-2 3.9899e-2 1.9937e-3			1.4132e+1	1 4096e+1	1.4032e+1	1.3883e+1	1.3122e+1	1.1165c+1	8.0070c+0	4.1377e+0	2.2699c+0	1 1905e+0
6e-7 1.3732e+1 1.3715e+1 1.3662e+1 1.3563e+1 1.3366e+1 1.1390e+1 1.2873e+0 6.0730e+0 2.2912e+0 1.5588e+0 8.0573e-1 7e-7 1.3576e+1 1.3556e+1 1.3575e+1 1.3051e+1 1.3051e+1 1.1315e+1 8.4793e+0 5.4139e+0 2.2476e+0 1.3478e+0 6.9368e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.2276e+0 1.1872e+0 6.0901e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.0274e+0 10608e+0 5.4278e-1 1e-6 1.3211e+1 1.3184e+1 1.3093e+1 1.2910e+1 1.2339e+1 9.8055e+0 6.7777e+0 4.0804e+0 1.8398e+0 9.5877e-1 4.8954e-1 2e-6 1.2493e+1 1.2438e+1 1.2240e+1 1.735e+1 1.0233e+1 6.6330e+0 4.0319e+0 2.2392e+0 9.5629e-1 4.8890e-1 2.4720e-1 3e-6 1.2063e+1 1.1979e+1 1.1641e+1 1.0718e+1 8.9256e+0 4.9770e+0 2.3661e+0 1.5435e+0 6.4631e-1 3.2819e-1 1.6537e-1 4e-6 1.1751e+1 1.1635e+1 1.1124e+1 9.8009e+0 7.3604e+0 3.7818e+0 2.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.4702e-1 1.2425e-1 5e-6 1.19503e+1 1.1979e+1 1.0188e+1 8.9909e+0 6.4219e+0 3.3125e+0 1.8164e+0 9.5251e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 5e-6 1.19503e+1 1.1018e+1 1.0188e+1 8.2837e+0 5.8896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e-1 3.2784e-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.7568e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 8e-6 1.0957e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 4.6275e+0 2.2055e+0 1.1731e+0 6.0533e-1 2.4681e-1 1.420e-1 6.2299e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.9662e+0 6.6602e+0 4.21782e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9946e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8778e+0 1.188e+0 4.897e-1 1.1940e+1 9.9496e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 6.6034e+0 2.7564e+0 1.1588e+0 4.8902e-1 4.8076e-1 1.943	5e-7	1.3917e+1	1.3903e+1	1.3858e+1	1.3778e+1	1.3579e+1	1.2494c+1	1.0125c+1	6.9110c+0	3.4247c+0	1 8482c+0	9 6099c-1
8e-7 1.3440e+1 1.3417e+1 1 3345e+1 1 3207e+1 1.2808e+1 1.0776e+1 7 8290e+0 4 8826e+0 2.2576e+0 1.1872e+0 6.0901e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1 3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.0274e+0 1 608e+0 5.4278e-1 1e-6 1.3211e+1 1.3184e+1 1.303e+1 1.233e+1 6.635e+0 6.777e+0 4.0804e+0 1.8398e+0 9.5877e-1 4.895e-1 2e-6 1.2438e+1 1.2240e+1 1.1735e+1 1.0233e+1 6.6350e+0 4.9770e+0 2.8661e+0 1.535e+0 4.8890e-1 2.4720e-1 3e-6 1.263e+1 1.1635e+1 1.124e+1 9.809e+0 7.3604e+0 3.9781e+0 2.233e+0 6.4631e-1 3.2819e-1 1.6537e-1 4e-6 1.1503e+1 1.152e+1 9.809e+0 7.3604e+0 3.9781e+0 2.234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.470e-1 1.245e-1 5e-6 1.1503e+1 1.103e+1 8.9339e+0 5.6896e+0		1.3732e+1	1.3715e+1	1.3662c+1	1.3563e+1	1 3306e+1	1.1890c+1	9 2373e+0	6.0730e+0	2.9212e+0	1.5588c+0	8 0573c-1
8e-7 1.3440e+1 1.3417e+1 13345e+1 13207e+1 1.2808e+1 1.0776e+1 7 8290e+0 4 8826e+0 2.2576e+0 1.1872e+0 6.0901e-1 9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.0274e+0 1 0608e+0 5.4278e-1 1e-6 1.3211e+1 1.3184e+1 1.203e+1 1.293e+1 9.655e+0 6 7777e+0 4.0804e+0 1.8398e+0 9 5877e-1 4.8954e-1 2e-6 1.2493e+1 1.2438e+1 1.2240e+1 1.1735e+1 1.0233e+1 6.6330e+0 4.0319e+0 2.2392e+0 9.5629e-1 4.8890e-1 2.4720e-1 3e-6 1.2063e+1 1.1635e+1 1.1641e+1 1.0718e+1 8.5926e+0 4.9770e+0 2.8661e+0 1.5435e+0 6.4631e-1 32819e-1 1.6537e-1 4e-6 1.153c+1 1.163c+1 1.194e+1 8.9909e+0 6.4219e+0 33125e+0 1.8164e+0 9.521e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 5e-6 1.1296e+1 </th <th>7e-7</th> <th>1.3576e+1</th> <th>1.3556e+1</th> <th>1 3493e+1</th> <th>1.3375e+1</th> <th>1.3051e+1</th> <th>1.1315e+1</th> <th>8.4793c+0</th> <th>5.4139c+0</th> <th>2.5468e+0</th> <th>1.3478c+0</th> <th>6.9368c-1</th>	7e-7	1.3576e+1	1.3556e+1	1 3493e+1	1.3375e+1	1.3051e+1	1.1315e+1	8.4793c+0	5.4139c+0	2.5468e+0	1.3478c+0	6.9368c-1
9e-7 1.3319e+1 1.3294e+1 1.3213e+1 1.3053e+1 1.2571e+1 1.0273e+1 7.2670e+0 4.4458e+0 2.0274e+0 1.0608e+0 5.4278e+1 1.6-6 1.3211e+1 1.3184e+1 1.3093e+1 1.2910e+1 1.2339e+1 9.8055e+0 6.7777e+0 4.8004e+0 1.8398e+0 9.5877e-1 4.8954e+1 1.243e+1 1.2420e+1 1.735e+1 1.0233e+1 6.6330e+0 4.0319e+0 2.2392e+0 9.5629e+1 4.8890e+1 2.4720e+1 1.6537e+1 1.0233e+1 1.124e+1 9.8009e+0 7.3604e+0 1.5435e+0 6.4631e+1 3.2819e+1 1.6537e+1 1.153e+1 1.1635e+1 1.1124e+1 9.8009e+0 7.3604e+0 3.9781e+0 2.234e+0 1.1779e+0 4.8817e+1 2.4702e+1 1.2470e+1 5e-6 1.1503e+1 1.1352e+1 1.0643e+1 8.9909e+0 6.4219e+0 3.7350e+0 1.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e+1 2.4702e+1 1.245e+1 5e-6 1.1296e+1 1.1107e+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.8896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e+1 3.2784e+1 1.6528e+1 8.2839e+0 5.8896e+0 2.8376e+0 1.3355e+0 7.9958e+1 3.2784e+1 1.6528e+1 8.2837e+0 5.684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e+1 2.8161e+1 1.4183e+1 7.1170e+2 8e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 9.3495e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e+1 2.8161e+1 1.4183e+1 7.1170e-2 8e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.9652e+0 6.6602e+0 4.2314e+0 1.9497e+0 5.3978e+1 2.1967e+1 1.047e+1 5.395e+2 1.5080e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e+1 8.706e+1 1.9791e+1 9.9475e-2 4.9868e+2 1.5585e+0 7.9958e+0 8.2770e+0 8.231e+0 6.0515e+0 3.878e+0 1.0493e+0 5.3978e+1 2.1967e+1 1.047e+1 5.395e-2 1.5586e+0 8.2316e+0 8.2321e+0 6.0515e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e+1 4.8706e+1 1.9791e+1 9.9475e-2 4.9868e+2 1.5585e+0 7.6584e+0 8.23210e+0 8.2321e+0 6.0515e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e+1 4.8706e+1 1.9791e+1 9.9475e-2 4.9868e-2 1.5586e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 7.7564e+0 1.1588e+0 4.8920e+1 4.8007e+1 1.4936e+2 2.4961e-2 1.2490e+2 3.2496e+2 3.2496e+2 3.2496e+2 3.2496e+0 4.2316e+0 4.8290e+1 1.5000e+1 1.5000e+	8e-7	1.3440c+1	1.3417e+1	1 3345e+1	1 3207e+1	1.2808e+1	1.0776e+1	7 8290c+0	4 8826e+0	2.2576e+0	1.1872c+0	6.0901e-1
Ze-6 1.2493e+1 1.2438e+1 1.2240e+1 11735e+1 1.0233e+1 6.6330c+0 4 0319e+0 2.2392e+0 9.5629e-1 4.8890c-1 2.4720c-1 3e-6 1.2063e+1 1.1979e+1 1.1641e+1 1.0718e+1 8.5926e+0 4.9770e+0 2.8661e+0 1.5435e+0 6.4631e-1 3 2819c-1 1.6537e-1 4e-6 1.1751e+1 1.1635e+1 1.1312e+1 9.8099e+0 7.3604e+0 3 9781e+0 2.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.4702c-1 1.2425c-1 5e-6 1.1503e+1 1.1352e+1 1.0643e+1 8.9999e+0 6.4219e+0 3 3125e+0 1.8164e+0 9.5251e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 6e-6 1.1296e+1 1.107c+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.6896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e-1 3.2784e-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 4.6275e+0 2.2055e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 <		1.3319e+1	1.3294e+1	1.3213e+1	1 3053e+1	1.2571e+1	1.0273e+1	7.2670e+0	4.4458c+0	2.0274e+0	1 0608e+0	5.4278c-1
2e-6 1.2493e+1 1.2438e+1 1.2240e+1 1 1735e+1 1.0233e+1 6.6330e+0 4 0319e+0 2.2392e+0 9.5629e-1 4.8890e-1 2.4720e-1 3e-6 1.2063g+1 1.1979e+1 1.1641e+1 1.0718e+1 8.5926e+0 4.9770e+0 2.8661e+0 1.5435e+0 6.4631e-1 3 2819e-1 1.6537e-1 4e-6 1.1751e+1 1.1635e+1 1.164e+1 9.8909e+0 7.3604e+0 3 9781e+0 2.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.4702e-1 1.2425e-1 5e-6 1.1505e+1 1.1352e+1 1.0643e+1 8.9909e+0 6.4219e+0 3 3125e+0 1.8164e+0 9.5251e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 6e-6 1.1296e+1 1.107c+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.6896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e-1 3.2784e-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1016e+1 1.06886e+1 9.7568e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2	1e-6	1.3211e+1	1.3184e+1	1.3093e+1	1 2910e+1	1.2339e+1	9.8055e+0	6 7777e+0	4.0804e+0	1.8398c+0	9 5877c-1	4.8954e-1
4c-6 1.1751e+1 1.1635e+1 1.1124e+1 9.8009c+0 7.3604e+0 3 9781e+0 2.2234e+0 1.1779e+0 4.8817e-1 2.4702e-1 1.2425c-1 5c-6 1.1503e+1 1.1352e+1 1.0643e+1 8.9909e+0 6.4219e+0 3 3125e+0 1.8164e+0 9.5251e-1 3.9224e-1 1.9805e-1 9.9510e-2 6e-6 1.1296e+1 1.107c+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.6896e+0 2.8376e+0 1.3355e+0 7.9958e-1 3.2784c-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1216e+1 1.0886e+1 9.7568e+0 7.684e+0 5.1046e+0 2.4819e-0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161c-1 1.4183e-1 7.1170c-2 8e-6 1.0957e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 46275e+0 2.2055e+0 1.1731e+0 6.0533c-1 2.4681e-1 1.2420c-1 6.2299c-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.662e+0 6.6602e+0 4.2314e+0 1.9847e+0 1.0493e+0 5.3978c-1 2.1967e-1 11047e-1 5.3395e-2	2e-6	1.2493c+1	1.2438e+1	1.2240e+1	1 1735e+1	1.0233e+1	6.6330e+0	4 0319c+0	2.2392e+0	9.5629e-1	4.8890c-1	2.4720e-1
5c-6 1.1503c+1 1.043c+1 8.9909c+0 6.4219c+0 3.3125c+0 1.8164c+0 9.5251c-1 3.9224c-1 1.9805c-1 9.9510c-2 6c-6 1.1296c+1 1.107c+1 1.0188c+1 8.2839c+0 5.6896c+0 2.8376c+0 1.5355c+0 7.9958c-1 3.2784c-1 1.6528c-1 8.2987c-2 7c-6 1.1116c+1 1.0886c+1 9.7568c+0 7.0684c+0 5.1046c+0 2.4819c+0 1.3300c+0 6.8901c-1 2.8161c-1 1.4183c-1 7.1170c-2 8c-6 1.0813c+1 1.0681c+1 9.3495c+0 7.1312c+0 4.6275c+0 2.2055c+0 1.1731c+0 6.6930c-1 2.8161c-1 1.4183c-1 7.1170c-2 9c-6 1.0813c+1 1.0688c+1 8.9652c+0 6.6602c+0 4.2314c+0 1.9847c+0 1.0493c+0 5.3978c-1 2.1967c-1 1104rc-1 5.2395c-2 1c-5 1.0680c+1 1.0304c+1 8.6066c+0 6.2451c+0 3.8975c+0 1.8041c+0 9.4920c-1 4.8706c-1 1.9791c-1 9.9475c-2 4.9868c-2 2c-5 9.6	3e-6	1.2063c+1	1.1979e+1	1.1641e+1	1.0718e+1	8.5926e+0	4.9770e+0	2.8661e+0	1.5435e+0	6.4631e-1	3 2819c-1	1.6537e-1
6c-6 1.1296e+1 1.1107c+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.6896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e-1 3.2784e-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.7568e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 13300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 8e-6 1.0957e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 4 6275e+0 2.2955e+0 1.1731e+0 6 6533e-1 2 4681e-1 1 2420e-1 6.2299e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8 965c2+0 6.6602e+0 4 2314e+0 1.987e+0 1.0499e+0 5.3978e-1 2 1967e-1 11047e-1 5 5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 9.9475e-2 4.9868e-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8778e+0 2.1782e+0 9 4539e-1 4.8607e-1 2.4648e-1 9.934de-2 4.9858e-2 2.4964e-2 <t< th=""><th>4e-6</th><th>1.1751e+1</th><th>1.1635e+1</th><th>1.1124e+1</th><th>9.8009c+0</th><th>7.3604e+0</th><th>3 9781c+0</th><th>2.2234e+0</th><th>1.1779e+0</th><th>4.8817e-1</th><th>2.4702c-1</th><th>1.2425c-1</th></t<>	4e-6	1.1751e+1	1.1635e+1	1.1124e+1	9.8009c+0	7.3604e+0	3 9781c+0	2.2234e+0	1.1779e+0	4.8817e-1	2.4702c-1	1.2425c-1
6e-6 1.1296e+1 1.1107e+1 1.0188e+1 8.2839e+0 5.6896e+0 2.8376e+0 1.5355e+0 7.9958e-1 3.2784e-1 1.6528e-1 8.2987e-2 7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.7558e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 1.3300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 8e-6 1.0957e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 4.6275e+0 2.2055e+0 1.1731e+0 6.6533e-1 2.4681e-1 1.2420e-1 6.2299e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.9652e+0 6.6602e+0 4.2314e+0 1.983re+0 1.0499e-1 5.3978e-1 2.1967e-1 1104re-1 5.5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 9.9475e-2 4.9868e-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 0.515e+0 3.8778e+0 2.1782e+0 9.459e-1 4.8607e-1 2.4648e-1 9.934e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 <th< th=""><th>5e-6</th><th>1.1503c+1</th><th>1.1352e+1</th><th>1 0643e+1</th><th>8.9909e+0</th><th>6.4219c+0</th><th>3 3125e+0</th><th>1.8164e+0</th><th>9.5251e-1</th><th>3.9224e-1</th><th>1.9805e-1</th><th>9.9510e-2</th></th<>	5e-6	1.1503c+1	1.1352e+1	1 0643e+1	8.9909e+0	6.4219c+0	3 3125e+0	1.8164e+0	9.5251e-1	3.9224e-1	1.9805e-1	9.9510e-2
7e-6 1.1116e+1 1.0886e+1 9.7568e+0 7.6684e+0 5.1046e+0 2.4819e+0 13300e+0 6.8901e-1 2.8161e-1 1.4183e-1 7.1170e-2 8e-6 1.0875e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 2.2055e+0 1.1731e+0 6.0533e-1 2.4681e-1 1.2420e-1 6.2299e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8.965e2+0 6.6602e+0 4.231e+0 1.943e+0 1.943e+0 5.9378e-1 2.1967e-1 1.1047e-1 5.5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 9.9475e-2 4.988e-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8778e+0 2.1782e+0 9.439e-1 4.8607e-1 2.4648e-1 9.943de-2 4.9858e-2 2.496de-2 3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 2.7564e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.504e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.650e-2 4e-5 8.2270e+0 5.5255e+		1.1296e+1	1.1107c+1	1.0188c+1	8.2839e+0	5.6896e+0	2.8376e+0	1.5355e+0	7.9958e-1	3.2784c-1	1.6528e-1	8.2987e-2
8e-6 1.0957e+1 1.0681e+1 9.3495e+0 7.1312e+0 4 6275e+0 2.2055e+0 1.1731e+0 6 0533e-1 2 4681e-1 1 2420e-1 6.2299e-2 9e-6 1.0813e+1 1.0488e+1 8 9662e+0 6.6602e+0 4 2314e+0 1.9847e+0 1.0493e+0 5.3978e-1 2 1967e-1 1 1047e-1 5 5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 1.991e-1 9.9475e-2 4.9868e-2 2.4964e-2 2s-5 8.9015e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 2.7564e+0 1.152e+0 6.4093e-1 3.2681e-1 1.6502e-1 6.6403e-2 3.3267e-2 1.6650e-2 4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.892e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2		1.1116e+1	1.0886e+1	9.7568e+0	7.6684e+0	5.1046c+0	2.4819c+0	1 3300e+0	6.8901e-1	2.8161c-1	1.4183e-1	7.1170c-2
9e-6 1.0813e+1 1.0488c+1 8 9662e+0 6.6602e+0 4 2314e+0 1.9847e+0 1.0493e+0 5.3978e-1 2 1967e-1 11047e-1 5 5395e-2 1e-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 9.9475e-2 4.9868e-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3 8278e+0 2.1782e+0 9 4539e-1 2.4680e-1 2 4648e-1 9 9434e-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 2.7564e+0 1.5124e+0 6.4093e-1 3.2681e-1 1.6502e-1 6.603e-2 3.3267e-2 1.6650e-2 4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.6450e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937e-3		1.0957e+1	1.0681e+1	9.3495e+0	7.1312c+0	4 6275e+0	2.2055c+0	1.1731e+0	6 0533c-1	2 4681e-1	1 2420c-1	6.2299c-2
Ie-5 1.0680e+1 1.0304e+1 8.6066e+0 6.2451e+0 3.8975e+0 1.8041e+0 9.4920e-1 4.8706e-1 1.9791e-1 9.9475e-2 4.9868c-2 2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8278e+0 2.1782e+0 9.4539e-1 4.8607e-1 2.4648e-1 9.943de-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 2.7564e+0 1.5124e+0 6.4093e-1 3.2681e-1 1.5502e-1 6.6403e-2 3.2496e-2 1.6650e-2 4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937c-3		1.0813e+1	1.0488e+1	8 9662e+0	6.6602e+0	4 2314e+0	1.9847e+0	1.0493c+0	5.3978c-1	2 1967e-1	1 1047e-1	
2e-5 9.6764e+0 8.7231e+0 6.0515e+0 3.8278c+0 2.1782e+0 9.439c-1 4.8607e-1 2.4648e-1 9.9434c-2 4.9858e-2 2.4964e-2 3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 2.7564e+0 1.5124e+0 6.4093e-1 3.2681e-1 1.6502e-1 6.6403e-2 3.3267e-2 1.6650e-2 4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937c-3		1.0680c+1	1.0304e+1	8.6066c+0	6.2451e+0	3.8975c+0	1.8041e+0	9.4920e-1	4.8706c-1	1.9791e-1	9.9475c-2	4.9868c-2
3e-5 8.9015e+0 7.4854e+0 4.6334e+0 2.7564e+0 1.5124e+0 6.4093e-1 3.2681e-1 1.6502e-1 6.6403e-2 3.3267e-2 1.6650e-2 4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937e-3				6 0515e+0	3 8278c+0	2.1782c+0	9 4539c-1	4.8607e-1	2 4648e-1	9 9434c-2	4.9858e-2	2.4964e-2
4e-5 8.2270e+0 6.5225e+0 3.7493e+0 2.1540e+0 1.1588e+0 4.8492e-1 2.4619e-1 1.2404e-1 4.9846e-2 2.4961e-2 1.2490e-2 5e-5 7.6307e+0 5.7665e+0 3.1479e+0 1.7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9.9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937e-3			7.4854e+0	4.6334c+0	2.7564c+0	1 5124e+0	6.4093e-1	3.2681e-1	1.6502e-1	6 6403c-2	3.3267e-2	1.6650e-2
5e-5 7 6307e+0 5.7665e+0 3 1479e+0 1 7681e+0 9.3941e-1 3.9004e-1 1.9749e-1 9 9369e-2 3.9899e-2 1.9983e-2 9.9937e-3				3.7493e+0	2.1540e+0	1.1588c+0	4 8492e-1			4 9846c-2	2 4961e-2	
				3 1479e+0	1 7681c+0	9.3941e-1	3.9004e-1	1.9749c-1	9 9369e-2	3.9899c-2	1.9983e-2	9.9937c-3
	6e-5	7.1033e+0	5.1623e+0	2.7129e+0	1 4998e+0	7 8999e-1	3 2624e-1	1 6488c-1	8.2885c-2	3.3261e-2	1.6662e-2	8.3288e-3

							<u> </u>				
B	1.00e-3	5.00e-4	2.00e-4	1.00e-4	5.00e-5	2.00e-5	1.00e-5	5.00e-6	2.00e-6	1.00e-6	5.00e-7
		4.6704e+0	2.3838e+0			2.8039e-1	1.4152e-1	7.1092e-2	2.8517e-2	1.4288e-2	7.1395e-3
7e-5 8e-5	6.6367e+0 6.2230e+0	4.6704e+0 4.2630e+0	2.3838e+0 2.1260e+0	1.3023e+0 1.1509e+0	6.8165e-1 5.9948e-1	2.4584e-1	1.4132e-1	6.2238c-2	2.8317e-2 2.4958e-2	1.4200e-2 1.2507e-2	6.2474e-3
9e-5	5.8548e+0	3.9206e+0	1.9187e+0	1.0311e+0	5.3501c-1	2.1888e-1	1.1027e-1	5 5345e-2	2.2188e-2	1.1121e-2	5.5534e-3
10-4	5.5259e+0	3.6289e+0	1.7484e+0	9.3398e-1	4.8308e-1	1.9725e-1	9 9309c-2	4.9827c-2	1.9972c-2	1.0012e-2	4.9983e-3
2e-4	3,5228e+0	2.0818e+0	9.2752e-1	4.8138c-1	2.4528e-1	9.9238c-2	4.9809e-2	2.4952e-2	9.9976e-3	5.0168e-3	2.4995e-3
3e-4	2.5839e+0	1.4613e+0	6.3185e-1	3.2445e-1	1.6442e-1	6.6306e-2	3.3243e-2	1.6644e-2	6.6695e-3	3.3486e-3	1.6664e-3
4e-4	2.0413e+0	1.1265e+0	4.7932e-1	2.4475e-1	1.2368e-1	4.9787e-2	2.4947e-2	1.2487e-2	5.0045e-3	2.5137e-3	1.2499e-3
5e-4	1.6878e+0	9.1694e-1	3.8619e-1	1.9650e-1	9.9120e-2	3.9859e-2	1.9965e-2	9.9911e-3	4.0051e-3	2.0123e-3	9.9991e-4
6e-4	1 4392e+0	7.7330e-1	3.2340e-1	1.6416e-1	8.2702e-2	3.3232e-2	1.6641c-2	8.3270e-3	3.3386e-3	1.6779e-3	8.3327e-4
7e-4	1.2547e+0	6.6867e-1	2.7820e-1	1.4096c-1	7.0952e-2	2.8495e-2	1.4267e-2	7.1381e-3	2.8624e-3	1.4388e-3	7.1424e-4 6.2496e-4
8e-4	1.1123e+0 9.9909e-1	5.8905e-1 5.2642e-1	2.4409e-1 2.1745e-1	1.2351e-1 1.0991e-1	6.2126e-2 5.5253e-2	2.4940e-2 2.2174e-2	1.2485c-2 1.1099e-2	6.2462e-3 5.5525e-3	2.5051e-3 2.2272e-3	1.2595e-3 1.1199e-3	5.5553e-4
1e-3	9.9909e-1	4.7585e-1	1.9605e-1	9.9005e-2	4.9750e-2	1.9960e-2	9.9900e-3	4.9975e-3	2.0049e-3	1.0083e-3	4.9998e-4
2e-3	4.7247e-1	2.4297e-1	9.8860e-2	4.9714e-2	2.4928e-2	9.9885e-3	4.9971e-3	2.4993e-3	1.0036e-3	5.0520e-4	2.5001e-4
3e-3	3.1983e-1	1.6324e-1	6.6113e-2	3.3194e-2	1.6632e-2	6.6611e-3	3.3333e-3	1.6663e-3	6.6950e-4	3.3722e-4	1.6668e-4
4e-3	2.4185e-1	1.2294e-1	4.9667e-2	2.4917e-2	1.2479e-2	4.9967e-3	2.5000e-3	1.2498e-3	5.0236e-4	2.5313e-4	1.2502e-4
5e-3	1.9448e-1	9.8604e-2	3.9775e-2	1.9944e-2	9.9859e-3	3.9977e-3	2.0000e-3	9.9986e-4	4.0204e-4	2.0264e-4	1.0002e-4
6e-3	1.6265e-1	8.2319e-2	3.3170e-2	1.6626e-2	8.3231e-3	3.3317e-3	1.6667e-3	8.3323e-4	3.3513e-4	1.6896e-4	8.3350e-5
7e-3	1.3978e-1	7.0653e-2	2.8447e-2	1.4254e-2	7.1350e-3	2.8559e-3	1.4286e-3	7.1422e-4	2.8733e-4	1.4489e-4	7.1444e-5
8e-3	1.2256e-1	6.1885e-2	2.4901e-2	1.2475e-2	6.2438e-3	2.4990e-3	1.2500e-3	6.2496e-4	2.5147e-4	1.2683e-4	6.2515e-5
9e-3	1.0912e-1	5.5055e-2	2.2142e-2	1.1091e-2	5.5505e-3	2.2214e-3	1.1111e-3	5.5553e-4	2.2357e-4	1.1278e-4	5.5570e-5
0.01	9.8341e-2	4.9583e-2	1.9933e-2	9.9832e-3	4.9958c-3	1.9993e-3	1.0000e-3	4.9999e-4	2.0125e-4	1.0154e-4	5.0013e-5
0.02	4.9494e-2	2.4873e-2	9.9796e-3	4.9949e-3	2.4987e-3	9.9980e-4	5.0000e-4	2.5003e-4	1.0074e-4	5.0875e-5	2.5009e-5
0.03	3.3079e-2	1.6603e-2 1.2461e-2	6.6564e-3 4.9937e-3	3.3308e-3 2.4984e-3	1.6660e-3 1.2496e-3	6.6656e-4	3.3333e-4 2.5000e-4	1.6670e-4 1.2503e-4	6.7205e-5 5.0428e-5	3.3958e-5 2.5491e-5	1.6674e-5 1.2506e-5
0.04	2.4843e-2 1.9892e-2	9.9729e-3	3.9957e-3	1.9989e-3	9.9977e-4	4.9996e-4 3.9999e-4	2.0000e-4	1.0003e-4	4.0357e-5	2.0407e-5	1.0005e-5
0.06	1.6587e-2	8.3133e-3	3.3301e-3	1.6659e-3	8.3320e-4	3.3334e-4	1.6667e-4	8.3364e-5	3.3641e-5	1.7015e-5	8.3375e-6
0.07	1 4224e-2	7.1273e-3	2.8547e-3	1.4279e-3	7.1421e-4	2.8573e-4	1.4286e-4	7.1457e-5	2.8843e-5	1.4591e-5	7.1466e-6
0.08	1.2450e-2	6.2376e-3	2.4980e-3	1.2495e-3	6.2497e-4	2.5002e-4	1.2500e-4	6.2527e-5	2.5243e-5	1.2772e-5	6.2534e-6
0.09	1.1070e-2	5.5453e-3	2.2206e-3	1.1107e-3	5.5555e-4	2.2224e-4	1.1111e-4	5.5581e-5	2.2443e-5	1.1357e-5	5.5587e-6
0.1	9.9655e-3	4.9914e-3	1.9986e-3	9.9965e-4	5.0002e-4	2.0002e-4	1.0000e-4	5.0024e-5	2.0202e-5	1.0225e-5	5.0029e-6
0.2	4.9888e-3	2.4972e-3	9.9955e-4	4.9989e-4	2.5007e-4	1.0003e-4	5.0000e-5	2.5015e-5	1.0113e-5	5.1232e-6	2.5017e-6
0.3	3.3275e-3	1.6652e-3	6.6643e-4	3.3327e-4	1.6674e-4	6.6692e-5	3.3333e-5	1.6678e-5	6.7462e-6	3.4197e-6	1.6679e-6
0.4	2.4963e-3	1.2491e-3	4.9985e-4	2.4995e-4	1.2507e-4	5.0022e-5	2.5000e-5	1.2510e-5	5.0621e-6	2.5670e-6	1.2509e-6
0.5	1.9974e-3 1.6647e-3	9.9935e-4 8.3285e-4	3.9990e-4	1.9997e-4	1.0006e-4	4.0020e-5	2.0000e-5	1.0008e-5 8.3404e-6	4.0511e-6 3.3770e-6	2.0550e-6 1.7134e-6	1.0008e-6 8.3401e-7
0.6	1.4271e-3	7.1391e-4	3.3326e-4 2.8565e-4	1.6664e-4 1.4284e-4	8.3392e-5 7.1483e-5	3.3351e-5 2.8588e-5	1.6667e-5 1.4286e-5	7.1492e-6	2.8953e-6	1.4694e-6	7.1488e-7
0.8	1.4271e-3	6.2469e-4	2.4995e-4	1.2498e-4	6.2551e-5	2.5015e-5	1.4280e-5	6.2557e-6	2.5339e-6	1.2862e-6	6.2553e-7
0.9	1.1101e-3	5.5530e-4	2.2218e-4	1.1110e-4	5.5603e-5	2.2236e-5	1.1111e-5	5.5608e-6	2.2528e-6	1.1437e-6	5.5604e-7
1	9.9913e-4	4.9978e-4	1.9997e-4	9.9987e-5	5.0045e-5	2.0013e-5	1.0000e-5	5.0048e-6	2.0279e-6	1.0297e-6	5.0044e-7
2	4.9970e-4	2.4993e-4	1.0000e-4	4.9995e-5	2.5029e-5	1.0008e-5	5.0000e-6	2.5028e-6	1.0151e-6	5.1592e-7	2.5024e-7
3	3.3318e-4	1.6663e-4	6.6673e-5	3.3331e-5	1.6689e-5	6.6727e-6	3.3333e-6	1.6687e-6	6.7720e-7	3.4437e-7	1.6684e-7
4		1.2498e-4	5.0008e-5	2.4999e-5	1.2518e-5	5.0048e-6	2.5000e-6	1.2516e-6	5.0814e-7	2.5850e-7	1.2513e-7
5	1.9993e-4	9.9994e-5	4.0008e-5	1.9999e-5	1.0015e-5	4.0041e-6	2.0000e-6	1.0013e-6	4.0666e-7	2.0694e-7	1.0011e-7
6	1.6661e-4	8.3332e-5	3.3342e-5	1.6666e-5	8.3465e-6	3.3369e-6	1.6667e-6	8.3445e-7	3.3899e-7	1.7255e-7	8.3426e-8
7 8	1.4281e-4 1.2497e-4	7.1430e-5 6.2503e-5	2.8580e-5 2.5008e-5	1.4285e-5 1.2500e-5	7.1546e-6 6.2606e-6	2.8603e-6 2.5028e-6	1.4286e-6 1.2500e-6	7.1526e-7 6.2587e-7	2.9063e-7 2.5436e-7	1.4797e-7 1.2952e-7	7.1510e-8 6.2572e-8
8	1.1109e-4	5.5560e-5	2.2230e-5	1.2300e-3 1.1111e-5	5.5652e-6	2.2248e-6	1.2300e-6 1.1111e-6	5.5635e-7	2.3430e-7 2.2614e-7	1.1517e-7	5.5621e-8
10		5.0006e-5	2.0007e-5	1.0000e-5	5.0089e-6	2.0024e-6	1.0000e-6	5.0072e-7	2.0356e-7	1.0369e-7	5.0059e-8
20		2.5007e-5	1.0005e-5	5.0002e-6	2.5051e-6	1.0013e-6	5.0000e-7	2.5040e-7	1.0190e-7	5.1954e-8	2.5032e-8
30	3.3337e-5	1.6673e-5	6.6708e-6	3.3335e-6	1.6703e-6	6.6762e-7	3.3333e-7	1.6695e-7	6.7978e-8	3.4679e-8	1.6689e-8
40	2.5005e-5	1.2506e-5	5.0034e-6	2.5002e-6	1.2529e-6	5.0075e-7	2.5000e-7	1.2522e-7	5.1008e-8	2.6032e-8	1.2517e-8
50	2.0005e-5	1.0005e-5	4.0030e-6	2.0002e-6	1.0024e-6	4.0062e-7	2.0000e-7	1.0018e-7	4.0821e-8	2.0840e-8	1.0014e-8
60	1.6672e-5	8.3380e-6	3.3359e-6	1.6668e-6	8.3538e-7	3.3386e-7	1.6667e-7	8.3485e-8	3.4028e-8	1.7376e-8	8.3452e-9
70	1.4291e-5	7.1472e-6	2.8595e-6	1.4287e-6	7.1608e-7	2.8618e-7	1.4286e-7	7.1561e-8	2.9174e-8	1.4901e-8	7.1532e-9
80	1.2505e-5	6.2540e-6	2.5021e-6 2.2242e-6	1.2501e-6	6.2660e-7	2.5041e-7	1.2500e-7 1.1111e-7	6.2618e-8	2.5533e-8 2.2701e-8	1.3043e-8	6.2591e-9 5.5638e-9
		5.5593e-6 5.0035e-6	2.2242e-6 2.0018e-6	1.1113e-6 1.0001e-6	5.5700e-7 5.0132e-7	2.2260e-7 2.0034e-7	1.1111e-7 1.0000e-7	5.5662e-8 5.0097e-8	2.2/01e-8 2.0434e-8	1.1598e-8 1.0442e-8	5.0075e-9
200		2.5022e-6	1.0011e-6	5.0009e-7	2.5073e-7	1.0019e-7	5.0000e-8	2.5052e-8	1.0229e-8	5.2319e-9	2.5040e-9
300	3.3360e-6	1.6683e-6	6.6744e-7	3.3340e-7	1.6718e-7	6.6797e-8	3.3333e-8	1.6703e-8	6.8237e-9	3.4922e-9	1.6694e-9
400	2.5022e-6	1.2513e-6	5.0061e-7	2.5005e-7	1.2540e-7	5.0101e-8	2.5000e-8	1.2528e-8	5.1202e-9	2.6215e-9	1.2521e-9
500		1.0011e-6	4.0051e-7	2.0004e-7	1.0033e-7	4.0083e-8	2.0000e-8	1.0023e-8	4.0977e-9	2.0986e-9	1.0017e-9
600		8.3429e-7	3.3377e-7	1.6671e-7	8.3611e-8	3.3404e-8	1.6667e-8	8.3526e-9	3.4158e-9	1.7498e-9	8.3477e-10
700		7.1513e-7	2.8610e-7	1.4289e-7	7.1670e-8	2.8633e-8	1.4286e-8	7.1596e-9	2.9286e-9	1.5005e-9	7.1554e-10
800		6.2576e-7	2.5035e-7	1.2503e-7	6.2715e-8	2.5055e-8	1.2500e-8	6.2648e-9	2.5631e-9	1.3135e-9	6.2610e-10
900		5.5625e-7	2.2254e-7	1.1114e-7	5.5749e-8	2.2271e-8	1.1111e-8	5.5689e-9	2.2787e-9	1.1680e-9	5.5655e-10
1000	1.0011e-6	5.0064e-7	2.0029e-7	1.0003e-7	5.0176e-8	2.0045e-8	1.0000e-8	5.0121e-9	2.0512e-9	1.051 5e-9	5.0090e-10

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7. Жирный курсив – значения вычислены по линейной зависимости.

<u>Литература:</u> Papadopulos, Cooper, 1967.

приложение 7

Функция Boulton $F_B(u, \beta)$

Функция:
$$F_B(u,\beta) = \int_0^\infty \frac{1}{\tau} J_0(\beta \tau) [1 - \exp(-u\tau \tanh \tau)] d\tau$$
.

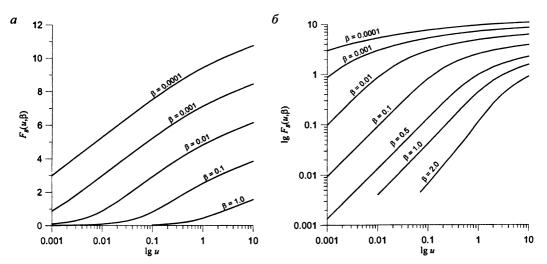


Рис. П7. Зависимость функции (a) и логарифма функции (b) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация:

мипроксимация.	
Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.05	$F_B(u,\beta) \approx \operatorname{arcsinh} \frac{1}{\beta} + \operatorname{arcsinh} \frac{u}{\beta} - \operatorname{arcsinh} \frac{1+u}{\beta}$
<i>u</i> < 0.01	$F_B(u,\beta) \approx \operatorname{arcsinh} \frac{u}{\beta} - \frac{u}{\sqrt{1+\beta^2}}$
$u < 0.01$; $u/\beta > 10$	$F_B(u,\beta) \approx \ln(2u/\beta)$
u > 5	$F_B(u,\beta) \approx 0.5W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right)$

Условные обозначения:

 $J_0(\beta)$ – функция Бесселя (Приложение 2);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

Значения функции $F_B(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0.001\div 10$, $\beta=0.0001\div 2.0$.

Значения функции $F_B(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.0001 \div 0.05$

	10⁴	2 10-4	5 10 ⁻⁴	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
0.001	2.997	2 312	1 443	0 880	0 480	0 327	0 231	0 198	0 165	0 142	0.131	0 110	0 099	0 049	0 033	0 024	0 019
0.002	3.688	2 997	2 093	1 441	0.880	0 624	0 464	0 389	0 326	0 281	0 217	0 219	0 197	0 098	0 065	0 029	0 039
0.003	4 092	3 400	2 490	1 816	1 192	0 879	0 675	0 567	0 479	0.414	0 371	0 325	0 294	0 147	0.098	0 053	0.058
0.004	4 379	3 687	2 774	2.091	1 441	1 096	0 863	0 730	0 622	0 541	0 485	0 428	0 387	0 196	0 130	0 097	0 077
0.005	4 602	3 909	2 995	2 308	1 644	1 280	1 029	0 878	0 755	0 661	0 558	0 527	0 478	0 244	0 162	0 121	0 096
0.006	4 783	4 090	3 176	2 487	1814	1 440	1 175	1 012	0 877	0 773	0 660	0 621	0 565	0 292	0 195	0 145	0 116
0.007	4 937	4 244	3 329	2 639	1 961	1 579	1 305	1 133	0 990	0 877	0 757	0.710	0 648	0 338	0 226	0 169	0 135
0.008	5 069	4 377	3 461	2 770	2 089	1 702	1 422	1 243	1 093	0 973	0 847	0 795	0 727	0 385	0 258	0 193	0 154
0.009	5 187	4 494	3 578	2 886	2 203	1 812	1 528	1 344	1 189	1 063	0 932	0 875	0 803	0 430	0 289	0 217	0 173
0.01	5 291	4 598	3 683	2 991	2 305	1 912	1 625	1 437	1 277	1 148	1 012	0 951	0 874	0 474	0 321	0 241	0 192
0.02	5 977	5 285	4 368	3 675	2 984	2 582	2 283	2 081	1 905	1 759	1 605	1 525	1 430	0 868	0 611	0 448	0 376
0.03	6 376	5 683	4 767	4 073	3 382	2 978	2 676	2 471	2 292	2 141	1 983	1 898	1 798	1 174	0 861	0 653	0 548
0.04	6 657	5 964	5 048	4 354	3 662	3 258	2 955	2 749	2 569	2 416	2 256	2 170	2 068	1 416	1 071	0 834	0 706
0.05	6 874	6 181	5 265	4 571	3 878	3 474	3 171	2 964	2 783	2 630	2 469	2 382	2 279	1 613	1 250	0 994	0 848
0.06	7 049	6 357	5 440	4 746	4 054	3 649	3 346	3 139	2 958	2 805	2 643	2 555	2 451	1 778	1 403	1 135	9 976
0.07	7 197	6 504	5 588	4 894	4 202	3 797	3 494	3 287	3 105	2 951	2 790	2 702	2 597	1 919	1 537	1 259	1 091
0.08	7 324	6 631	5 715	5 021	4 329	3 924	3 621	3 413	3 231	3 078	2 916	2 828	2 723	2 041	1 654	1 370	1 196
0.09	7 436	6 743	5 826	5 133	4 440	4 035	3 732	3 525	3 343	3 189	3 027	2 939	2 834	2 150	1 759	1 471	1 291
0.1	7 535	6 842	5 925	5 232	4 539	4 134	3 831	3 623	3 441	3 288	3 126	3 037	2 932	2 246	1 853	1 561	1 378
0.2	8 168	7 475	6 558	5 865	5 172	4 767	4 444	4 256	4 074	3 920	3 757	3 669	3 563	2 872	2 470	2 166	1 969
0,3	8 518	7 825	6 909	6 215	5 522	5 117	4 794	4 606	4 424	4 270	4 108	4 019	3 913	3 221	2 817	2 511	2 311
0.4	8 755	8 062	7 146	6 452	5 759	5 354	5 031	4 843	4 661	4 507	4 345	4 256	4 150	3 458	3 053	2 747	2 545
0.5	8 931	8 239	7 322	6 628	5 936	5 531	5 207	5 020	4 837	4 683	4 521	4 432	4 327	3 634	3 229	2 922	2 720
0.6	9 070	8 377	7 461	6 767	6 075	5 669	5 346	5 159	4 976	4 822	4 660	4 571	4 465	3 773	3 367	3 060	2 858
0.7	9 184	8 491	7 575	6 881	6 188	5 783	5 460	5 272	5 090	4 936	4 773	4 684	4 579	3 886	3 481	3 174	2 971
0.8	9 280	8 587	7 670	6 976	6 284	5 879	5 555	5 368	5 185	5 031	4 869	4 780	4 675	3 982	3 576	3 269	3 066
0.9	9 362	8 669	7 753	7 059	6 366	5 961	5 638	5 450	5 268	5 1 1 4	4 951	4 862	4 757	4 064	3 659	3 351	3 148
1	9 434	8 741	7 824	7 131	6 438	6 033	5 710	5 522	5 340	5 185	5 023	4 934	4 829	4 136	3 730	3 423	3 220
2	9 871	9 178	8 262	7 568	6 876	6 470	6 147	5 960	5 777	5 623	5 461	5 372	5 266	4 573	4 168	3 860	3 657
3	10 105	9 412	8 496	7 802	7 109	6 704	6 381	6 193	6 011	5 857	5 694	5 606	5 500	4 807	4 402	4 094	3 891
4	10 264	9 571	8 655	7 961	7 268	6 863	6 540	6 352	6 170	6 016	5 854	5 765	5 659	4 966	4 561	4 253	4 ()5()
5	10 385	9 692	8 776	8 082	7 389	6 984	6 661	6 473	6 291	6 136	5 974	5 885	5 780	5 087	4 681	4 374	4 170
6	10 482	9 789	8 873	8 179	7 486	7 081	6 758	6 570	6 388	6 234	6 071	5 982	5 877	5 184	4 778	4 471	4 268
7	10 563	9 870	8 954	8 260	7 567	7 162	6 839	6 651	6 469	6 315	6 153	6 064	5 958	5 265	4 860	4 552	4 349
- 8	10 633	9 940	9 024	8 330	7 637	7 232	6 909	6 721	6 539	6 385	6 222	6 133	6 028	5 335	4 929	4 622	4 419
9	10 694	10 001	9 085	8 391	7 699	7 293	6 970	6 783	6 600	6 446	6 284	6 195	6 089	5 396	4 991	4 683	4 480
10	10 749	10 056	9 140	8 446	7 753	7 348	7 025	6 837	6 655	6 501	6 338	6 249	6 144	5 451	5 045	4 738	4 535

Значения функции $F_B(u,oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.06 \div 2.0$

					1.			<i>,,</i>				<u> </u>					
	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.6	2.0
0.001	0 016	0 014	0 013	0 010	0 009	0 004	0.003	0 002	0 001		0 001						
0.002	0 032	0 027	0 024	0 021	0 019	0 009	0.005	0 004	0 003		0 002						
0.003	0 048	0 041	0 035	0 031	0 028	0 013	0 008	0 006	0 004	0 003	0 002						
0.004	0 064	0 054	0 047	0 042	0 037	0 017	0 011	0 007	0 005	0 004	0 003						
0.005	0.080	0 068	0 059	0 052	0 047	0 022	0 013	0 009	0 007	0 005	0 004						
0.006	0 096	0 082	0 071	0 062	0 056	0 026	0 016	0 011	0 008		0 005						
0.007	0 112	0 095	0 083	0 073	0 065	0 030	0 019	0 013	0 009	0 007	0 005						
0.008	0 127	0 109	0 094	0 083	0 074	0 035	0 021	0.015	0.011	0 008	0 006						
0.009	0 143	0 122	0 106	0 094	0 084	0 039	0 024	0 016	0 012	0 009	0 007						
0.01	0 159	0 136	0 118	0 104	0 093	0 043	0 027	0.018	0 0 1 3	0 010	0.008		0 005	0 004	0 003		
0.02	0 314	0 268	0 214	0 207	0 185	0 086	0 053	0 036	0 027	0 020	0 016	0 014	0 010	0 008	0 005		
0.03	0 461	0 396	0 346	0 307	0 275	0 129	0.080	0 055	0 040	0 031	0 024		0 015	0 012	0 008		
0.04	0 598	0 517	0 454	0 404	0 363	0 172	0 106	0 073	0 054	0 041	0 032	0 027	0 020	0 016	0.011		
0.05	0 725	0 631	0 556	0 497	0 447	0 214	0 133	0 092	0 067	0 051	0 040	0 033	0 025	0 021	0 014		
0.06	0 841	0 736	0 653	0 585	0 529	0 256	0 159	0 110	0 081	0 062	0 048		0 031	0 025	0 017		
0.07	0.948	0 835	0 743	0 668	0 606	0 297	0 185	0 128	0 094	0 072	0 056		0 036	0 029	0.019		0 005
0.08	1 045	0 926	0 828	0 747	0 679	0 337	0 211	0 147	0 108	0 082	0 064	0 053	0 041	0 033	0 022		0 005
0.09	1 135	1 010	0 907	0 822	0 749	0 377	0 237	0 165	0 121	0 093	0 072	0 059	0 046	0 038			0 006
0.1	1 218	1 089	0 982	0 892	0 815	0 416	0 262	0 183	0 135	0 103	0 081	0 066	0 052	0 042			0 007
0.2	1 793	1 646	1 501	1 413	1 318	0 756	0 500	0 358	0 268	0 207	0 163	0 096	0 106	0 087			
0,3	2 131	1 981	1 831	1 738	1 638	1 014	0 702	0 515	0 393	0 308	0 245	0 170	0 162	0 134	0 093		
0.4	2 364	2 212	2 061	1 966	1 863	1 213	0 869	0 654	0 507	0 402	0 324	0 236	0 218	0 181	0 127		
0.5	2 539	2 386	2 234	2 138	2 034	1 370	1 008	0 774	0 610	0 490	0 399	0 300	0 273	0 228	0 162		0 046
0.6	2 676	2 523	2 371	2 274	2 170	1.498	1 124	0 878	0 701	0 570	0 469	0 361	0 326	0 275	0 197		0 058
0.7	2 789	2 636	2 483	2 386	2 282	1 604	1 224	0 968	0 783	0 643	0 534	0 418	0 377	0 319	0 232		0 071
0.8	2 884	2 731	2 578	2 481	2 376	1 696	1 310	1 048	0 857	0 710	0 594	0 472	0 425	0 363	0 249		0 085
0.9	2 966	2 813	2 660	2 562	2 458	1 775	1 385	1 1 1 9	0 923	0 771	0 650	0 523	0 471	0 404	0 282		0 099
1	3 038	2 884	2 731	2 634	2 529	1 844	1 452	1 163	0 982	0 826	0 701	0 570	0 514	0 443	0 315	0 161	0 114
2	3 475	3 321	3 168	3 070	2 965	2 274	1 874	1 592	1 377	1 205	1 062	0 913	0 838	0 748	0 583	0 363	0 260
3	3 709	3 555	3 401	3 303	3 198	2 507	2 104	1 820	1 601	1 425	1 278	1 123	1 043	0 947	0 768	0 521	0 390
4	3 868	3 714	3 560	3 462	3 357	2 665	2 261	1 976	1 757	1 578	1 429	1 272	1 189	1 091	0 906	0 645	0 499
5	3 988	3 834	3 681	3 583	3 478	2 785	2 381	2 096	1 875	1 696	1 545	1.387	1 303	1 203	1 015	0 745	0 590
6	4 085	3 931	3 778	3 680	3 575	2 882	2 478	2 192	1 971	1 791	1 640	1.481	1 396	1 295	1 104	0 830	0 668
7	4 167	4 012	3 859	3 761	3 656	2 963	2 559	2 253	2 051	1 871	1 719	1 560	1 474	1 373	1 181	0 902	0 736
8	4 236	4 082	3 929	3 831	3 726	3 033	2 628	2 322	2 120	1 940	1 788	1 628	1 542	1 440	1 247	0 965	0 796
9	4 298	4 144	3 990	3 892	3 787	3 094	2 690	2 383	2 181	2 000	1 848	1 688	1 602	1 499	1 305	1 022	0 849
10	4 352	4.198	4 045	3 947	3.842	3 149	2 744	2 437	2.235	2 055	1 902	1 742	1 655	1 552	1.357	1.072	0 898

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

<u>Литература:</u> Boulton, 1954a; Hantush, 1964c.

Функция $F_f(u, oldsymbol{eta})$

Функция

- для линии вдоль трещины: $F_f(u,\beta) = F_x(u,\beta) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^u \left[\operatorname{erf} \frac{1-\beta}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1+\beta}{2\sqrt{\tau}} \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}};$
- для линии, перпендикулярной к трещине: $F_f(u,\beta) = F_y(u,\beta) = \sqrt{\pi} \int_0^u \left[\operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4\tau}\right) \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}$;
- для линии, расположенной под углом 45° к трещине: $F_f(u,\beta) = F_{xy}(u,\beta) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^u \left[\exp\left(-\frac{\beta^2}{4\tau}\right) \left(\operatorname{erf} \frac{1-\beta/\sqrt{2}}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{1-\beta/\sqrt{2}}{2\sqrt{\tau}} \right) \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}$,

где erf β – интеграл вероятностей (Приложение 4).

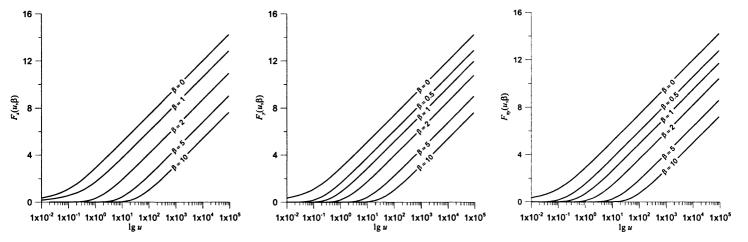


Рис. П8. Зависимость функций от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функций $F_x(u,\beta)$, $F_y(u,\beta)$ и $F_{xy}(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u = 0.01 \div 90000$; $\beta = 0.0 \div 10.0$.

Значения функции $F_x(u, oldsymbol{eta})$

	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
	3 5449e-1	3 5449a.1	3.5449e-1	3.5449e-1	3 5440e-1	1.7725e-1	3 2775e-2	5.9422e-3	4 5150a.6										
	5.0133e-1			5 0132e-1					3.2880e-4	8.0000e-9	3.0000e-9								
	6 1399e-1		6 1399e-1		6 1224c-1				1.7570e-3										
0.0			7.0894c-1		7.0445e-1		1.4369e-1			9.0240e-6									
0.0	7.9257e-1		7.9250e-1	7.9219e-1			1.7458e-1		8.5177e-3	4.6274e-5	3.2000e-8								
0.0			8 6787e-1		8 5484e-1		2.0343e-1		1.3485e-2		2.9100e-7	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							
0.0	9.3722e-1	9.3715e-1	9.3692e-1	9.3586e-1	9.1866e-1	4.6895e-1	2.3061e-1	1.2742e-1	1.9231e-2	3.3881e-4	1.4590e-6								
0.0	1.0013e+0	1.0012e+0	1 0009e+0	9.9929e-1	9.7705e-1	5.0133e-1	2.5638e-1	1.4701e-1	2.5591e-2	6.5760e-4	5.0410e-6								
0.0	1 0612e+0	1.0611e+0	1.0606e+0	1.0584c+0	1.0310e+0	5.3174e-1	2.8096e-1	1.6609e-1	3.2434e-2	1.1231e-3	1.3535e-5								
0.	1.1175e+0	1.1173e+0	1.1167e+0	1 1139e+0	1 0813e+0	5 6050e-1	3.0450e-1	1.8468e-1	3.9658e-2	1.7497e-3	3.0358e-5	1.8450e-7	5 7000e-9			1 1000e-8			
0.:	1.5513e+0	1 5505c+0	1.5484e+0	1.5394e+0	1.4624e+0	7.9257e-1	5.0217e-1	3.4913e-1	1 2130e-1	1.7035e-2	1.5954e-3	9.2544e-5	6 8100e-8			9.5000e-9			
0.	1 8523e+0	1.8512e+0	1 8479e+0	1 8345c+0	1.7279e+0	9.6985e-1	6.5955e-1	4.8692e-1	2 0604e-1	4 4682e-2	7.6081e-3	9.6210e-4	5.6302e-6			1.1000e-8			
0.	2 0834e+0	2.0820e+0	2.0780e+0	2 0616c+0	1.9350e+0	1.1175c+0	7 9356e-1	6 0732e-1	2.8798e-1	7.9255e-2	1.8501e-2	3 4990e-3	6.0717e-5	3.6300e-7		1.1000e-8			
0.	2 2710e+0	2.2695e+0	2.2649e+0	2 2464e+0	2.1056e+0	1.2452c+0	9.1118c-1	7.1478e-1	3 6589e-1	1.1753e-1	3.3472e-2	8.1216e-3	2.7357e-4	4.0520e-6	2.0000e-8	1.2000e-8			
0.	2 4290e+0	2.4274c+0	2.4224e+0	2.4023c+0	2.2509e+0	1 3581e+0	1.0163e+0	8.1199c-1	4.3956e-1	1.5765e-1	5.1580e-2	1.4853e-2	7 8445e-4	2.1247e-5	2.7700e-7	4.0000e-9			
0.	7 2.5654e+0	2.5637e+0	2.5584e+0	2.5371e+0	2.3776e+0	1.4593e+0	1.1114e+0	9.0076e-1	5.0911e-1	1.9851e-1	7.2017e-2	2.3522e-2	1.7226e-3	7.2027e-5	1.6420e-6	2.3000e-8			
0.	2.6855c+0	2 6836e+0	2 6781c+0	2.6559e+0	2.4899e+0	1.5513e+0	1.1983e+0	9.8245e-1	5.7481e-1	2.3941e-1	9.4142e-2	3.3886e-2	3.1844e-3	1.8496e-4	6 3730e-6	1.3500e-7			
0.9	2.7926e+0	2.7907e+0	2 7850e+0	2.7620e+0	2.5908e+0	1 6354e+0	1.2783e+0	1.0581e+0	6.3693e-1	2.7994e-1	1.1745e-1	4.5688e-2	5 2303e-3	3.9322e-4	1.8712e-5	5 5500e-7			
	2.8894c+0										1.4157e-1		7.8888e-3		4.5064e-5	1.8160e-6	3.9000e-8	3.0000e-9	
	3 5431e+0												6.3730e-2		3.2139e-3		7.3415e-5		1.6000e-9
	3 9351e+0													5 2480e-2			1 0964e-3		1.3300e-8
	4 2160e+0								 				2.4287e-1		4.0280e-2	1.4403e-2		1.3745e-3	
	4 4351e+0		+										3.3538e-1	1.6001e-1				4.2349e-3	1.4071e-3
	4 6146e+0												4.2379e-1	2.1938e-1	1 0840e-1		2.2372e-2		3.5885e-3
***************************************	7 4 7668e+0												5.0717e-1	2 7883e-1			3.6130e-2		7.1629e-3
	4 8989c+0													3.3718e-1				2.5926e-2	
	5 0155e+0	+														1.2986e-1		3.7177e-2	
	5 1200e+0													4.4848e-1		1.5923e-1		5.0012e-2	2.6577e-2
	5 8090e+0															4.5138e-1	3.1671e-1		1.4977e-1
	6 2131e+0															6.9687e-1	5.2761e-1		2.9643e-1
	0 6 5000e+0		+														7.0869e-1		4.3628e-1
	6.7228e+0													_					5.6383e-1
	0 6 9048e+0																	_	6.7928e-1
	7 0588e+0	+	+																7.8404e-1
	7.3098e+0																		
	7.4151e+0	+																	
	8 1078e+0	+																	
	10 10/60+0	10336+0	10 07/8010	10.00/00+0	1 84030+0	10 /2280+0	0 32100+0	10.03316+0	124/336+0	1- 01/06+0	14 33916+0	13.90016+0	3 7036+0	2.93346+0	2.3/81C+U	2 283 10+0	2 0323640	1.8102640	1.02/1670

, B	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
300	8 5131e+0	8.5106e+0	8.5031e+0	8 4729e+0	8.2517e+0	7 1277e+0	6 7258c+0	6 4578c+0	5 8777e+0	5 2206e+0	4 7419c+0	4 3617c+0	3 7751c+0	3 3285e+0	2 9687e+0	2 6686e+0	2 4121c+0	2 1892e+0	1 9929e+0
400	8 8008e+0	8 7983c+0	8.7907e+0	8.7605e+0	8 5393e+0	7 4151e+0	7 0132e+0	6 7452e+0	6 1649e+0	5.5074e+0	5.0282e+0	4 6475c+0	4 0594e+0	3 6109e+0	3 2489c+0	2 9462e+0	2 6867e+0	2 4604e+0	2 2604e+0
500	9 0239 c+ 0	9 0214e+0	9 0138e+0	8.9836e+0	8.7624e+0	7 6381e+0	7.2361e+0	6 9681e+0	6 3877e+0	5.7300c+0	5 2505e+0	4 8695c+0	4 2805e+0	3 8309e+0	3 4676e+0	3 1632e+0	2 9019c+0	2 6736c+0	2 4714e+0
600	9.2061e+0	9.2036e+0	9.1961e+0	9.1659e+0	8 9446c+0	7 8203e+0	7.4183e+0	7.1503e+0	6 5698e+0	5 9120c+0	5 4323c+0	5 0510c+0	4 4614c+0	4 0112e+0	3 6469c+0	3 3415e+0	3 0790c+0	2 8493e+0	2 6455e+0
700	9.3603e+0	9.3578e+0	9 3503e+0	9.3200e+0	9 0987e+0	7 9743e+0	7 5724e+0	7 3043e+0	6 7238e+0	6 0659c+0	5.5860e+0	5 2046e+0	4 6146e+0	4 1638e+0	3 7989e+0	3 4927c+0	3 2294c+0	2 9987e+0	2 7938c+0
800	9.4938c+0	9.4913c+0	9 4838c+0	9 4535e+0	9 2322e+0	8 1078e+0	7 7058e+0	7 4378e+0	6 8572c+0	6 1992c+0	5 7193c+0	5.3377c+0	4 7474c+0	4 2962e+0	3 9308e+0	3 6241e+0	3 3600e+0	3 1286e+0	2 9230e+0
900	9 6116c+0	9 6091e+0	9 6016c+0	9.5713e+0	9 3500e+0	8 2255e+0	7 8236e+0	7 5555e+0	6 9749c+0	6 3168c+0	5 8368c+0	5 4552c+0	4 8647e+0	4 4131c+0	4 0474c+0	3 7402e+0	3 4756c+0	3 2436e+0	3 0373e+0
1000	9.7169e+0	9.7144c+0	9.7069e+0	9 6767e+0	9.4554c+0	8 3309e+0	7 9289c+0	7 6608e+0	7 0802c+0	6 4221e+0	5 9420e+0	5.5603e+0	4 9696c+0	4 5178e+0	4 1517c+0	3 8442c+0	3 5792c+0	3 3467c+0	3 1399c+0
2000	1.0410e+1	1.0408c+1	1 0400c+1	1 0370e+1	1.0148e+1	9 0239e+0	8 6218e+0	8 3537e+0	7 7730e+0	7 1147c+0	6 6343e+0	6 2523c+0	5 6607e+0	5 2078e+0	4 8403e+0	4 5312e+0	4 2644e+0	4 0298e+0	3 8207c+0
3000	1.0815e+1	1.0813e+1	1.0805e+1	1 0775e+1	1 0554e+1	9 4293e+0	9 0272e+0	8 7591e+0	8 1784e+0	7 5200c+0	7 0395e+0	6 6573c+0	6 0655e+0	5 6122c+0	5.2443c+0	4 9346c+0	4 6671e+0	4 4319e+0	4 2220e+0
4000	1.1103e+1	1 1101e+1	1.1093e+1	1.1063e+1	1 0842e+1	9 7169 c+ 0	9 3149c+0	9 0467c+0	8 4660e+0	7 8076c+0	7 3271e+0	6.9448c+0	6 3528c+0	5.8993c+0	5 5312e+0	5.2212e+0	4 9535c+0	4 7179e+0	4.5076e+0
5000	1.1326e+1	1.1324e+1	1.1316e+1	1 1286e+1	1 1065e+1	9 9400e+0	9 5380c+0	9.2699e+0	8 6891c+0	8 0307c+0	7 5501c+0	7.1679e+0	6 5757c+0	6 1222e+0	5 7539c+0	5 4438e+0	5 1758e+0	4 9400c+0	4 7295e+0
6000	1.1509e+1	1.1506e+1	1 1499e+1	1 1468e+1	1.1247e+1	1 0122e+1	9 7203c+0	9 4522e+0	8 8714c+0	8 2129c+0	7.7324e+0	7 3501c+0	6 7579c+0	6 3043e+0	5 9359e+0	5 6257c+0	5 3576e+0	5.1217e+0	4 9109c+0
7000	1.1663e+1	1.1660e+1	1.1653e+1	1 1622e+1	1 1401c+1	1 0276e+1	9 8745e+0	9.6063e+0	9.0255e+0	8 3671e+0	7 8865c+0	7 5042c+0	6 9120c+0	6 4583c+0	6 0899c+0	5 7795e+0	5 5114e+0	5 2753e+0	5 0645e+0
8000	1.1796e+1	1.1794c+1	1.1786e+1	1 1756e+1	1 1535e+1	1 0410e+1	1 0008e+1	9 7398e+0	9 1591e+0	8 5006e+0	8 0200c+0	7 6377e+0	7 0454c+0	6 5917e+0	6 2232e+0	5 9128e+0	5.6446c+0	5 4085e+0	5.1976c+0
9000	1.1914e+1	1 1912e+1	1 1904e+1	1.1874c+1	1 1652e+1	1 0528e+1	1 0126e+1	9.8576e+0	9 2768c+0	8 6183e+0	8 1378c+0	7 7554c+0	7 1632e+0	6 7094c+0	6 3409c+0	6 0305c+0	5 7622e+0	5 5260c+0	5.3150e+0
10000	1.2019e+1	1.2017e+1	1.2009e+1	1.1979e+1	1.1758e+1	1 0633e+1	1 0231c+1	9 9630e+0	9 3822e+0	8 7237c+0	8 2431c+0	7 8608c+0	7 2685c+0	6 8147c+0	6 4461e+0	6 1357e+0	5 8674c+0	5 6311e+0	5 4201c+0
20000	1.2713e+1	1.2710e+1	1 2703e+1	1.2672e+1	1 2451e+1	1 1326e+1	1 0924e+1	1 0656e+1	1 0075e+1	9.4168e+0	8 9362e+0	8 5538c+0	7 9614e+0	7 5075e+0	7 1388c+0	6 8282e+0	6 5597e+0	6 3233c+0	6 1120c+0
30000	1.3118e+1	1 3116e+1	1 3108e+1	1 3078e+1	1.2856e+1	1 1732e+1	1 1330e+1	1 1062e+1	1 0481e+1	9 8222e+0	9 3416c+0	8 9592c+0	8 3668e+0	7.9129c+0	7 5442c+0	7 2335c+0	6.9649c+0	6 7284e+0	6 5170e+0
40000	1 3406e+1	1 3403e+1	1.3396e+1	1.3365e+1	1 3144e+1	1 2019e+1	1 1617e+1	1 1349e+1	1 0768e+1	1 0110c+1	9 6293e+0	9 2469c+0	8 6545e+0	8 2005e+0	7 8318e+0	7 5210e+0	7 2525e+0	7 0159c+0	6 8045e+0
50000	1.3629e+1	1.3626e+1	1 3619e+1	1.3589e+1	1.3367e+1	1 2243e+1	1 1841e+1	1 1572e+1	1 0992e+1	1 0333e+1	9 8524c+0	9 4700c+0	8 8776e+0	8 4236e+0	8 0549c+0	7 7441e+0	7 4755e+0	7 2389c+0	7 0275e+0
60000	1.3811e+1	1 3809e+1	1.3801e+1	1.3771e+1	1 3550e+1	1 2425e+1	1 2023e+1	1 1755e+1	1 1174e+1	1 0515c+1	1 0035e+1	9 6523e+0	9 0599c+0	8 6059e+0	8 2371c+0	7 9264c+0	7 6578e+0	7 4212e+0	7 2098e+0
		1 3963e+1																	
80000	1 4099e+1	1 4096e+1	1.4089e+1	1.4059e+1	1 3837e+1	1 2713c+1	1 2311c+1	1 2042e+1	1 1462e+1	1 0803c+1	1 0322e+1	9 9400c+0	9 3476e+0	8 8936c+0	8 5248e+0	8 2140e+0	7 9454e+0	7 7088e+0	7 4973c+0
90000	1.4217e+1	1 4214e+1	1.4207e+1	1.4176e+1	1 3955e+1	1 2830c+1	1 2428c+1	1 2160e+1	1 1579c+1	1 0921e+1	1 0440c+1	1 0058e+1	9 4653e+0	9 01 13e+0	8 6426c+0	8 3318e+0	8 0632e+0	7 8266e+0	7 6151c+0

Значения функции $F_y(u,oldsymbol{eta})$

, ,	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
0.01	3.5449e-1	2.1934e-1	1 2544c-1	3 1576e-2	4 5089e-5														
0.02	5.0133e-1	3.5983e-1	2 4856e-1	1.0470e-1	2 5185e-3	6 7182e-8	4 0904e-9												
0.03	6.1399e-1	4.6966e-1	3.5030e-1	1.7969e-1	1 1692e-2	7 6055e-6	1 1179e-6	1 4075e-7											
0.04	7 0896e-1	5 6293e-1	4.3866e-1	2.5086e-1	2 7499e-2	9 0159c-5	2 0640c-5	4 2150c-6	1 7888c-8										
0.05	7.9257e-1	6.4538e-1	5.1773e-1	3.1773e-1	4 8251e-2	4 2273e-4	1 2643c-4	3 4558e-5	4 0721e-7										
0.06	8.6803e-1	7.1999e-1	5.8982e-1	3 8060e-1	7.2400e-2	1 2313e-3	4 4057e-4	1.4639e-4	3 4146c-6	1 3822e-9									
0.07	9 3722e-1	7 885 le-1	6.5638e-1	4.3989e-1	9.8798e-2	2 7137e-3	1 1044c-3	4 2215e-4	1 6061e-5	1 8552e-8									
0.08	1.0013e+0	8 5209e-1	7 1840e-1	4 9599e-1	1 2663e-1	5 0026e-3	2 2435e-3	9 5307e-4	5 2395e-5	1 3303e-7									
0.09	1 0612e+0	9.1154e-1	7.7655e-1	5 4922e-1	1 5531e-1	8 1641e-3	3 9503e-3	1 8224e-3	1 3351e-4	6 2611e-7									
0.1	1 1175e+0	9.6745e-1	8 3136e-1	5 9986e-1	1 8443e-1	1 2211e-2	6 2808e-3	3 0960e-3	2 8561e-4	2 1897e-6	5 2674e-9								
0.2	1.5513e+0	1 3993e+0	1.2575e+0	1 0039e+0	4 6367e-1	9 0111e-2	6 1374e-2	4 0987e-2	1 0811e-2	7 6923c-4	3 1565e-5	7 3280e-7							
0.3	1.8523e+0	1 6995e+0	1 5554e+0	1 2928e+0	6 9678e-1	1 9899e-1	1 4947e-1	1 1090e-1	4 1954e-2	6 3563e-3	6 7755e-4	5 0042e-5	8 7166e-8						
0.4	2 0834e+0	1 9302e+0	1 7849e+0	1 5173e+0	8 8969e-1	3 1132e-1	2 4606e-1	1 9278e-1	8.7777e-2	1 9534c-2	3 3726e-3	4 4591c-4	3 3779e-6	8 0724c-9					
0.5	2 2710e+0	2 1176e+0	1.9715e+0	1.7008e+0	1 0528e+0	4 1861e-1	3 4147e-1	2 7669c-1	1 4121e-1	3 9735e-2	9 1905e-3	1 7274c-3	3 1713e-5	2 3482c-7					

<i>B</i>	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
0.6	2.4290e+0	2.2754e+0	2.1287e+0	1.8560e+0	1.1938e+0	5.1867e-1	4 3240e-1	3.5856e-1	1.9780e-1	6.5256e-2	1.8380e-2	4.3747e-3	1.4525e-4	2.2893e-6	1.6695e-8				
0.7	2.5654e+0	2.4117e+0	2.2646e+0	1.9903e+0	1.3176e+0	6.1141e-1	5.1792e-1	4.3683c-1	2.5507e-1	9.4447c-2	3.0668e-2	8.6512e-3	4.3935e-4	1.1891e-5	1.6744e-7	1.2078e-9			
0.8	2.6855e+0	2.5316e+0	2.3842e+0	2.1087e+0	1.4281e+0	6.9735e-1	5.9803e-1	5.1101e-1	3.1168e-1	1.2601e-1	4.5575e-2	1.4617e-2	1.0224e-3	4.1550e-5	9.5897e-7	1.2385e-8			
0.9	2.7926e+0	2.6387e+0	2.4911e+0	2.2146e+0	1.5276e+0	7.7716e-1	6.7306e-1	5.8112e-1	3.6690e-1	1.5900e-1	6.2589e-2	2.2197e-2	1.9937e-3	1.1124e-4	3.7725e-6	7.6666e-8			
1	2.8894e+0	2.7354e+0	2.5876e+0	2.3104e+0	1.6182e+0	8.5152e-1	7.4342e-1	6.4734e-1	4.2039e-1	1.9273e-1	8.1244e-2	3.1245e-2	3.4310e-3	2.4683e-4	1.1394e-5	3.3289e-7	6.0983e-9		
2	3.5431e+0	3.3889e+0	3.2402e+0	2.9594c+0	2.2432e+0	1.3979e+0	1.2697e+0	1.1525e+0	8.5789e-1	5.1428e-1	2.9885e-1	1.6738e-1	4.6232e-2	1.0579e-2	1.9751e-3	2.9777e-4	3.5990e-5	3.4684e-6	
3	3.9351e+0	3.7808c+0	3.6318e+0	3.3498e+0	2.6253e+0	1.7517e+0	1.6160e+0	1.4907e+0	1.1691e+0	7.7450e-1	5.0572e-1	3.2381e-1	1.2340e-1	4.1998e-2	1.2602e-2	3.3058e-3	7.5341e-4	1.4850e-4	
4	4.2160e+0	4.0616e+0	3.9125e+0	3.6299e+0	2.9011e+0	2.0130e+0	1.8733c+0	1.7438e+0	1.4078e+0	9.8482e-1	6.8450e-1	4.7041c-1	2.1200e-1	8.8477e-2	3.3812e-2	1.1743e-2	3.6862e-3	1.0417e-3	
5	4.4351e+0	4.2806e+0	4.1314e+0	3.8485e+0	3.1171e+0	2.2201e+0	2.0780c+0	1.9458e+0	1.6009e+0	1.1599e+0	8.3888e-1	6.0280e-1	3.0154e-1	1.4269e-1	6.3218e-2	2.6041e-2	9.9248e-3	3.4870e-3	1.1262e-3
6	4.6146e+0	4.4602e+0	4.3109e+0	4.0277e+0	3.2947e+0	2.3917e+0	2.2479e+0	2.1140e+0	1.7629e+0	1.3095e+0	9.7386e-1	7.2184e-1	3.8804e-1	2.0008e-1	9.7996e-2	4.5300e-2	1.9675e-2	8.0018e-3	3.0394e-3
	4.7668e+0	4.6123e+0	4.4630e+0	4.1797c+0	3.4454e+0	2.5381e+0	2.3931c+0	2.2579e+0	1.9025e+0	1.4399e+0	1.0934c+0	8.2937c-1	4.7012e-1	2.5810e-1	1.3597e-1	6.8326e-2	3.2610e-2	1.4735e-2	6.2888e-3
8	4.8989e+0	4.7444c+0	4 5950e+0	4.3116e+0	3.5764e+0	2.6658e+0	2.5200e+0	2.3838e+0	2.0250e+0	1.5554e+0	1.2006e+0	9.2712e-1	5.4748e-1	3.1538e-1	1.7565e-1	9.4041e-2	4.8205e-2	2.3588e-2	1.0992e-2
9	5.0155e+0	4.8610c+0	4.7116e+0	4.4280e+0	3.6921e+0	2.7790e+0	2.6325e+0	2.4956e+0	2.1341e+0	1.6591e+0	1.2976e+0	1.0166e+0	6.2027e-1	3.7121e-1	2.1603e-1	1.2158e-1	6.5921e-2	3.4333e-2	1.7140e-2
10	5.1200e+0	4.9654c+0	4.8160e+0	4.5324e+0	3.7959e+0	2.8808e+0	2.7337e+0	2.5961e+0	2.2325e+0	1.7531e+0	1.3862e+0	1.0990e+0	6.8877e-1	4.2525e-1	2.5648e-1	1.5030e-1	8.5269e-2	4.6703e-2	2.4644e-2
20	5.8090e+0	5.6544e+0	5.5049e+0	5.2209e+0	4.4818e+0	3.5575e+0	3.4078e+0	3.2675e+0	2.8942e+0	2.3942e+0	2.0019e+0	1.6851e+0	1.2060e+0	8.6602e-1	6.1950e-1	4.3948c-1	3.0828e-1	2.1336e-1	1.4546e-1
			5.9090e+0									2.0535e+0			8.9889c-1	6.8413e-1	5.1823e-1	3.8998e-1	2.9111e-1
			6.1959e+0														6.9891c-1	5.4980e-1	4.3048e-1
			6.4186e+0															6.9134e-1	5.5776e-1
			6.6007e+0															8.1708e-1	6.7305e-1
			6.7546e+0																
			6.8880e+0														1.2184e+0		
			7.0057e+0																
			7.1109e+0																
			7.8036e+0																
			8.2090e+0																
			8.4966e+0																
			8.7197e+0																
			8.9020e+0																
			9.0561e+0									_							
			9.1896e+0																
			9.3074e+0																
			9.4127e+0																
			1.0106e+1 1.0511e+1																
									8.1606e+0								4.9431e+0		
	1.1103e+1 1.1326e+1		1.0799e+1														5.1654e+0		
6000																	5.3472e+0		
			1.1204e+1														5.5010e+0		
	1.1663e+1 1.1796e+1																5.6342e+0		
9000	1.1790e+1 1.1914e+1																5.7518e+0		
10000			1.1610e+1 1 1715e+1	1.1325e+1													5.8570e+0		
20000	1.2019e+1			1.1431e+1		1.0449e+1											6.5493e+0		
																	6.9545e+0		
30000 40000	1.3118e+1		1.2814e+1 1.3102e+1		1.1788e+1														
40000	1.34000+1	1.32316+1	1.31026+1	1.201/6+1	1.20/36+1	1.1142671	1.0770€*1	1.0040671	1.0403671	J. J41/6TU	J.J222610	7.1727670	0.0120ETU	0.1/30670	7.0132670	1.5074610	17.2420010	7.3077610	0.77760.0

	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
50000	1.3629e+1	1.3474e+1	1.3325e+1	1.3040e+1	1.2299e+1	1.1365e+1	1.1213e+1	1.1069e+1	1.0686e+1	1.0165e+1	9.7454e+0	9.3958e+0	8.8359e+0	8.3969e+0	8.0363e+0	7.7305e+0	7.4651e+0	7.2307e+0	7.0209e+0
60000	1.3811e+1	1.3657e+1	1.3507e+1	1.3223e+1	1.2481e+1	1.1547e+1	1.1395e+1	1.1252e+1	1.0869e+1	1.0347e+1	9.9277e+0	9.5781e+0	9.0182e+0	8.5792e+0	8.2186e+0	7.9128e+0	7.6474e+0	7.4130e+0	7.2031e+0
70000	1.3965e+1	1.3811e+1	1.3661e+1	1.3377e+1	1.2635e+1	1.1701e+1	1.1549e+1	1.1406e+1	1.1023e+1	1.0501e+1	1.0082e+1	9.7323e+0	9.1723e+0	8.7334e+0	8.3728e+0	8.0669e+0	7.8015e+0	7.5671e+0	7.3572e+0
80000	1.4099e+1	1.3944e+1	1.3795e+1	1.3510e+1	1.2769e+1	1.1835e+1	1.1683e+1	1.1539e+1	1.1156e+1	1.0635e+1	1.0215e+1	9.8658e+0	9.3059e+0	8.8669e+0	8.5063e+0	8.2004e+0	7.9350e+0	7.7006c+0	7.4907e+0
90000	1.4217e+1	1.4062e+1	1.3912e+1	1.3628e+1	1.2886e+1	1.1953e+1	1.1800e+1	1.1657e+1	1.1274c+1	1.0753e+1	1.0333e+1	9.9836e+0	9.4236e+0	8.9847e+0	8.6240e+0	8.3182e+0	8.0528e+0	7.8183e+0	7.6084e+0

Значения функции $F_{xy}(u,oldsymbol{eta})$

B	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
0.01	3.5449e-1	2.1934e-1	1.2544e-1	3.1576e-2	4.5089e-5														
0.02	5.0133e-1	3.5983e-1	2.4856e-1	1.0470e-1	2.5178e-3	6.2813e-8	3.5729e-9												
0.03	6.1399e-1	4.6966c-1	3.5030e-1	1.7968c-1	1.1671e-2	6.8065e-6	9.2523e-7	1.0403e-7											
0.04	7.0896c-1	5.6293e-1	4.3865e-1	2.5083e-1	2.7360e-2	7.7922e-5	1.6432e-5	3.0034e-6	7.3802e-9										
0.05	7.9257e-1	6.4537e-1	5.1769e-1	3.1760e-1	4.7802e-2	3.5535e-4	9.7769e-5	2.3989e-5	1.7165e-7										
0.06	8.6803e-1	7.1997e-1	5.8974e-1	3.8031e-1	7.1391e-2	1.0124e-3	3.3318e-4	9.9677e-5	1.4634e-6										
0.07	9.3722e-1	7.8847e-1	6.5625e-1	4.3937e-1	9.6964e-2	2.1918e-3	8.2088e-4	2.8335e-4	6.9807e-6	2.3700e-9									
0.08	1.0013e+0	8.5204e-1	7.1818e-1	4.9518e-1	1.2373e-1	3.9834e-3	1.6454e-3	6.3291e-4	2.3061e-5	1.9088e-8									
0.09	1.0612e+0	9.1147e-1	7.7624e-1	5.4808e-1	1.5114e-1	6.4272e-3	2.8672e-3	1.2008e-3	5.9462e-5	9.8752e-8									
0.1	1.1175e+0	9.6734e-1	8.3096e-1	5.9836e-1	1.7883e-1	9.5265e-3	4.5225e-3	2.0287e-3	1.2864e-4	3.7389e-7									
0.2	1.5513e+0	1.3989e+0	1.2561e+0	9.9857e-1	4.4122e-1	6.8461e-2	4.3525e-2	2.6921e-2	5.3796e-3	2.0374e-4	3.5340e-6	2.6977c-8							
									2.2610e-2										
									5.0333e-2										
									8.5006e-2										
									1.2379e-1			8.4256e-4	8.4914e-6	2.8458e-8					
									1.6477e-1			1.9495e-3							
									2.0670e-1			3.7315e-3							
									2.4878e-1			6.2744e-3							
									2.9051e-1										
									6.5755e-1										
									9.3709e-1										
									1.1580c+0										
									1.3397e+0										
									1.4939e+0										
									1.6276e+0										
									1.7457e+0										
									1.8514e+0										
									1.9470e+0										
									2.5955e+0									9.7676e-2	
									2.9858e+0										
									3.2659e+0										
									3.4845e+0										
									3.6637e+0										
70	7.0588e+0	6.9029e+0	6.7497e+0	6.4511e+0	5.6295e+0	4.5615e+0	4.3909e+0	4.2322e+0	3.8157e+0	3.2678e+0	2.8412e+0	2.4950e+0	1.9598e+0	1.5609e+0	1 2515e+0	1.0060e+0	8.0853e-1	6.4862e-1	5.1868e-1

β "	0.0	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
80	7.1921e+0	7.0363e+0	6.8831e+0	6.5845e+0	5.7627e+0	4.6942e+0	4.5235e+0	4.3646e+0	3.9476e+0	3.3985e+0	2.9705e+0	2 6225e+0	2.0829e+0	1.6785e+0	1.3628e+0	1.1103e+0	9.0532e-1	7.3752e-1	5.9951e-1
90	7.3098e+0	7.1540e+0	7.0007e+0	6.7021e+0	5.8803e+0	4.8113e+0	4.6405e+0	4.4816e+0	4.0641e+0	3.5142e+0	3 0849e+0	2 7356e+0	2.1925e+0	1.7839e+0	1.4632e+0	1.2051e+0	9 9401c-1	8.1979e-1	6.7516e-1
100	7.4151e+0	7.2593e+0	7.1060e+0	6.8074e+0	5.9854e+0	4.9162e+0	4.7453e+0	4.5862e+0	4 1684e+0	3.6178e+0	3.1876e+0	2.8372e+0	2 2913e+0	1.8793e+0	1.5545e+0	1.2918e+0	1.0758e+0	8 9622e-1	7.4606e-1
200	8 1078e+0	7.9520e+0	7.7987e+0	7.5000e+0	6.6777e+0	5.6070e+0	5 4358e+0	5.2763e+0	4.8569e+0	4.3030e+0	3 8688e+0	3.5133e+0	2.9548e+0	2.5268e+0	2.1831e+0	1.8988e+0	1.6588e+0	1.4532e+0	1.2754e+0
300	8 5131e+0	8 3573e+0	8.2040e+0	7.9053e+0	7.0829e+0	6.0117e+0	5.8404e+0	5.6807e+0	5.2609e+0	4.7059e+0	4.2702e+0	3 9130e+0	3 3502e+0	2.9168e+0	2.5666e+0	2.2746e+0	2.0260e+0	1.8110c+0	1.6229e+0
400	8.8008e+0	8.6449e+0	8.4916e+0	8 1929e+0	7.3704e+0	6.2990e+0	6.1276e+0	5.9679e+0	5.5478e+0	4.9922e+0	4 5559e+0	4 1978e+0	3.6329e+0	3.1967e+0	2.8431e+0	2.5473e+0	2.2943e+0	2.0744e+0	1.8810e+0
500	9 0239e+0	8.8680e+0	8.7147e+0	8.4160e+0	7.5935e+0	6.5220e+0	6.3505e+0	6.1907e+0	5.7705e+0	5.2146e+0	4 7778c+0	4.4193e+0	3.8530e+0	3.4152e+0	3.0596e+0	2.7615e+0	2.5058e+0	2.2829e+0	2.0861e+0
600	9.2061e+0	9.0503e+0	8.8970e+0	8.5983e+0	7.7757e+0	6 7041e+0	6.5326e+0	6.3728e+0	5.9525e+0	5.3964e+0	4 9593e+0	4.6004e+0	4 0333e+0	3.5944e+0	3.2375e+0	2.9377e+0	2.6802e+0	2.4553e+0	2.2563e+0
700	9.3603e+0	9 2045e+0	9.0512e+0	8.7524e+0	7.9298e+0	6.8582e+0	6.6866e+0	6.5268e+0	6.1064e+0	5.5502e+0	5.1129e+0	4.7538e+0	4.1860e+0	3.7463e+0	3.3884e+0	3.0875e+0	2.8288e+0	2.6024e+0	2.4018c+0
800	9.4938e+0	9.3380e+0	9.1847e+0	8.8859e+0	8 0633e+0	6.9916e+0	6.8201e+0	6.6602e+0	6.2398e+0	5.6834e+0	5.2460e+0	4 8867e+0	4.3185e+0	3.8781e+0	3.5195e+0	3.2178e+0	2.9581e+0	2.7306c+0	2.5287e+0
900	9.6116e+0	9.4557e+0	9.3024e+0	9.0037e+0	8.1811e+0	7.1093e+0	6.9378e+0	6.7779e+0	6.3574e+0	5.8010e+0	5.3634e+0	5.0040e+0	4.4354e+0	3.9946e+0	3.6354e+0	3.3331e+0	3.0725e+0	2.8442e+0	2.6414e+0
1000	9.7169e+0	9.5611e+0	9.4078e+0	9.1091e+0	8 2864e+0	7.2147e+0	7.0431e+0	6.8832e+0	6.4627e+0	5.9062e+0	5.4685e+0	5.1090e+0	4.5401e+0	4 0989e+0	3.7393e+0	3.4364e+0	3.1753e+0	2.9462e+0	2.7427e+0
2000	1.0410e+1	1.0254e+1	1.0101e+1	9.8022e+0	8.9795e+0	7.9076e+0	7.7360e+0	7.5761e+0	7.1554e+0	6.5985e+0	6.1605e+0	5.8004e+0	5 2302e+0	4.7873e+0	4.4257e+0	4.1204e+0	3.8565e+0	3.6243e+0	3.4173c+0
3000	1.0815e+1	1.0660c+1	1.0506e+1	1.0208e+1	9.3849c+0	8.3130e+0	8.1413e+0	7.9814e+0	7.5607e+0	7.0037e+0	6.5655e+0	6.2053e+0	5 6347e+0	5.1912e+0	4.8289e+0	4.5228e+0	4.2579e+0	4.0247e+0	3.8166e+0
4000	1.1103e+1	1.0947e+1	1.0794e+1	1 0495e+1	9.6726e+0	8.6006e+0	8.4290e+0	8.2690e+0	7.8483e+0	7.2913e+0	6.8530e+0	6.4927e+0	5.9218c+0	5.4781e+0	5.1155e+0	4.8089e+0	4.5436e+0	4.3099e+0	4.1011e+0
5000	1.1326e+1	1.1170e+1	1.1017e+1	1.0718e+1	9.8957e+0	8.8237e+0	8.6521e+0	8.4922e+0	8.0714c+0	7.5143e+0	7.0760e+0	6.7156e+0	6.1447e+0	5.7008e+0	5.3379e+0	5.0311e+0	4.7656e+0	4.5315e+0	4.3224e+0
6000	1.1509e+1	1.1353e+1	1.1199e+1	1.0901e+1	1.0078e+1	9.0060e+0	8.8344e+0	8.6745e+0	8.2537e+0	7.6966e+0	7.2583e+0	6.8978e+0	6 3268e+0	5.8828e+0	5.5198c+0	5.2129e+0	4.9471e+0	4.7128c+0	4.5035e+0
7000	1.1663e+1	1.1507e+1	1.1354e+1	1.1055e+1	1.0232e+1	9.1602e+0	8.9885e+0	8.8286e+0	8.4078e+0	7.8507e+0	7.4124e+0	7.0519e+0	6.4808e+0	6.0367e+0	5.6736e+0	5.3666e+0	5.1007c+0	4.8663e+0	4.6567e+0
8000	1 1796e+1	1.1640e+1	1.1487e+1	1.1188e+1	1.0366e+1	9 2937e+0	9.1220e+0	8.9621c+0	8.5413e+0	7.9842e+0	7.5458e+0	7.1854e+0	6.6142e+0	6.1701 c+ 0	5.8069e+0	5.4998c+0	5.2338e+0	4.9992e+0	4.7896e+0
9000	1.1914e+1	1.1758e+1	1.1605e+1	1.1306e+1	1.0484e+1	9.4115e+0	9.2398e+0	9.0799e+0	8.6591e+0	8.1020e+0	7.6636e+0	7.3031e+0	6.7319e+0	6.2878c+0	5.9245e+0	5 6173e+0	5.3512e+0	5.1166e+0	4.9069e+0
10000	1.2019e+1	1.1864e+1	1.1710e+1	1.1412e+1	1.0589e+1	9.5168e+0	9.3452e+0	9.1852e+0	8.7644e+0	8.2073e+0	7.7689e+0	7.4084e+0	6.8372e+0	6 3930e+0	6.0297e+0	5.7225e+0	5.4563e+0	5.2216e+0	5.0118e+0
20000	1.2713e+1	1.2557e+1	1.2403e+1	1.2105e+1	1.1282e+1	1.0210e+1	1.0038e+1	9.8784c+0	9.4575e+0	8.9004e+0	8.4620e+0	8 1014e+0	7 5301e+0	7.0857e+0	6.7222e+0	6.4147e+0	6.1483e+0	5.9133e+0	5.7031e+0
30000	1.3118e+1	1.2962e+1	1.2809e+1	1.2510e+1	1.1687e+1	1.0615e+1	1.0444e+1	1.0284e+1	9.8630e+0	9.3058e+0	8.8674c+0	8.5068e+0	7.9354e+0	7.4910e+0	7.1274e+0	6.8198c+0	6.5533e+0	6.3182e+0	6.1079e+0
40000	1.3406e+1	1.3250e+1	1.3097e+1	1.2798e+1	1 1975e+1	1.0903e+1	1.0731e+1	1.0571e+1	1.0151e+1	9.5935e+0	9.1550e+0	8.7945e+0	8 2230e+0	7.7786e+0	7.4150e+0	7.1074c+0	6.8408e+0	6.6056c+0	6.3953e+0
50000	1.3629e+1	1.3473e+1	1.3320e+1	1.3021e+1	1.2198e+1	1.1126e+1	1.0955e+1	1.0795e+1	1.0374e+1	9.8166e+0	9.3782e+0	9.0176e+0	8.4462e+0	8.0017e+0	7.6381e+0	7.3304e+0	7 0638e+0	6.8286e+0	6.6182e+0
60000	1.3811e+1	1.3655e+1	1.3502e+1	1.3203e+1	1.2381e+1	1.1309e+1	1.1137e+1	1.0977e+1	1.0556e+1	9.9990e+0	9.5605e+0	9.1999e+0	8 6285e+0	8.1840e+0	7.8203e+0	7.5127e+0	7.2461e+0	7.0109e+0	6.8004e+0
70000	1.3965e+1	1.3810e+1	1.3656e+1	1.3357e+1	1.2535e+1	1.1463e+1	1.1291e+1	1.1131e+1	1.0710e+1	1.0153e+1	9.7146e+0	9.3540c+0	8.7826e+0	8.3381e+0	7.9745e+0	7.6668e+0	7.4002e+0	7.1649e+0	6.9545e+0
80000	1.4099e+1	1.3943e+1	1.3790c+1	1.3491e+1	1.2668e+1	1.1596e+1	1.1425e+1	1 1265e+1	1.0844e+1	1.0287e+1	9 8482e+0	9 4876e+0	8.9161e+0	8 4716e+0	8.1080c+0	7.8003e+0	7.5336e+0	7.2984e+0	7.0880e+0
90000	1.4217e+1	1.4061e+1	1.3908e+1	1.3609e+1	1.2786e+1	1.1714e+1	1.1542e+1	1.1382e+1	1.0962e+1	1.0404e+1	9.9659c+0	9.6054e+0	9.0339e+0	8.5894e+0	8.2257e+0	7.9180e+0	7.6514e+0	7.4161e+0	7.2057e+0

П р и м е ч а н и е . Значения функций рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Kruseman, Ridder, 1994.

приложение 9



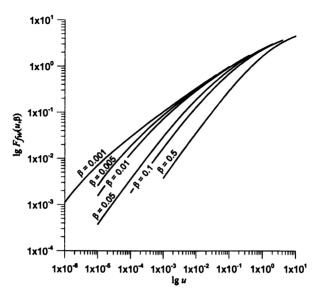


Рис. П9. Зависимость логарифма функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $F_{fiv}(u, \beta)$

		J# (7)											
	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	7,	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5
10-4	1.1205e-3						4-10-3	2.0957e-1	1.9193e-1	1.7306c-1	9.4207c-2	5.9436e-2	1.4915e-2
1.5-10-6	1.6450e-3						6-10-3	2.5719e-1	2.3926e-1	2.1950e-1	1.2881c-1	8.4083e-2	2.2076e-2
2.10-6	2.1159e-3						8-10-3	2.9732e-1	2.7929e-1	2.5905e-1	1.6009e-1	1.0716e-1	2.91110-2
3-10-6	2.9508e-3						1.10-2	3.3259e-1	3.1459e-1	2.9411e-1	1.8894c-1	1.2901c-1	3.6045e-2
4.10-6	3.6983e-3						1.5-10-2	4.0667e-1	3.8857e-1	3.6420e-1	2.5162e-1	1.7833c-1	5.2848e-2
6-10-6	4.9975e-3						2.10-2	4.6837e-1	4.5039e-1	4.2572e-1	3.0676e-1	2.2335e-1	6.9215e-2
8-10-6	6.1444e-3						3-10-2	5.6981e-1	5.5205e-1	5.2624e-1	4.0032e-1	3.0260e-1	1.0059e-1
1.10-5	7.1851e-3	2.6122e-3	1.5802e-3	3.7982e-4			4-10-2	6.5351e-1	6.3608e-1	6.0913e-1	4.8071e-1	3.7319e-1	1.3083e-1
1.5-10-5	9.4121e-3	3.9039e-3	2.3653e-3	5.6945e-4			6-10-2		7.7284e-1	7.4343e-1	6.1415e-1	4.9407e-1	1.8789e-1
2.10-5	1.1347e-2	5.0794e-3	3.1096e-3	7.5684e-4			8-10-2		8.8453e-1	8.5289e-1	7.2609e-1	5.9880e-1	2.4209e-1
3-10-5	1.4623e-2	7.2394e-3	4.5236e-3	1.1270e-3			1.10-1		9.8038e-1	9.4673e-1	8.2383c-1	6.9218e-1	2.9388e-1
4-10-5	1.7436e-2	9.2119e-3	5.8623e-3	1.4924c-3			1.5-10-1			1.1367e+0	1.0222e+0	8.8500e-1	4.1248e-1
6-10-5	2.2169e-2	1.2740e-2	8.3519e-3	2.2095e-3			2-10-1			1.2891e+0	1.1835e+0	1.0456e+0	5.2188e-1
8-10-5	2.6210e-2	1.5924e-2	1.0681c-2	2.9145e-3			3-10-1			1.5296e+0	1.4377e+0	1.3019e+0	7.1547e-1
1.10-4	2.9806e-2	1.8867e-2	1.2892e-2	3.6097c-3	1.8440e-3		4-10-1			1.7198e+0	1.6389e+0	1.5081e+0	8.8837e-1
1.5.104	3.7392e-2	2.5279e-2	1.7894e-2	5.2967e-3	2.7646e-3		6·10 ⁻¹				1.9478e+0	1.8265e+0	1.1811c+0
2.10-4	4.3822e-2	3.0952e-2	2.2479e-2	6.9421c-3	3.6675e-3		8·10 ⁻¹				2.1856e+0	2.0738e+0	1.4313e+0
3-10-4	5.4598e-2	4.0687e-2	3.0617e-2	1.0104c-2	5.4404e-3		1				2.3803e+0	2.2774e+0	1.6505e+0
4-10-4	6.3724e-2	4.9174c-2	3.7945e-2	1.3160e-2	7.1772e-3		1.5				2.7476e+0	2.6594e+0	2.0818c+0
6-10-4	7.8964e-2	6.3566e-2	5.0710e-2	1.8955e-2	1.0553e-2		2				3.0212e+0	2.9444c+0	2.4241e+0
8-10-4	9.1807e-2	7.5941e-2	6.1989 0 -2	2.4490e-2	1.3841e-2		3					3.3628e+0	2.9293e+0
1.10-3	1.0315e-1	8.7001e-2	7.2239e-2	2.9892e-2	1.7060e-2	3.7963e-3	4					3.6792e+0	3.3057e+0
1.5-10-3	1.2716e-1	1.1039e-1	9.4200e-2	4.2169e-2	2.4757e-2	5.6926e-3	6						3.8331e+0
2·10 ⁻³	1.4739e-1	1.3033e-1	1.1326e-1	5.3746e-2	3.2169e-2	7.5650e-3	8						4.2077e+0
3-10-3	1.8114e-1	1.6367e-1	1.4545e-1	7.4811e-2	4.6145e-2	1.1265c-2	1						4.4985e+0

Примечание. Значения функции взяты из [Kruseman, Ridder, 1994].

<u>Литература:</u> Kruseman, Ridder, 1994.

Функция $F_R(\beta_1, \beta_2)$

Функция:
$$F_R(\beta_1, \beta_2) = \int_0^\infty \frac{\exp(-\tau \beta_1)}{1+\tau} \cos(\tau \beta_2) d\tau$$
.

Предельные значения функции: $F_R(eta_1,0) = \exp(eta_1)W(eta_1)$, где $W(\beta)$ – функция влияния скважины (Приложение 26).

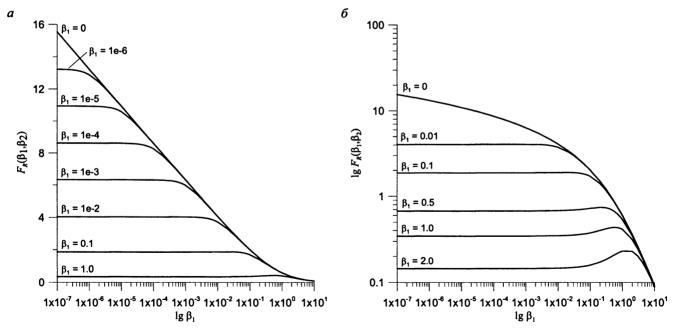


Рис. П10. Зависимость функции (а) и логарифма функции (б) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $F_R(\beta_1,\beta_2)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $\beta_1=0,\,\beta_1=10^{-7}\div 10.0$; $\beta_2=0,\,\beta_2=10^{-6}\div 10.0$.

Значения функции $F_R(eta_1,eta_2)$

\ A										Ι				1772)							r		
<i>B</i> . ~	0	1e-6	2e-6	5e-6	1e-5	2e-5	5e-5	1e-4	2e-4	5e-4	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
0	- 00	13.23830	12.54515	11.62886	10.93573	10.24259	9.32635	8.63328	7.94029	7.02447	6.33211	5.64052	4.72888	4.04339	3.36525	2.49213	1.86608	1.29385	0 67269	0.34338	0.14455	0.03390	0.00949
1e-7	15.54088	13.23332	12.54390	11.62867	10.93568	10.24258	9.32635	8.63328	7.94029	7.02447	6.33211	5.64052	4.72888	4.04339	3.36525	2.49213	1.86608	1.29385	0.67269	0.34338	0.14455	0 03390	0.00949
2e-7	14.84774	13.21869	12.54018	11.62807	10.93553	10.24255	9.32634	8.63328	7 94029	7.02447	6.33211	5 64052	4.72888	4.04339	3 36525	2.49213	1.86608	1.29385	0 67269	0.34338	0 14455	0.03390	0.00949
3e-7	14.44227	13.19521	12.53403	11.62707	10.93528	10.24248	9.32634	8.63328	7.94029			5.64052	4.72888	4.04339	3.36526	2.49213	1.86608	1.29385	0 67269	0.34338	0.14455	0.03390	0.00949
4e-7	14.15459	13.16409	12.52555	11.62568	10.93493	10.24240	9.32632	8.63328	7.94029	7.02447	6.33211										0.14455	0.03390	0.00949
5e-7	13.93145	13.12673	12.51484	11.62390	10.93448	10.24229	9.32631	8.63327	7.94029	7.02447	6.33211	5.64052	4.72888	4.04339	3.36526	2.49213	1.86608	1.29385	0.67269	0.34338	0 14455	0.03390	0.00949
6e-7	13.74913	13.08456	12.50207	11.62172	10.93394	10.24215	9.32628	8.63327	7.94029	7.02447	6.33211	5.64052	4.72888	4.04339	3.36526	2.49213	1.86608	1 29386	0.67269	0.34338	0.14455	0.03390	0.00949
7e-7	13.59498	13.03892	12.48738	11.61917	10.93329	10.24199	9.32626	8.63326	7.94029	7.02448	6.33211	5.64052	4.72888	4.04339	3.36526	2.49213	1.86608	1.29386	0.67269	0.34338	0.14455	0.03390	0.00949
		12.99096									6.33211			4.04339			1.86608		0.67269	0.34338	0.14455	0.03390	0.00949
		12.94164														2.49213					0.14455		0.00949
		12.89174										5.64053				2.49213					0.14455		0.00949
		12.43360																					0.00949
		12.08704					110-0110																0.00949
		11.82174										5.64054		4.04340			1.86608				0.14455		0.00949
		11.60931									6.33213					2.49214					0.14455		0.00949
		11.43291										5.64055				2.49214					0.14455		0.00949
		11.28237											4.72891				1.86609				0.14455		0.00949
		11.15120									6.33213			4.04342							0.14455		
<u>9e-6</u>		11.03504										5.64056			3.36528					0.34338		0.03390	0.00949
		10.93085										5 64056		4.04343			1.86610				0.14455		0.00949
_2e-5		10.24154						8.61384					4.72896			2.49218					0.14455		0.00949
3e-5	9.83742		9.83521										4.72900					1.29389			0.14455		
4e-5		9.54953	9.54859					8.55942				5.64055		4.04354			1.86615	1.29391			0.14455		0.00949
5e-5					9.30718	9.25258						5.64049		4.04358			1.86617	1.29392	0.67273		0.14455		0.00949
6e-5			9.14400			9.09188	8.88090					5.64041		4.04361			1.86619	1.29393		0.34340			0.00949
7e-5						8.95127							4.72911								0.14456		
8e-5			8.85674			8.82675		8.38662		7.01239		5.64017		4.04368			1.86623	1.29396	0.67275				0.00949
9e-5		8.73930						8.33739								2.49235				0.34341		0.03390	0.00949
<u>le-4</u>	0.00							8.28756											****		0.14456		0.00949
2e-4	7.94177	7.94175	7.94172					7.83022					4.72902					1.29411	0.67283		0.14457		0.00949
_3e-4			7.53705			7.53486											1.86663	1.29424			0.14459		0.00949
4e-4		7.25013		7.25005				7.21983					4.72758					1.29437	0.67296	****		0.03391	0.00949
_5e-4	7.02770	7.02770	7.02769			7.02690		7.00810									1.86700					0.03391	0.00949
6e-4	6.84607	6.84607	6.84607	6.84604	6.84593	6.84552		6.83238									1.86718	1.29463			0.14463	0.03392	0.00949
7e-4	6.69260	6.69260	6.69259	6.69257	6.69250									4.04377			1.86736			0.34362		0.03392	0.00950
8e-4		6.55973	6.55973	-10071-	6.55965	6.55942		6.55198					4.72002				1.86754						
9e-4					6.44253	6.44235		6.43647					4.71719				1.86772			0.34369		0.03393	0.00950
1e-3		6.33787 5.65068				6.33767		6.33290				5.53455				2.49442	1.86789	1.29514					0.00950
2e-3	0.0000		5.65068			5.65063	5.65037	5.64944				5.30497		4.03186				1 29639	0.67403		0.14483		0.00951
3e-3		5.25065	5.25065		5.25065	5.25063	5.25051	5.25010				5.06741		4.01240			1.87123		0.67469		0.14498	0.03400	0.00952
4e-3		4.96807	4.96807	4.96807	4.96807	4.96806	4.96800		4.96683		4.93788	4.85697		3.98528			1.87276		0.67536		0.14512	0.03403	0.00953
5e-3		4.74979	4 74979			4.74978		4.74959													0 14527		0.00954
6e-3	4.57212	4.57212	4.57212	4.57212	4.57212	4.57212	4.57209	4.57198	4 57157	4.56868	4.55850	4.51976	4.31028	3.91365	5 34233	2.49996	1.87551	1.30119	0 67667	U 34543	U.14541	0.03410	0.00955

β_1	0	1e-6	2e-6	5e-6	1e-5	2e-5	5e-5	1e-4	2e-4	5e-4	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
7e-3	4.42247	4.42247															1.87674						
8e-3																	1.87787						
9e-3	4.17974	4 17974																					
1e-2	4.07851	4 07851	4.07851	4 07851	4.07851	4.07851	4.07850	4 07846	4 07831	4.07727	4.07358	4.05909	3.96809	3.73613	3.28711	2.49750	1.87984	1.30561	0.67925	0.34678	0.14599	0.03423	0.00958
	3 42248																1.88403						
		3 04924																					
		2.79069																					
5e-2	2.59443	2.59443																					
	2.43724																1 82441						
		2.30679																					
		2.19576																					
	2.09944																1.73493						
	2.01464																1.70220						
2e-1	1.49335		1 49335														1.39845						
3e-1	1.22254		1.22254														1.18015						
	1.04783		1 04783														1.02467						
																	0.90863						
	0.82793																0.81840						
	0 75268																0.74594						
	0.69125																0.68628						
	0.63995																0.63616						
	0.59635																0.59338				*****		
2e+0	-10-0-10-1	0.36133															0.36077						
3e+0																	0.26188						
	0.20635																0.20625						
		0 17042																					
6e+0	***																0.14524						
	0.12664																0.12662						
		0.11228																					
		0.10086																					
1e+1	0.09156	0.09156	0.09156	0.09156	0 09156	0.09156	0.09156	0 09156	0 09156	0.09156	0.09156	0.09156	0 09156	0.09156	0.09156	0.09156	0.09156	0.09153	0.09137	0.09079	0.08854	0.07551	0.04962

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> Бочевер и др., 1968.

Функция для экспресс-опробований $F_s(u, \beta)$

$$\begin{split} \mathbf{\Phi}\mathbf{y}\mathbf{h}\mathbf{k}\mathbf{ц}\mathbf{u}\mathbf{y} \colon F_s \big(u,\beta\big) &= \frac{8\beta}{\pi^2} \int\limits_0^\infty \frac{\exp\!\left(-\frac{u\,\tau^2}{\beta}\right)}{\tau \left[\!\!\left[\tau J_0(\tau) - 2\beta J_1(\tau)\right]\!\!^2 + \left[\tau Y_0(\tau) - 2\beta Y_1(\tau)\right]\!\!^2\right]} \! d\tau \;, \\ \text{где } J_0(\beta), J_1(\beta), Y_0(\beta), Y_1(\beta) \; - \; \text{функции Бесселя (Приложение 2)}. \end{split}$$

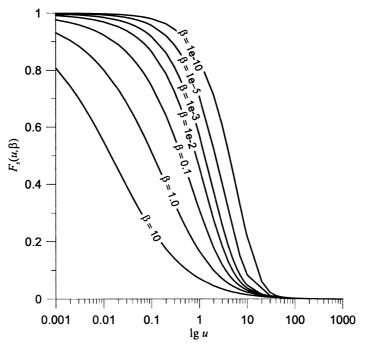


Рис. П11. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $F_s(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-6}\div 1000$; $\beta = 10^{-10} \div 10.0 \, .$

Значения функции $F_s(u, \beta)$

																									
	1e-10	1e- 0 9	1e-08	1e-07	1e- 9 6	5e-06	1e-05	2e-05	5e-05	1e- 0 4	2e-84	5e-04	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
1e-6																			0 9993	0 9990	0.9984	0.9977	0.9968	0 9948	0 9923
2e-6																			0 9990	0.9986	0.9977	0 9968	0.9955	0 9927	0.9894
4e-6																			0 9986	0 9980	0.9968	0 9955	0 9936	0.9898	0 9853
6e-6																			0 9982	0.9975	0.9961	0 9945	0 9922	0 9876	0 9822
8e-6																			0 9980	0.9971	0.9955	0 9936	0 9910	0.9857	0.9796
1e-5																			0.9977	0 9968	0 9949	0 9929	0 9900	0 9841	0.9773
2e-5																			0.9968	0 9955	0.9929	0 9900	0 9858	0.9776	0 9683
4e-5																			0 9955	0 9936	0.9899	0 9858	0 9801	0.9687	0.9558
6e-5																			0 9944	0 9922	0 9877	0 9827	0.9757	0.9619	0 9464
8e-5																			0 9936	0.9909	0 9858	0 9800	0 9720	0.9562	0.9387
10-4																			0 9928	0 9899	0.9841	0 9777	0 9688	0 9512	0 9318
2e-4																			0.9898	0 9857	0 9776	0.9687	0.9562	0.9321	0 9059
40-4																			0 9855	0.9797	0.9685	0 9560	0.9389	0.9061	0.8711
6e-4																			0.9822	0 9752	0 9615	0 9465	0 9258	0.8869	0 8458
8e-4																			0 9794	0 9713	0 9557	0.9385	09151	0 8711	0.8253
0.001	0 9997	0 9997	0 9996	0.9996	0 9994		0.999140		0.998769		0.998189	_		0.995915		0 991963			0 976874	0.967922	0 9505	0.9315	0.905694	0.8576	0.808271
0.002	0 9995	0 9994	0 9993	0 9992	0.9989			0.998281				0.996122			0.991096	0.988146	_		0.966999	0.954569	0 9307			0.807525	0 7450
0.003						0.998109				0 996659			_					0.970177							0.701943
0.004	0 9991	0 9989	0 9987	0 9985	0 9980	0 997586	-			0 995834												0.8686		0.743887	
0.005								0 996373		0.995047								_					0 805310		
9.006	0 9986	0 9984	0 9982	0 9978	0 9972					0 994289												0 84 1947			0 6178
9.007	2 2222	2.0000	0.0004	0.0001	2 224			0 995205		0 993552								_		0 914812		0.000045		0.682232	
0.008	0 9982	0 9980	0 9976	0 9971	0 9964			0.994639				0.989636					0 965075		0 932244		0.865389		0.7626 0.750859		0 579747
0.009							0 994669	0 994083	0 993097								0.962600		0.927936					0 651693	0 563745
0.01	0 9978	0 9975	0 9971	0 9965				_		0.991440		-					-			0 898168			0 739956 0 659539		0 549262
0.02	0 9958	0 9952	0 9944	0 9934	0 9919	0 990290				0.985019															
0.03	0 9919	0 9908	0 9894	0 9875	0.0040					0.979120							-								
0.04	0 9919	0 9900	U 7094	0 96/3	0 9040					0.973332									_						_
0.06	0 9881	0 9866	0 9846	0 9819	0.0782					0.962972													0.505477		
0.07	0 7007	0,000	0 7040	0 7017	0 37.02					0 957919													0 482132		
0.07	0 9844	0 9824	0 9799	0 9765	0 9718					0 952985						_							0 461756		
0.09	0 7074	0 7024	0 7.77	07.03	1,778		0 960856			0 948155													0 443717		
0.1	0 9807	0 9784	0 9753	0 9712	0 9655					0 943418															
0.2	0 9631	0 9587	0 9532	0 9459	$\overline{}$					0 899729															
0.3					1					0 860627													_		
0.4	0 9298	0 9220	0 9 1 2 2	0 8995	0 8828					0 824728							-								_
0.5				- 55,75	· · · · · ·					0 791370															
						1 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0	. 555,67		. 555510		,	1				1									

1	1e-10	1e- 0 9	10-08	1e-07	1e- 0 6	5e-06	1e-05	2e-05	5e-05	1e- 9 4	2e-04	5e-84	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
9.6	0 8984	0 8875	0 8741	0.8569													0 543722								
0.7	00,04	V 8873	0 8741	0 8303													0 507026								
0.8	0 8686	0 8550	0 8383	0 8173													0 474256								
0.9		- 0000	V 0202											_			0 444783								
1	0 8401	0 8240	0 8045	0 7801													0 418122								
2	0 7139	0 6889	0 6591	0.6235													0 247189								
3	0 6096	0 5792	0 5442	0 5033	0 4554	0 417059		0 380507	0 354497	0 333866	0 312467	0.283165	0 260430	0 237452	0.207222	0 184943	0 163615	0 137484	0 119566	0 103279	0 084009	0.070881	0 058856	0 044673	0 035375
4	0 5222	0 4891	0 4517	0 4093	0.3613	0 324329		0 290277	0 266816	0 248683	0 230336	0 206003	0.187773	0 169946	0 147428	0 131510	0 116785	0 099331	0 087610	0.076984	0.064203	0 055211	0 046684	0 036208	0.029078
5	0 4487	0 4146	0 3768	0 3351	0 2893	0 255263		0 224899	0 204576	0.189222	0 174017	0.154392	0 140115	0 126521	0 109882	0 098474	0 088159	0 076153	0 068137	0 060811	0 051788	0 045226	0 038803	0 030625	0 024879
6	0 3865	0 3525	0 3157	0 2759	0 2337	0.203167		0 176779	0 159573	0.146836	0 134459	0.118853	0 107776	0 097456	0 085128	0 076859	0 069487	0 060975	0 055272	0.049988	0.043313	0.038303	0 033257	0 026632	0 021846
7	0 3337	0 3007	0.2655	0.2285	0 1903	0 163458	0 152100	0 140892	0 126524	0 116080	0 106099	0 093765	0 085190	0 077339	0 068130	0 062045	0 056663	0 050451	0 046251	0 042298	0 037176	0 033218	0 029131	0 023617	0.019536
8	0 2888	0 2573	0 2243	0 1903	0 1562	0.132910		0 113811	0 101912	0 093403	0 085389	0 075655	0 069003	0 062994	0 056040	0 051488	0 047472	0 042817	0 039631	0 036582	0 032535	0.029326	0.025936	0.021251	0.017709
9	0 2505	0 2208	0 1902	0 1594	0 1292	0 109209		0 093152	0 083344	0 076432	0.070004	0 062310	0 057124	0 052489	0 047172	0 043706	0 040647	0 037074	0.034594	0 032182	0 028908	0 026250	0.023386	0 019340	0 016222
10	0 2178	0.1900	0 1620	0 1343	0 1078	0 090671											0 035425								
20	0 06149	0 05071	0 04129	0 03343	0 02720	0 023799		0 021448									0 015041				_				
30	0 02320	0 01956	0 01667	0 01448	0 01286	0.012003	0.011690										0 009459								
40	0 01190	0 01062	0 009637	0 008898	0 008337						0 007446	0.007326	0 007239	0 007155	0 007048	0 006968	0 006887	0 006775	0.006680	0 006568	0 006374	0 006171	0 005897	0.005395	0 004898
					0 006209												0 005411								
	0 005735	0 005487	0 005283	0 005111	0 004961												0 004455							0 003726	
70							0.004046			0 003962							0 003785								
	0 003863	0 003773	0 003691	0 003617	0 003547												0 003290								
90																	0 002909								
				0 002803			0 002725			0 002688							0.002607							-	
300	0 001348	0 001339	0.001330	0 001322	0 001313	_											0 001278						_		0.001149
400																	0 000633								
																	0 000505							_	
500 600						-				 							0.000420								
700				 -	<u> </u>	-											0 000360					_			
899																	0 000315							_	0.000303
900				 	 	 				 							0 000279								
1000			_	 	 					 							0 000251								
1000	1			ı	ı	1				1	0 000232	000252	1	0.000252	1 - 000232	1 - 000251	1 - 000251	1 - 000251	1 - 000251	1 - 000251			1		

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7. Значения, выделенные курсивом, взяты из литературы.

<u>Литература:</u> Cooper et al., 1967; Papadopulos et al., 1973; Bredehoeft, Papadopulos, 1980.

Функция $F_{Sh}(u, \beta)$

Функция:
$$F_{Sh}(u,\beta) = \int_{0}^{\infty} \frac{J_0(u\tau)}{\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + \tau^2 / \beta} \exp \left(-\frac{\tau^2}{1 + \tau^2 / \beta} \right) \right] d\tau$$
,

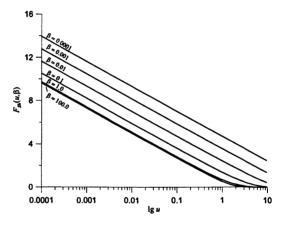


Рис. П12. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация

Аппроксимация.		
Диапазон	Зависимость	Примечание
Для малых значений $oldsymbol{eta}$	$F_{Sh}(u,\beta) = K_0\left(u\sqrt{\beta}\right) + \frac{u\beta\sqrt{\beta}}{2}\left(1 + \frac{\beta}{2}\right)K_1\left(u\sqrt{\beta}\right)$	При значении аргумента $\beta \le 0.5$ точность аппроксимации составляет 5%, при значении $\beta \le 0.25-1\%$.

Условные обозначения:

 $J_0(\beta)$, $K_0(\beta)$, $K_1(\beta)$ — функции Бесселя (Приложение 2).

Значения функции $F_{Sh}(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-4} \div 9.5$; $\beta=10^{-4} \div 100$.

Значения функции $F_{Sh}(u, \beta)$

_			T																10		10	100
<u></u>	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10	100
0.0001	13 93149	13 12697	12.78065	11.97793	11 63384	10.84883	10 52634	10 22621	10 06772	9 96607	9 89477	9 84207	9 80176	9 77018	9 74497	9 72457	9 66489	9 63933	9 62140	9 61545	9 61488	9 61488
0.0002	13.23834	12 43383	12 08750	11.28478	10.94070	10.15568	9.83319	9.53306	9 37457	9 27292	9 20162	9.14892	9 10862	9 07703	9.05182	9 03142	8 97174	8 94618	8 92826	0.61684	8.92173	8 92173
0.0003	12 83288	12.02836	11 68204	10.87932	10 53523	9 75022	9.42773	9 12759	8 96911	8 86746	8 79615	8 74346	8 70315	8 67157	8 64636	8 62596	8 56628	8 54072	8 52279 8 23511	8 51684 8 22916	8 51627 8 22859	8 51627 8.22859
0.0004	12 54520	11.74068	11 39436	10.59163	10 24755	9 46253	9.14005	8 83991	8 68142	8 57978	8 50847	8.45578	8 41547	8 38388	8 35868	8 33828	8 27860	8 25304	8 01197	8 00602	8 00544	8.00544
0.0005	12 32205	11 51754	11 17121	10 36849	10 02441	9 23939	8 91690	8 61677	8 45828	8 35663	8 28533	8 23263	8 19233	8 16074	8.13553	8 11513	8 05545	8 02989	7.82964	7.82369	7.82312	7.82312
0.0006	12 13973	11 33521	10.98889	10 18617	9 84209	9 05707	8 73458	8 43445	8 27596	8 17431	8 10301	8 05031	8 01000	7 97842	7 95321	7.93281	7 87313	7 84757	7 67549	7 66954	7 66897	
0.0007	11 98558	11 18106	10 83474	10 03202	9 68793	8 90292	8 58043	8 28030	8 12181	8 02016	7 94886	7 89616	7 85585	7 82427	7 79906	7 77866	7 71898	7 69342	7 54196	7 53601	7.53544	7 66897 7 53544
0.0008	11 85205	11 04753	10 70121	9 89849	9.55440	8 76939	8 44690	8 14676	7 98828	7 88663	7 81533	7 76263	7.72232	7 69074	7 66553	7 64513	7 58545	7 55989 7 44211	7 42418	7 41823	7 41766	7 41766
0.0009	11.73427	10.92975	10 58342	9 78070	9.43662	8.65160	8 32912	8 02898	7 87049	7 76885	7 69754	7 64485	7 60454	7 57295	7 54775	7 52735	7 46767		7.31882	7.31287	7.31230	7 31229
0.001	11 62891	10.82439	10.47806	9 67534	9.33126	8 54624	8 22376	7 92362	7 76513	7 66349	7 59218	7.53949	7 49918	7 46759	7 44239	7 42199	7.36231	7 33675 6.64360	6 62567	6 61972	6.61915	6.61915
0.002	10 93576	10.13124	9.78492	8 98220	8 63811	7 85310	7 53061	7 23047	7 07199	6.97034	6 89904	6 84634	6.80603	6 77445	6 74924	6.72884	6 66916	6 23814	6 22021	6 21426	6 21369	6.21368
0.003	10 53029	9.72578	9.37945	8 57673	8 23265	7 44763	7 12515	6 82501	6 66652	6 56488	6 49357	6 44088	6 40057	6 36899	6 34378	6 32338	6 26370	5 95046	5.93253	5 92658	5.92600	5.92600
0.064	10 24261	9 43809	9 09177	8 28905	7 94497	7 15995	6 83747	6 53733	6 37885	6 27720	6 20590	6 15320	6.11289	6 08131	6 05610	6 03570	5.97602	5 72732	5 70939	5.70344	5.70286	5.70286
0.005	10 01947	9.21495	8 86863	8.06590	7.72182	6 93681	6 61432	6 31419	6 15571	6 05406	5.98276	5 93006	5.88976	5 85817	5 83296	5 81256	5.75288	5 54500	5.52707	5.52112	5.52054	5.52054
0.006	9 83715	9.03263	8 68630	7 88358	7 53950	6 75449	6 43200	6 13187	5 97339	5.87174	5.80044	5 74775	5.70744	5 67586	5 65065	5 63025	5 57057	5,39086	5 37293	5.36697	5 36639	5.36639
0.007	9.68300	8 87848	8.53215	7 72943	7 38535	6.60034	6 27785	5 97772	5.81924	5.71760	5 64630	5.59360	5.55330	5 52171	5.49651	5 47611	5 41642	5.25734	5 23940	5 23344	5 23286	5.23286
9.008	9 54947	8.74495	8 39862	7.59590	7 25182	6 46681	6 14433	5 84420	5 68572	5 58407	5 51277	5 46008	5.41977	5 38819	5 36298	5.34258	5.28290	5 13956	5 12162	5 11566	5.11508	5.11508
0.009	9.43168	8 62716	8 28084	7 47812	7 13404	6 34903	6 02654	5 72642	5.56794	5 46630	5 39500	5 34230	5.30200	5 27042 5 16506	5 24521	5 22481	5.16513	5,03421	5 01627	5 01030	5.00973	5.00972
0.01	9.32632	8 52180	8 17548	7 37276	7 02868	6 24367	5 92119	5 62106	5 46258	5 36094	5 28964	5 23695	5.19665		5 13986	5 11946	5.05978	4 341 19	4 32322	4 31721	4 31662	4 31661
0.02	8 63317	7 82866	7 48233	6 67961	6 33553	5 55054	5 22808	4 92798	4 76953	4 66791	4 59662	4 54394	4 50364	4 47206	4 44686	4 42646	4 36677	3 93592	3 91790	3 91184	3.91123	3 91121
0.03	8 22771	7 42319	7 07687	6 27415	5.93008	5 14511	4 82268	4 52263	4 36420	4 26261	4 19134 3 90390	4 13867	4 09839 3 81099	4 06682 3 77942	4 04162 3 75423	4 02123 3 73384	3 96153 3 67413	3 64850	3 63041	3 62429	3 62364	3 62362
0.04	7 94003 7 71688	7 13551 6 91237	6 78919 6 56605	5 98648	5 64241 5 41928	4.85748 4 63439	4 53508 4 31203	4 23508 4 01211	3 85379	3 97514 3 75226	3 68106	3 85126 3 62843	3.58818	3 55663	3 53145	3.51106	3 45134	3,42567	3 40751	3 40132	3 40063	3.40059
0.05				5.76334										3 37472			3 26943	3 24372	3 22548	3 21919	3 21846	3.21840
0.06	7 53456	6 73005	6 38373	5 58103	5 23697 5 08284	4 45213	4.12983 3 97581	3 82999	3 67173 3 51787	3 57025	3 49908 3 34532	3 44648 3 29276	3 40625	3 22103	3 34954 3 19587	3 32916 3 17549	3.11575	3 09000	3 07167	3 06528	3 06449	3 06442
0.07	7 38041 7 24688	6 57590 6 44237	6 22958 6 09605	5 42689 5 29337	4 94933	4 29806 4 16461	3 84243	3 67606 3 54279	3 38467	3 41645 3 28331	3 21223	3 15970	3.25255 3.11951	3 08801	3 06286	3.04249	2 98274	2 95694	2 93852	2 93202	2 93118	2.93108
0.08	7 12910	6 32459	5 97827	5 17559	4 83157	4 04692	3 72481	3 42528	3 26725	3 16596	3 09492	3 04243	3 00227	2 97079	2.94565	2 92529	2 86553	2 83968	2 82115	2 81454	2 81363	2.81351
0.09	7 02374	6 21923	5 87291	5 07025	4 72623	3 94166	3 61963	3 32022	3 16229	3 06106	2 99008	2 93763	2.89750	2 86604	2.94363	2 82057	2 76079	2 73490	2 71626	2 70951	2.70854	2.70839
0.1	6 33060	5.52610	5.17981	4 37729	4 03344	3 24995	2 92899	2 63126	2 47458	2 37430	2 30405	2.25215	2 21243	2 18127	2 15635	2 13612	2 07630	2 04982	2 02986	2 02154	2 01961	2 01902
0.3	5 92514	5.12067	4 77441	3 97212	3 62851	2 84658	2 52715	2.23175	2 07679	1 97783	1 90857	1 85743	1 81827	1 78753	1.76290	1 74288	1 68314	1 65605	1 63459	1 62436	1 62112	1 61981
0.4	5.63747	4 83304	4 48682	3 68481	3 34151	2 56155	2 24401	1 95146	1.79859	1 70119	1 63313	1 58289	1.54443	1 51419	1 48994	1 47018	1 41070	1 38307	1 36013	1 34788	1.34309	1 34083
0.5	5 41434	4 60996	4.26378	3 46212	3.11920	2 34155	2 02621	1 73692	1 58641	1 49078	1 42406	1 37485	1 33717	1 30752	1 28370	1.26425	1 20522	1.17717	1 15286	1.13863	1 13215	1 12875
0.6	5.23203	4 42770	4 08159	3 28033	2.93784	2 16281	1 84992	1 56424	1 41630	1 32260	1 25734	1 20924	1 17241	1 14341	1 12008	1 10099	1 04260	1 01425	0 98877	0 97268	0 96447	0 95979
0.7	5 07790	4 27363	3 92759	3 12678	2 78477	2 01265	1 70243	1 42062	1 27543	1 18377	1 12006	1 07314	1 03722	1 00892	0 98613	0 96744	0 90986	0 88136	0 85491	0 83714	0 82725	0 82119
0.8	4 94439	4 14019	3.79422	2.99391	2 65243	1 88346	1 57610	1 29840	1 15610	1 06657	1 00447	0 95879	0 92382	0 89626	0 87403	0 85579	0 79917	0 77068	0 74348	0 72426	0 71278	0 70529
0.9	4 82663	4 02250	3 67662	2.87685	2 53594	1 77036	1 46602	1 19261	1 05330	0 96597	0 90553	0 86113	0 82715	0 80035	0 77872	0 76094	0 70544	0 67709	0.64937	0 62894	0 61600	0 60709
1.0	4 72129	3 91725	3 57145	2 77227	2 43198	1 66998	1 36881	1 09984	0 96360	0 87852	0 81977	0 77667	0 74370	0 71769	0 69669	0 67940	0 62514	0 59705	0.56903	0 54765	0 53343	0 52313
1.1	4 62601	3 82205	3 47635	2 67781	2 33817	1 57993	1 28205	1 01766	0 88454	0 80174	0 74471	0 70292	0 67098	0 64578	0 62541	0 60863	0 55572	0 52802	0 49991	0 47781	0 46249	0 45090
1.2	4 53903	3 73516	3 38957	2 59169	2 25275	1 49845	1 20396	0 94423	0 81429	0 73378	0 67847	0 63801	0 60710	0 58272	0 56300	0 54674	0 49528	0 46807	0 44005	0 41747	0 40127	0 38850
1.3	4 45902	3 65525	3 30976	2 51260	2 17438	1 42418	1 13318	0 87819	0 75144	0 67323	0 61965	0 58051	0 55064	0 52708	0 50802	0 49230	0 44236	0 41573	0.38797	0.36513	0 34825	0 33445
1.4	4 38494	3 58128	3 23591	2 43949	2 10203	1 35606	1 06863	0 81844	0 69489	0 61898	0 56712	0 52930	0 50046	0 47773	0 45934	0 44415	0 39579	0 36984	0 34248	0 31959	0 30223	0 28756
1.5	4 31599	3 51244	3 16718	2 37154	2 03487	1.29327	1 00947	0 76412	0 64377	0 57015	0 51999	0 48349	0 45568	0 43377	0 41604	0 40139	0 35467	0 32944	0 30263	0 27986	0 26223	0 24685
1.6	4 25148	3 44805	3 10293	2 30809	1.97225	1 23513	0 95502	0 71454	0 59737	0 52602	0 47755	0 44235	0 41556	0 39446	0 37739	0 36329	0 31822	0 29378	0 26762	0 24514	0 22741	0 21152
1.7	4 19090	3 38759	3 04260	2 24861	1 91361	1 18109	0 90471	0 66910	0 55511	0 48600	0 43920	0 40527	0 37949	0 35919	0 34278	0 32923	0 28584	0 26223	0 23682	0 21476	0 19710	0 18088
1.8	4 13378	3 33060	2 98575	2 19263	1 85851	1 13068	0 85807	0 62734	0 51649	0 44960	0 40444	0 37177	0 34697	0 32747	0 31171	0 29869	0 25700	0 23425	0 20966	0 18815	0 17070	0 15433
1.9	4 07976	3 27671	2 93200	2 13979	1 80657	1 08352	0 81472	0 58885	0 48111	0 41640	0 37285	0 34141	0 31759	0 29887	0 28375	0 27126	0 23126	0 20939	0 18568	0 16483	0 14772	0 13136
2.5	3 80561	3 00347	2 65972	1 87351	1 54618	0 85332	0 60760	0 41028	0 32026	0 26776	0 23314	0 20852	0 19006	0 17566	0 16410	0 15459	0 12431	0 10783	0 08995	0 07411	0 06081	0 04722
3.5	3 46976	2 66948	2 32770	1 55332	1 23718	0 59784	0 38964	0 23532	0 17026	0 13428	0 11147	0 09571	0 08417	0 07535	0 06837	0 06272	0 04528	0 03621	0 02680	0 01893	0 01273	0 00674
4.5	3 21921	2 42120	2 08176	1 32096	1 01716	0 43216	0 25821	0 13960	0 09359	0 06956	0 05496	0 04522	0 03830	0 03314	0 02915	0 02598	0 01667	0 01217	0 00785	0 00461	0 00240	0 00070
5.5	3 01944	2 22404	1 88726	1 14136	0 85058	0 31851	0 17461	0 08454	0 05249	0 03672	0 02758	0 02171	0 01768	0 01476	0 01256	0 01086	0 00614	0 00406	0 00225	0 00108	0 00041	0 00005
6.5	2 85342	2 06093	1 72707	0 99707	0.71966	0 23788	0 11972	0 05190	0 02982	0 01962	0 01399	0 01052	0 00822	0 00662	0 00544	0 00456	0 00226	0 00135	0 00063	0 00024	0 00007	0 00000
7.5	2 71146	1 92216	1 59146	0 87809	0 61414	0 17940	0 08291	0 03218	0 01710	0 01057	0 00715	0 00513	0 00385	0 00298	0 00236	0 00192	0 00083	0 00044	0 00018	0 00005	0 00001	0 00000
8.5	2 58756	1 80170	1 47433	0 77812	0 52756	0 13630	0.05786	0 02010	0 00987	0 00573	0 00367	0 00251	0 00180	0 00134	0 00103	0 00081	0 00030	0 00014	0 00005	0 00001	0 00000	0 00000
9.5	2 47769	1 69550	1 37165	0 69294	0 45556	0 10416	0 04062	0 01263	0 00573	0 00312	0 00189	0 00123	0 00085	0 00061	0 00045	0 00034	0 00011	0 00005	0 00001	0 00000	0 00000	0 00000
				-		-	-					-										

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

Литература: Шестаков, 1965.

Приложение 13

Функция:
$$F_{Sh}'(u,\beta) = \int_0^\infty \frac{J_0(u\tau)}{\tau} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^2}{1+\tau^2/\beta}\right)\right] d\tau$$
.

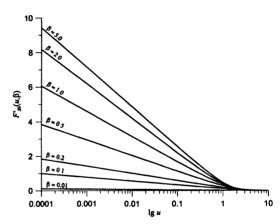


Рис. П12. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация:		
Диапазон	Зависимость	Примечание
Для малых значений <i>β</i>	$F'_{Sh}(u,\beta) = \left(\beta - \frac{\beta^2}{2} + \frac{\beta^3}{6}\right) K_0\left(u\sqrt{\beta}\right) + \frac{u\beta^2\sqrt{\beta}}{4} K_1\left(u\sqrt{\beta}\right)$	При значении аргумента $\beta \le 0.5$ точность аппроксимации составляет 5%, при значении $\beta \le 0.25 - 1\%$.

Условные обозначения:

 $J_0(\beta)$, $\overline{K_0(\beta)}$, $K_1(\beta)$ — функции Бесселя (Приложение 2).

Значения функции $F_{Sh}'(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-4} \div 9.5$; $\beta=10^{-4} \div 100$.

Значения функции $F'_{Sh}(u,oldsymbol{eta})$

												3/										
	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10	100
0.0001	0 00139	0 00656	0 01277	0 05973	0 11573	0 52851	0 99945	1 84550	2 59264	3 25862	3 85498	4 39049	4 87226	5 30632	5 69780	6 05121	7 37048	8 17478	8 97885	9 43002	9 55800	9 60983
0.0002	0 00132	0 00622	0 01208	0 05628	0 10884	0 49470	0 93349	1 71985	2 41299	3 03010	3.58225	4 07775	4 52332	4 92462	5 28647	5.61306	6.83199	7 57544	8 32022		8 86489	8 91668
0.0003	0 00128	0 00601	0 01168	0 05425	0 10480	0 47493	0 89490	1 64635	2.30790	2 89643	3 42271	3 89481	4 31921	4 70134	5 04585	5 35676	6 51700	7 22485	7 93494	8 33881	8 45944	8.51122
0.0004	0 00125	0 00587	0 01139	0 05282	0 10194	0 46090	0 86753	1.59420	2 23334	2 80159	3.30952	3.76501	4.17438	4 54292	4 87513	5 17491	6.29351	6 97610	7 66158	8 05307	8 17177	8 22353
0.0005	0 00123	0 00576	0 01117	0.05171	0 09972	0 45002	0 84629	1 55375	2 17550	2.72802	3 22172	3.66433	4 06205	4 42005	4 74271	5 03385	6 12015	6 78316	7 44955	7 83143	7 94864	8 00039
0.0006	0 00121	0 00567	0 01098	0 05080	0 09791	0 44112	0.82894	1 52070	2 12825	2.66791	3 14998	3.58207	3 97027	4 31965	4 63452	4 9 1 8 6 1	5.97851	6 62551	7 27630	7 65033	7 76632	7.81807
0.0007	0 00120	0 00559	0 01083	0.05003	0 09637	0.43361	0 81427	1 49276	2.08829	2.61709	3 08933	3 51252	3.89267	4 23476	4 54304	4 82116	5.85876	6 49222	7 12983	7 49722	7 61218	7 66392
0.0008	0 00119	0 00552	0 01070	0 04936	0 09504	0.42709	0 80157	1 46856	2 05368	2 57307	3 03679	3 45227	3 82544	4 16123	4 46380	4 73676	5 75502	6.37676	7 00294	7 36459	7.47866	7.53039
0.0009	0 00117	0 00546	0.01058	0 04878	0 09387	0.42135	0.79036	1 44721	2 02316	2.53424	2 99044	3.39913	3 76615	4 09637	4 39390	4 66230	5.66352	6 27492	6 89102	7 24760	7.36088	7 41260
0.901	0 00116	0 00541	0.01047	0 04825	0 09282	0.41621	0 78033	1.42811	1 99585	2 49951	2 94899	3 35159	3.71311	4 03835	4 33138	4.59570	5.58167	6 18382	6 79091	7 14295	7.25552	7 30724
0.002	0 00109	0.00506	0.00978	0.04479	0 08593	0.38241	0 71437	1 30246	1.81620	2.27099	2 67625	3 03885	3 36417	3 65666	3 92005	4 15755	5.04319	5.58448	6 13227	6 45447	6 56241	6 61410
0.003	0 00105	0.00486	0.00937	0 04277	0 08189	0.36263	0 67578	1 22896	1 71111	2.13732	2 51672	2.85591	3.16006	3 43338	3 67943	3 90125	4 72820	5 23389	5 74700	6.05174	6 15696	6.20863
0.984	0 00102	0 00472	0.00909	0 04134	0.07903	0.34860	0 64841	1 17682	1 63655	2 04247	2 40353	2.72611	3.01524	3 27497	3 50872	3.71941	4.50471	4.98515	5 47365	5 76600	5.86929	5.92095
0.005	0 00100	0.00461	0.00886	0.04022	0.07681	0.33772	0 62717	1 13637	1 57872	1 96891	2 31573	2.62544	2.90291	3 15209	3 37630	3.57836	4.33137	4 79222	5.26162	5.54437	5.64616	5.69781
0.006	0 00098	0 00452	0.00868	0.03931	0 07499	0.32883	0.60982	1 10332	1 53146	1 90880	2 24399	2.54318	2 81113	3 05170	3 26811	3.46312	4 18973	4.63458	5 08838	5 36328	5.46385	5.51549
0.007	0 00097	0 00444	0 00853	0.03854	0 07346	0 32131	0.59515	1 07538	1 49151	1 85799	2.18334	2 47363	2.73353	2 96682	3 17664	3 36568	4 06999	4 50130	4 94192	5 21017	5.30971	5.36134
0.008	0.00095	0 00437	0 00839	0.03788	0 07213	0.31480	0.58245	1 05117	1 45690	1 81397	2 13080	2 41339	2 66631	2 89329	3 09741	3 28128	3.96626	4.38585	4 81 504	5.07755	5.17619	5.22781
0.009	0 00094	0.00431	0 00828	0.03729	0 07096	0 30905	0 57124	1.02982	1 42638	1 77514	2 08446	2.36025	2.60703	2 82844	3 02752	3 20684	3 87477	4 28402	4 70314	4 96056	5.05841	5.11003
0.01	0 00093	0 00426	0 00817	0 03677	0 06991	0.30391	0 56121	1 01073	1 39907	1 74041	2 04301	2.31272	2 55399	2 77043	2 96500	3 14025	3.79294	4 19294	4 60304	4 85592	4 95306	5.00467
0.02	0 00086	0.00391	0 00748	0 03331	0.06301	0 27011	0 49525	0 88509 0 81162	1 21945	1 51193	1 77034	2 00006	2 20515	2.38884	2 55380	2.70223	3 25464	3 59381	3 94459	4 16755	4.25999	4 31156
0.03	0.00082	0 00371	0 00707	0.03129	0.05898	0 25034	0 45668			1.37832	1 61089	1 81723	2.00117	2 16573	2.31337	2 44614	2 93994	3 24353	3 55960	3 76499	3 85463	3.90616
0.04	0.00079	0.00357	0 00679	0 02985	0 05612	0 23631	0 42931	0.75950	1 03989 0.98212	1.28357 1 21010	1 49782	1.68758	1.85653	2 00753	2 14290	2.26457	2.71682	2 99520	3 28662	3 47948	3 56708	3 61857
0.05	0.00077	0 00346	0,00656	0 02874	0 05390	0.22543 0.21654	0.40808	0.71908	0.98212	1 15012	1 41016 1 33859	1 58709 1 50504	1.74442 1 65290	1 88491 1.78482	2 01078 1 90293	2 12385 2.00898	2.54392 2.40281	2 80275 2.64569	3 07506 2 90235	3 25813 3 07739	3 34409 3 16196	3 39554 3 21336
0.06	0 00075	0 00336	0.00638	0 02783	0 05055	0.20902	0.39074	0.65817	0 89508	1 09943	1 27812	1 43573	1.57559	1.70028	1 81184	1 91198		2.64369	2 75650	2 92467	3 00803	
0.07	0.00074	0 00329	0.00623	0.02706	0 03033	0.20902	0.36340	0.63402	0 86057	1 05556	1 22579	1.37575	1.50870	1 62713	1 73304	1 82805	2 28364 2 18057	2.39833	2 63030	2.79249	2 87476	3 05937 2,92603
0.08	0.00072	0 00322	0.00009	0.02639	0 04922	0 19678	0.36340	0.61272	0 83015	1 01690	1 17968	1 32291	1.44976	1 56269	1,66362	1 75413	2 08979	2.29729	2 51914	2 67600	2 75726	2.92003
0.09	0 00070	0 00311	0 00587	0 02528	0 04700	0 19164	0.34219	0.59368	0.80296	0 98234	1.13847	1.27569	1 39711	1.50512	1.60161	1.68810	2.00871	2.29729	2.41985	2 57191	2.65222	2.70335
0.2	0 000/0	0 00311	0.00518	0 02183	0 04011	0 15791	0.27648	0.46886	0 62490	0 75629	0 86913	0 96727	1.05342	1.12955	1 19723	1.25767	1 48075	1.61947	1 77258	1 89149	1.96401	2 01402
0.3	0 00059	0 00276	0.00318	0 01980	0 03608	0 13824	0.27846	0.39653	0.52204	0 62606	0.71431	0 79033	0 85655	0.91472	0.96619	1 01198	1 18021	1 28510	1 40340	1.50098	1 56663	1 61488
0.4	0 00056	0.00242	0.00448	0 01837	0 03322	0 12434	0 21133	0.34583	0.45023	0 53543	0 60685	0 66780	0.72049	0.76650	0.80700	0 84291	0 97409	1 05596	1 14986	1.23109	1 29006	1.33598
0.5	0 00054	0.00230	0.00426	0.01726	0 03101	0.11361	0 19062	0 30706	0 39556	0 46669	0 52561	0 57540	0 61812	0 65518	0 68764	0 71630	0 82036	0.88525	0.96067	1 02849	1.08089	1.12402
0.6	0.00052	0.00221	0.00408	0.01635	0.02921	0 10490	0 17387	0.27590	0 35183	0 41191	0 46108	0 50223	0.53724	0.56742	0 59370	0 61681	0 70010	0 75190	0 81273	0 86921	0 91524	0 95519
0.7	0 00051	0.00214	0.00393	0 01559	0.02768	0 09758	0 15986	0 25000	0 31569	0 36685	0 40819	0 44243	0 47131	0.49603	0 51743	0 53616	0.60310	0 64453	0 69357	0 74033	0 78025	0 81674
0.8	0.00049	0.00207	0 00379	0 01493	0.02637	0 09129	0 14786	0 22800	0 28515	0 32894	0 36386	0.39246	0 41638	0.43668	0.45415	0 46935	0.52318	0 55626	0 59562	0 63401	0 66817	0 70100
0.9	0 00048	0 00201	0 00367	0 01434	0.02521	0 08577	0.13742	0.20898	0 25890	0 29651	0 32609	0 35004	0.36986	0 38655	0 40081	0 41314	0 45631	0 48260	0 51395	0 54511	0 57389	0 60299
1.0	0.00047	0 00196	0.00357	0.01382	0 02417	0 08088	0 12819	0 19232	0 23605	0 26842	0 29351	0 31356	0 32999	0 34369	0.35530	0 36527	0 39970	0 42041	0 44510	0 47004	0 49388	0 51922
1.1	0.00046	0.00191	0 00347	0 01335	0 02324	0 07650	0 11997	0 17759	0 21597	0.24385	0 26512	0 28190	0 29548	0 30668	0.31609	0 32411	0 35135	0 36746	0.38660	0 40618	0 42553	0 44720
1.2	0.00045	0 00187	0 00339	0.01292	0 02239	0 07253	0 11257	0.16444	0 19817	0 22219	0 24020	0 25420	0 26538	0 27449	0 28206	0 28845	0 30974	0.32205	0.33656	0 35157	0.36689	0 38501
1.3	0.00045	0 00183	0.00331	0.01253	0 02161	0 06891	0 10586	0 15263	0 18228	0 20296	0 21818	0 22981	0 23896	0.24631	0 25235	0 25738	0 27372	0 28289	0.29354	0 30466	0 31642	0.33118
1.4	0.00044	0 00179	0.00323	0 01216	0 02089	0 06559	0 09975	0 14197	0 16803	0 18580	0 19861	0 20822	0 21564	0.22151	0 22625	0 23015	0.24239	0 24896	0.25642	0.26424	0 27288	0 28450
1.5	0.00043	0 00176	0 00317	0 01182	0.02022	0 06254	0 09415	0 13229	0 15518	0 17041	0 18115	0 18902	0 19498	0.19960	0.20325	0 20619	0 21502	0 21945	0 22427	0.22934	0 23526	0 24402
1.6	0 00043	0 00172	0 00310	0 01151	0 01960	0 05971	0 08901	0 12346	0.14355	0 15655	0 16549	0 17188	0 17659	0 18015	0.18289	0 18504	0 19104	0 19371	0 19635	0 19913	0.20274	0 20890
1.7	0 00042	0 00169	0.00304	0.01121	0 01902	0 05708	0 08425	0 11539	0 13298	0 14404	0 15142	0 15653	0 16018	0 16284	0 16481	0 16629	0 16996	0 17119	0.17206	0.17295	0.17461	0 17847
1.8	0 00041	0 00166	0.00298	0 01093	0 01847	0 05462	0 07985	0 10798	0.12335	0 13270	0 13873	0 14274	0 14548	0 14738	0.14871	0 14964	0 15139	0.15144	0.15087	0 15023	0 15028	0 15212
1.9	0 00041	0 00164	0.00293	0 01067	0 01795	0.05233	0 07575	0 10117	0.11455	0 12240	0 12725	0 13032	0 13229	0 13355	0 13434	0 13481	0 13498	0 13409	0 13238	0 13051	0.12924	0 12935
2.5	0 00038	0 00150	0.00266	0 00934	0 01536	0.04114	0 05624	0 06971	0.07492	0 07686	0 07729	0 07697	0 07627	0 07538	0.07441	0 07343	0 06893	0 06549	0 06086	0 05595	0 05126	0 04618
3.5	0 00035	0.00133	0.00233	0 00774	0.01229	0 02874	0 03580	0 03928	0.03873	0 03715	0 03534	0 03357	0 03193	0 03044	0.02909	0 02787	0 02332	0 02038	0 01681	0 01331	0 01012	0 00650
. 4.5	0 00032	0.00121	0 00208	0 00658	0.01010	0 02072	0.02356	0.02291	0.02074	0 01859	0 01673	0 01515	0 01382	0.01269	0.01173	0 01090	0 00806	0 00642	0 00462	0 00305	0.00181	0.00066
5.5	0.00030	0 00111	0 00189	0 00569	0.00844	0.01523	0.01582	0 01365	0.01134	0 00951	0 00808	0 00697	0 00609	0 00539	0 00481	0 00433	0 00281	0 00203	0 00125	0 00067	0 00030	0 00005
6.5	0 00029	0 00103	0 00173	0 00497	0 00714	0 01134	0.01077	0 00825	0 00629	0 00493	0 00396	0 00325	0 00272	0.00231	0 00199	0 00173	0 00098	0 00064	0 00034	0 00014	0 00005	0 00000
7.5	0 00027	0.00096	0 00159	0 00437	0 00609	0.00853	0 00741	0 00504	0 00353	0 00258	0 00196	0 00153	0 00122	0 00100	0 00083	0 00070	0 00034	0 00020	0 00009	0 00003	0 00001	0 00000
8.5	0.00026	0.00090	0 00147	0 00388	0 00523	0 00646	0 00514	0 00310	0 00199	0 00136	0 00097	0 00072	0 00055	0 00043	0 00035	0 00028	0 00012	0 00006	0 00002	0.00001	0 00000	0 00000
9.5	0.00025	0 00085	0 00137	0.00345	0.00452	0 00493	0.00358	0 00192	0.00113	0.00072	0.00049	0 00034	0.00025	0.00019	0.00015	0 00011	0 00004	0 00002	0 00001	J 0.00000	0 00000	0 00000

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

Литература: Шестаков, 1965.

Функция Vandenberg $F_V(u, oldsymbol{eta})$

Функция:
$$F_V(u, \beta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{u}^{\infty} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt[3]{\tau^2}}$$

Предельные значения функции: $F_V(u,0) = \frac{e^{-u}}{\sqrt{\pi u}} - \operatorname{erfc} \sqrt{u}$,

где $\operatorname{erfc} \beta$ – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4).

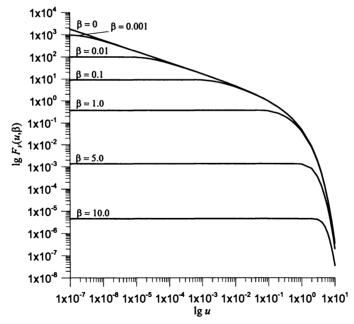


Рис. П14. Зависимость логарифма функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $F_V(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-7} \div 10$; $\beta=0, \beta=10^{-5} \div 10$.

Значения функции $F_V(u,\beta)$

< -																	
<u>"</u>	0	0.00001	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
0	inf	9.9999e+4	9.9990e+3	1.9990e+3	9.9900e+2		1.9900c+2	9.9005c+1	4.9010e+1	1 9025e+1	9 0484c+0	4 0937e+0	1 2131c+0	3 6788c-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
1e-7	1.7831e+3	1 7830e+3	1.7684e+3		9.7365e+2	4.9900e+2	1 9900e+2	9.9005e+1	4.9010e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-7	1.2606e+3	1.2605e+3	1.2553e+3	1.1406e+3	8 8515e+2	4.9822e+2	1.9900e+2	9 9005e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9 0484c+0	4 0937e+0		3.6788e-1	6.7668c-2	1.3476e-3	4.5400e-6
3e-7	1.0291e+3	1.0290e+3	1.0262e+3		8.0229e+2	4.9409e+2	1 9900e+2	9.9005e+1	4.9010e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0	1.2131e+0	3.6788e-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
4e-7	8 9106e+2	8.9104e+2	8.8921e+2	8.4670e+2	7 3545e+2	4.8633e+2	1.9900e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6 7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
5e-7	7.9688e+2	7.9687e+2	7.9556e+2	7.6485e+2	6.8169e+2	4.7625e+2	1.9900e+2	9.9005e+1	4.9010e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0		3 6788e-1	6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
6e-7	7.2737e+2	7.2736e+2	7.2636e+2	7.0285e+2	6 3769e+2	4.6506c+2	1.9900e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9.0484e+0	4.0937e+0			6 7668c-2	1.3476e-3	4.5400e-6
7e-7	6.7334e+2	6.7333e+2	6.7253e+2	6.5379e+2	6.0098e+2	4 5352e+2	1.9900e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
8e-7	6.2978e+2	6.2978e+2	6.2913e+2	6 1373e+2	5 6981e+2	4.4208c+2	1.9899e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9 0484c+0	4.0937e+0		3.6788e-1	6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
9e-7	5.9371e+2	5.9370e+2	5.9316e+2		5.4294e+2	4.3098e+2	1.9896e+2	9 9005e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9.0484e+0	4.0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
1e-6	5 6319e+2	5.6319e+2	5.6272e+2	5.5165e+2	5.1950e+2	4.2035e+2	1.9892e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9.0484e+0	4.0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-6			3.9778e+2		3.8193e+2	3.4035e+2	1.9652e+2	9.9005e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9.0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4 5400e-6
3e-6	3.2474e+2		3.2465e+2	3.2249e+2	3.1591e+2	2.9189e+2	1.9076e+2	9 9001e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
4e-6		2.8110e+2	2.8104e+2	2.7963e+2	2 7533e+2	2 5925e+2	1 8358e+2	9 8964e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9.0484e+0	4 0937e+0		3 6788e-1	6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
5e-6	2.5131e+2		2.5127e+2		2.4717e+2	2 3546e+2		9 8848e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9.0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
6e-6	2.2933e+2		2.2930e+2		2.2617e+2	2.1715e+2		9 8616e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
7e-6	2.1225e+2			2.1161e+2	2.0973e+2	2.0251e+2	1.6271e+2	9 8252e+1	4 9010e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
8e-6	1.9847e+2		1.9845e+2	1.9795e+2	1.9641e+2	1.9046e+2	1 5674e+2	9.7763e+1	4 9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0		1 2131e+0		6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
9e-6	1.8706e+2	1.8706e+2	1.8705e+2	1.8663e+2	1.8534e+2	1.8033e+2	1 5128e+2	9.7163e+1	4.9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0		3.6788e-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
1e-5	1.7741e+2	1.7741e+2	1.7740e+2	1.7704e+2	1.7594e+2	1.7164e+2	1 4629e+2	9.6470e+1	4.9010e+1	1.9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-5	1.2516e+2	1.2516e+2	1.2515e+2		1.2464e+2	1.2309e+2	1.1316e+2	8.7621e+1	4.8932e+1	1 9025e+1	9.0484c+0				6.7668e-2	1.3476e-3	4 5400e-6
3e-5	1.0201e+2	1.0201e+2	1.0201e+2		1 0172e+2	1 0088e+2	9 5283e+1	7.9335e+1	4 8519e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
4e-5	8.8210e+1	8.8210e+1	8.8208e+1	8 8163e+1	8.8024e+1	8 7472e+1	8.3774e+1	7.2650e+1	4.7743e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
5e-5	7.8792e+1	7.8792e+1	7.8791e+1	7.8759e+1	7 8660e+1	7 8264e+1	7 5589e+1	6.7275e+1	4 6735e+1	1 9025e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6.7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
6e-5	7.1841e+1	7.1841e+1	7.1840e+1	7.1816e+1	7.1740e+1	7 1438e+1	6 9389e+1	6.2875e+1	4 5616e+1	1 9024e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
7e-5	6.6438e+1	6.6438e+1	6.6437e+1	6 6418e+1	6 6358e+1	6.6119e+1	6.4484e+1	5 9204e+1	4 4462e+1	1 9024e+1	9 0484e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
8e-5	6.2083e+1	6.2083e+1	6.2083e+1	6 2067e+1	6.2018e+1	6 1822e+1	6.0479e+1	5.6087e+1	4.3318e+1	1 9023e+1	9 0484c+0	4.0937e+0			6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
9e-5	5.8476e+1 5 5425e+1		5.8476e+1	5.8462e+1			5.7128e+1	5 3401e+1	4.2208e+1	1.9021e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4 5400e-6
1e-4		5.5425e+1	5.5424e+1	5.5413e+1	5 5378e+1	5.5237e+1	5.4271e+1	5.1057e+1	4 1145e+1	1 9016e+1	9 0484e+0	4.0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-4	3.8902e+1 3 1583e+1	3.8902e+1 3 1583e+1	3.8902e+1 3.1583e+1	3.8898e+1	3 8886e+1 3 1574e+1	3 8836e+1	3.8491e+1 3.1359e+1	3 7301e+1	3.3146e+1 2 8302e+1	1 8776e+1 1 8200e+1	9.0484c+0 9.0479e+0	4 0937e+0 4.0937e+0			6 7668e-2 6 7668e-2	1.3476e-3 1.3476e-3	4.5400e-6
3e-4	2.7221e+1	2.7221e+1	2.7221e+1	2.7219e+1	2 7215e+1		2 7075e+1	3 0701e+1 2 6645e+1	2 5039e+1	1 7483e+1	9 04/9e+0	4.0937e+0 4.0937e+0			6.7668e-2	1.3476e-3	4 5400e-6
4e-4		2.4244e+1	2.7221e+1 2.4244e+1	2.7219e+1 2.4243e+1	2.4240e+1		2 4139e+1	2 3830e+1	2 2661e+1	1 6748e+1	9.0327e+0				6.7668e-2	1.3476e-3	4 5400e-6
5e-4 6e-4	2.4244e+1	2.4244e+1	2.4244e+1 2.2047e+1	2.4243e+1 2.2046e+1	2.4240e+1	2.2034e+1	2.1967e+1	2 1731e+1	2 0831e+1	1.6047e+1	9.0327e+0	4 0937e+0			6.7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6 4.5400e-6
7e-4	2.2047e+1	2.2047e+1	2.0339e+1	2.2040e+1	2.2044e+1	2.2034e+1	2.1907e+1	2 0089e+1	1 9368e+1	1.5397e+1	8.9732e+0	4 0937e+0		3 6788e-1	6.7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
8e-4	1.8963e+1	1.8963e+1	1.8963e+1	1.8963e+1	1.8961e+1	1 8955e+1	1 8911e+1	1 8758e+1	1 8164e+1	1.4801e+1	8.9732e+0 8 9243e+0	4 0937e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
9e-4	1.7823e+1	1.7823e+1	1.7823e+1	1.7823e+1	1.7822e+1	1.7816e+1	1.7780e+1	1 7651e+1	1.7151e+1	1.4255e+1	8.8643e+0			3.6788e-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
1e-3	1.6859e+1	1.6859e+1	1.7823e+1 1.6859e+1	1.7823e+1 1.6859e+1	1.7822e+1 1.6858e+1	1.7810c+1	1.7780e+1	1.6712e+1	1.7131e+1	1.4255e+1 1.3756e+1	8.8043e+0 8.7951e+0	4 0936e+0		3.6788e-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-3	1.1641e+1		1.1641e+1	1.1641e+1	1.1640e+1	1.1639e+1	1 1628e+1	1.0712e+1	1 1435e+1	1 0448e+1	7.9114e+0	4 0936e+0		3.6788e-1	6.7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6
2e-3 3e-3	9.3315e+0							9 3032c+0		8 6646e+0	7.9114e+0 7.0849e+0	4 0447e+0			6 7668e-2	1.3476e-3	4.5400e-6 4.5400e-6
	7.9563e+0		7.9563e+0			7 9555e+0	7 9517e+0	7 9379e+0	7 8833e+0	7 5177e+0	6 4188e+0	3 9673e+0			6 7668e-2		
4e-3	7.9363e+0 7.0187e+0		7.9363e+0 7.0187e+0					7 9379e+0 7 0056e+0		6 7028e+0	5 8836e+0	3 9673e+0 3 8670e+0		3 6788e-1	6 7668e-2	1.3476e-3 1.3476e-3	4.5400e-6
	6.3273e+0				6 3272e+0												4.5400e-6
6e-3	0.32/3e+0	0.32/30+0	6 3273e+0	0 32/3e+0	0 32 / 20+0	0 32090+0	0 32486+0	0 31 /40+0	0 28 / /c+0	0 08020+0	3 440Ue+U	3 7557e+0	1 2131e+0	3 6788e-1	6.7668e-2	1 3476c-3	4.5400e-6

β μ	0	0.00001	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
7e-3	5 7905e+0	5 7905e+0	5 7905e+0	5.7905e+0	5 7904e+0	5 7902e+0	5.7885e+0	5.7826e+0	5.7591e+0	5 5988e+0	5 0812e+0	3 6410e+0	1 2130e+0	3 6788e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
8e-3	5 3582e+0	5 3582e+0	5 3582e+0	5.3582e+0	5 3582e+0	5.3580e+0	5.3566e+0	5.3518e+0	5.3326e+0	5.2012e+0	4 7718e+0	3 5275e+0	1 2129e+0	3 6788e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
9e-3	5.0005e+0	5 0005e+0	5 0005e+0	5 0005e+0	5 0005e+0	5 0003e+0	4 9992e+0	4 9952e+0	4 9791e+0	4 8690e+0	4 5055e+0	3 4175e+0	1 2127e+0	3 6788e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
1e-2	4 6982e+0	4 6982e+0										3 3122e+0	1 2123e+0	3 6788e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
2e-2	3.0689e+0						3 0686e+0					2 5237e+0	1 1886e+0	3 6788e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
3e-2	2.3546e+0	2 3546e+0					2 3544e+0				2 2728e+0	2 0509e+0	1 1324e+0	3 6784e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
4e-2	1 9330e+0	1 9330e+0	1 9330e+0	1 9330e+0		1 9330e+0			1 9309e+0		1 8808e+0	1 7356e+0	1 0632e+0	3 6749e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
5e-2	1 6482e+0			1 6482e+0		1 6482e+0		1 6479e+0		1 6390e+0			9 9291e-1	3 6638e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
6e-2	1.4401e+0	1.4401e+0		1.4401e+0		1 4401e+0		1 4398e+0				1 3348e+0	9 2653e-1	3 6418e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
7e-2	1 2800e+0			1 2800e+0		1 2800e+0				1 2746e+0		1 1976e+0	8 6555e-1	3 6077e-1	6 7668e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
8e-2	1 1522e+0						1 1522e+0						8 1016e-1	3 5624e-1	6 7667e-2	1 3476e-3	4.5400e-6
9e-2	1 0474e+0	1 0474e+0		1.0474e+0		1 0474e+0					1 0334e+0	9 9268e-1	7 6001e-1	3 5072e-1	6 7667e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
1e-1	9 5962e-1	9 5959c-1	9 5950e-1	9 5915e-1	9 5666e-1	9 4786e-1	9 1369e-1	7.1461e-1	3 4443e-1	6.7664e-2	1 3476e-3	4 5400e-6					
2e-1	5 0579e-1	5.0579e-1	5.0579e-1	5 0579e-1	5 0579e-1	5.0579e-1	5.0579e-1	5 0576e-1	5.0566e-1	5.0493c-1	5.0235e-1	4 9218e-1	4 2763e-1	2 6833e-1	6 7008e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
3e-1	3 2451e-1	3 2450e-1	3 2445e-1	3 2412e-1	3 2294e-1	3 1827e-1	2 8772e-1	2 0366e-1	6 3818e-2	1 3476e-3	4.5400e-6						
4e-1	2 2687e-1	2.2687e-1	2 2687e-1	2 2687e-1	2 2687e-1	2 2687e-1	2.2687c-1	2 2687e-1	2 2684e-1	2 2666e-1	2 2601e-1	2 2343e-1	2 0633e-1	1 5645e-1	5 8364e-2	1 3476e-3	4 5400e-6
5e-1	1 6663e-1	1 6661e-1	1 6650e-1	1 6610e-1	1 6453c-1	1 5398e-1	1 2210e-1	5 1945e-2	1 3475e-3	4 5400e-6							
6e-1	1 2641e-1	1 2641e-1	1.2641e-1	1 2641e-1	1 2640e-1	1 2633e-1	1 2607e-1	1 2504e-1	1 1812e-1	9 6662e-2	4 5486c-2	1.3470e-3	4 5400e-6				
7e-1	9 8142c-2	9 8142e-2	9 8142c-2	9 8142e-2	9 8142e-2	9 8141e-2	9 8141e-2	9 8139e-2	9 8132c-2		9 7907e-2	9 7206e-2	9 2454e-2	7 7460e-2	3 9460e-2	1 3451e-3	4 5400e-6
8e-1	7 7526e-2	7.7526e-2	7 7526e-2	7 7526e-2	7 7526e-2	7.7526e-2	7 7526c-2	7 7524e-2	7 7519e-2		7 7360e-2	7 6865e-2	7 3494e-2	6 2711e-2	3 4053e-2	1 3401e-3	4 5400e-6
9e-1	6 2078e-2	6 2077e-2	6 2077e-2	6 2073e-2	6 2048e-2	6 1957e-2	6 1598e-2	5 9145e-2	5 1211e-2	2 9308e-2	1 3301e-3	4 5400e-6					
1e+0		5.0255e-2	5.0255e-2	5 0255e-2	5 0255e-2	5.0255e-2	5.0254e-2	5.0254e-2	5.0251e-2		5 0165e-2	4 9899e-2	4 8077e-2	4 2131e-2	2 5193e-2	1 3137e-3	4 5400e-6
2e+0		8,4907e-3	8 4907e-3	8 4907e-3	8.4907c-3	8 4907e-3	8 4907e-3	8.4906e-3	8 4904e-3		8.4824e-3	8 4574e-3	8 2847e-3	7 6974e-3	5.7486e-3	8 3096e-4	4 5310e-6
3e+0		1 9115e-3	1 9115e-3	1 9115e-3	19115e-3	1 9115e-3	1 9115c-3	1 9115e-3	1 9115e-3		1 9102e-3	1 9062e-3	1 8788e-3	1 7842e-3	1 4519e-3	3 5492e-4	4 2359e-6
4e+0		4 8901e-4	4.8900c-4		4 8875e-4	4 8797c-4	4 8252e-4	4 6357e-4	3 9504c-4	1 3076e-4	3 2350e-6						
5e+0		1 3467e-4	1.3467e-4	1 3467e-4		1 3461e-4	1 3444e-4	1 3321e-4	1 2891e-4	1 1308e-4	4 5521e-5	1 9903e-6					
6e+0		3 8924e-5	3 8924e-5	3 8924e-5	3.8924e-5	3 8924e-5	3 8924e-5	3 8924e-5	3 8924e-5		3.8910e-5	3 8866e-5	3 8565e-5	3 7509e-5	3.3566e-5	1 5489e-5	1 0438e-6
		1 1642e-5	1.1642e-5	1 1642c-5	1.1642e-5			1 1627e-5	1 1549e-5	1 1274e-5	1 0237e-5	5 2245e-6	4 9122e-7				
8e+0		3 5726e-6	3.5726e-6	3.5726e-6	3.5726e-6				3 5473e-6	3 4725e-6	3 1887e-6	1 7581e-6	2 1485e-7				
9e+0				1 1183e-6		1 1183e-6		1 1183e-6	1 1183e-6	1 1183e-6	1 1181e-6	1 1172e-6	1 1112e-6	1 0902e-6	1 0100e-6	5.9208e-7	8 9331e-8
le+l	3.5559e-7	3.3369e-7	3 3369e-/	3 3309e-/	3 3369e-/	3 3309e-7	3 3369c-7	3 3369e-7	3.3369e-7	3.5567e-7	3.5561e-7	3 5537e-7	3 5365e-7	3 4757e-7	3.2431e-7	1 9982e-7	3 5838e-8

П р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Vandenberg, 1977; Kruseman, Ridder, 1994.

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Функция расхода G(u) для скважин с постоянным понижением (самоизливающиеся скважины) в пластах без перетекания

Функция:
$$G(u) = \frac{4u}{\pi} \int_{0}^{\infty} \tau \exp\left(-u\tau^{2}\right) \left[\frac{\pi}{2} + \arctan\frac{Y_{0}(\tau)}{J_{0}(\tau)}\right] d\tau$$
.

Условные обозначения:

 $J_0(\beta), Y_0(\beta)$ — функции Бесселя (Приложение 2); W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26).

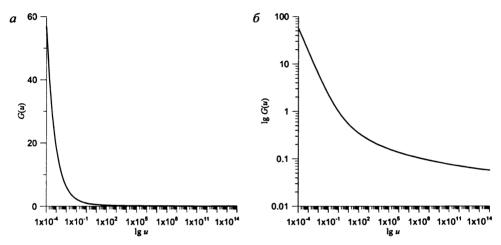


Рис. П15. Зависимость функции (а) и логарифма функции (б) от логарифма аргумента.

Аппроксимация:

Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.05	$G(u) \approx 0.5 + \frac{1}{\sqrt{\pi u}} (1)$
$0.05 \le u \le 3$	$G(u) = \begin{bmatrix} 0.985285352 - 0.6990572583(\lg u) + 0.3617096836(\lg u)^2 - \\ -0.1933285166(\lg u)^3 + 0.02384555597(\lg u)^4 + \\ +0.113819123(\lg u)^5 + 0.1394865128(\lg u)^6 + 0.0400202701(\lg u)^7 \end{bmatrix} $ (2)
	$G(u) = \begin{bmatrix} 0.9640284025 - 0.5853545608(\lg u) + 0.1426085197(\lg u)^2 + \\ + 0.008430131774(\lg u)^3 + 0.03620076922(\lg u)^4 - \\ - 0.04772201769(\lg u)^5 + 0.01800303964(\lg u)^6 - 0.002262080907(\lg u)^7 \end{bmatrix} $ (2)
u > 500	$G(u) \approx 2/\ln(2.25u); \ G(u) \approx 2/W[1/(4u)] \ (1)$

Примечание. (1) – Jacob, Lohman, 1952; Hantush, 1964c; (2) – подобрано автором.

В связи со сложным решением данного интеграла рекомендуется использовать следующие выражения [*Jacob, Lohman*, 1952]:

– решение для четных степеней числа 10 (например, 10^2 , 10^4 , $7 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^8$, $8.1 \cdot 10^{10}$ и т.д.):

$$G(10^{n}) = \frac{1}{100\pi} \left\{ \frac{2}{100} G_{0}(10^{n}, m10^{-2-n/2}) + \frac{1}{100} \sum_{m=1}^{9} (2m+1) [G_{0}(10^{n}, m10^{-2-n/2}) + G_{0}(10^{n}, (m+1)10^{-2-n/2})] + \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) [G_{0}(10^{n}, m10^{-1-n/2}) + G_{0}(10^{n}, (m+1)10^{-1-n/2})] \right\};$$

– решение для нечетных степеней числа 10 (например, 10^1 , 10^3 , $5 \cdot 10^7$, $4 \cdot 10^{11}$, $3.6 \cdot 10^5$ и т.д.):

$$G(10^{n}) = \frac{1}{1000\pi} \begin{cases} \frac{2}{100} G_{0}(10^{n}, m10^{-5/2 - n/2}) + \\ + \frac{1}{100} \sum_{m=1}^{9} (2m+1) [G_{0}(10^{n}, m10^{-5/2 - n/2}) + G_{0}(10^{n}, (m+1)10^{-5/2 - n/2})] + \\ + \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) [G_{0}(10^{n}, m10^{-3/2 - n/2}) + G_{0}(10^{n}, (m+1)10^{-3/2 - n/2})] \end{cases}$$

где

$$n=\lg u$$
 — степень числа 10; $G_0(u,\beta)=\exp\left(-u\beta^2\right)\left\lceil \frac{\pi}{2} + \arctan\frac{Y_0(\beta)}{J_0(\beta)} \right\rceil$.

Значения функции G(u) для аргумента $u = 10^{-4} \div 10^{15}$

N	N-10-4	N-10 ⁻³	N·10 ⁻²	N-10 ⁻¹	N-10°	N-10 ¹	N·102	N·10 ³	N·104	N·10 ⁵	N·10 ⁶	N·10 ⁷	N·108	N-109	N·10 ¹⁰	N-10 ¹¹
1	56.9	18.34	6.13	2.249	0.985	0.534	0.346	0.251	0.1964	0.1608	0.1360	0.1177	0.1037	0.0927	0.0838	0.0764
2	40.4	13.11	4.47	1.716	0.803	0.461	0.311	0.232	0.1841	0.1524	0.1299	0.1131	0.1002	0.0899	0.0814	0.0744
3	33.1	10.79	3.74	1.477	0.719	0.427	0.294	0.222	0.1777	0.1479	0.1266	0.1106	0.0982	0.0883	0.0801	0.0733
4	28.7	9.41	3.30	1.333	0.667	0.405	0.283	0.215	0.1733	0.1449	0.1244	0.1089	0.0968	0.0872	0.0792	0.0726
5	25.7	8.47	3.00		0.630	0.389	0.274	0.210	0.1701	0.1426	0.1227	0.1076	0.0958	0.0864	0.0785	0.0720
6	23.5	7.77	2.78	1.160	0.602	0.377	0.268	0.206	0.1675	0.1408	0.1213	0.1066	0.0950	0.0857	0.0779	0.0716
7	21.8	7.23	2.60	1.103	0.580	0.367	0.263	0.203	0.1654	0.1393	0.1202	0.1057	0.0943	0.0851	0.0774	0.0712
- 8	20.4	6.79	2.46	1.057	0.562	0.359	0.258	0.200	0.1636	0.1380	0.1192	0.1049	0.0937	0.0846	0.0770	0.0709
9	19.3	6.43	2.35	1.018	0.547	0.352	0.254	0.198	0.1621	0.1369	0.1184	0.1043	0.0932	0.0842	0.0767	0.0706
10	18.3	6.13	2.25	0.985	0.534	0.346	0.251	0.1964	0.1608	0.1360	0.1177	0.1037	0.0927	0.0838	0.0764	0.0704
	N-10 ¹²	N-10 ¹³	N·1014	N·1015												
	A A 60 A	0.000	0.0404	0.000												

Примечание. Значения функции взяты из [Jacob, Lohman, 1952].

<u>Литература:</u> Jacob, Lohman, 1952; Hantush, 1964с.

Функция расхода $G(u, \beta)$ для скважин с постоянным понижением (самонзливающиеся скважины) в пластах с перетеканием

Функция: $G(u,\beta) = \frac{\beta K_1(\beta)}{K_0(\beta)} + \frac{4}{\pi^2} \exp\left(-u\beta^2\right) \int_0^\infty \frac{1}{J_0^2(\tau) + Y_0^2(\tau)} \frac{\tau \exp\left(-u\tau^2\right)}{\tau^2 + \beta^2} d\tau$. Предельное значение функции: G(u,0) = G(u).

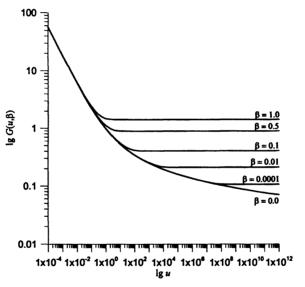


Рис. П16. Зависимость логарифма функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Условные обозначения:

G(u) – функция расхода в пластах без перетекания (Приложение 15);

 $J_0(\beta)$, $K_0(\beta)$, $K_1(\beta)$, $Y_0(\beta)$ — функции Бесселя (Приложения 2);

 $W(u, \beta)$ – функция влияния скважины в пластах с перетеканием (Приложение 27).

Аппроксимация [Hantush,	1904cj:
Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.01	$G(u,\beta) \approx G(u,0)$
$u\beta^2 > 1$	$G(u,\beta) \approx 2/W(0.25u^{-1},\beta)$

Значения функции $G(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-4}\div 10^{12}$; $\beta=0, \beta=10^{-5}\div 1.0$.

Значения функции $G(u, \beta)$

		1.10-6	2-10-5	4-10-5	6-10-5	8-10-5	1-10-4	2-10-4	4.10-4	6-10-4	8-10-4	1.10-3	2-10-3	4-10-3	6·10 ⁻³	8·10 ⁻³	1-10-2	2-10-2	4-10-2	6-10-2	8-10-2	0.1	0.5	1.0
1e-4	56 9	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56 918	56 918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.918	56.919	56.923
2e-4	40.4	40 392	40.392	40.392	40.392	40.392	40.392	40.392	40 392	40.392	40 392	40.392	40.392	40.392	40 392	40.392	40.392	40.392	40.392	40.392	40 392	40.392	40.394	40.400
3e-4	33.1	33.071	33 071	33.071	33.071	33.071	33.071	33.071	_33 071	33.071	33.071	33 071	33.071	33.071	33.071	33 071	33.071	33.071	33.071	33.071	33.071	33.071	33.074	
4e-4	28.7	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28 707	28.707	28 707	28.707	28 707	28.707	28 707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.707	28.710	28.718
5e-4	25.7	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25 728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25.728	25 728	25.731	25.741
6e-4	23.5	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23 530	23.530		23.530	23 530	23,530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.530	23.533	23.543
7e-4	21.8	21 821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21 821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.821	21.824	21 836
8e-4	20.4	20.443	20 443	20.443	20 443	20.443	20 443	20 443	20 443	20.443	20.443	20 443	20.443	20.443	20.443	20 443	20.443	20.443	20.443	20.443	20 443	20.443	20.447	
9e-4	19.3	19.302	19 302	19.302	19.302	19.302	19 302	19.302	19.302	19 302	19 302	19.302	19.302	19.302	19 302	19.302	19.302	19.302	19.302	19 302	19.302	19.302	19.306	19.319
1e-3	18 34	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18.337	18 337	18.337	18.337	18 337	18.337	18.341	18 355
2e-3	13.11	13.110	13.110	13 110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.110	13 110	13,110	13.110	13 110	13 110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.110	13.116	13.135
3e-3	10.79	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10 793	10.793	10 793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.793	10.794	10 801	10.824
4e-3	9.41	9.4122	9 4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4122	9 4122	9.4122	9.4122	9.4122	9.4123	9.4124	9 4125	9.4211	9.4478
5e-3	8.47	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8.4694	8 4694	8.4695	8 4695	8.4695	8.4695	8.4695	8.4695	8.4696	8 4697	8.4698	8.4794	8.5093
6e-3	7.77	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7.7734	7 7734	7.7735	7.7736	7.7737	7.7739	7.7843	7.8171
7e-3	7.23	7 2324	7.2324	7 2324	7.2324	7.2324	7.2324	7.2324	7.2324	7.2324	7.2324	7.2324		7.2324	7.2324	7 2324	7.2324	7 2324	7.2324	7.2325	7.2327	7.2328	7.2442	
8e-3	6.79	6.7961	6 7961	6.7961	6.7961	6.7961	6 7961	6.7961	6.7961	6.7961	6.7961	6.7961	6.7961	6 7961	6 7961	6.7961	6.7961	6.7961	6.7962	6.7963	6.7964	6.7966	6.8087	6 8465
9e-3	6.43	6 4347	6.4347	6.4347	6.4347	6.4347	6 4347	6 4347	6 4347	6 4347	6.4347	6.4347	6 4347	6.4347	6 4347	6.4347	6.4347	6 4347	6 4348	6.4349	6.4351	6.4352	6.4481	6.4882
1e-2	6.13	6.1289	6.1289	6.1289	6.1289	6 1289	6 1289	6 1289	6.1289	6.1289	6.1289	6.1289	6 1289	6.1289	6 1289	6 1289	6.1289	6 1289	6.1290	6.1291	6.1293	6.1295	6.1430	6 1853
2e-2	4.47	4 4716	4.4716	4.4716	4.4716	4.4716	4 4716	4.4716	4.4716	4 4716	4.4716	4.4716	4.4716		4 4716	4.4716	4.4716	4 4717	4.4718	4 4719	4.4721	4.4724	4 4916	4 5513
	3.74		3.7361	3.7361	3.7361	3.7361	3.7361	3.7361	3.7361	3 7361	3.7361	3.7361	3.7361	3 7361	3 7361	3 7361	3.7361	3.7361	3.7362	3.7364	3.7367	3.7370	3.7605	3.8335
4e-2	3.30	3 2968	3.2968	3.2968	3.2968	3.2968	3.2968	3 2968	3.2968	3 2968	3.2968	3.2968	3 2968	3.2968	3 2968	3 2968	3.2968 2.9966	3.2969 2.9966	3 2970 2.9968	3.2972 2.9970	3 2975	3.2979 2.9978	3.3250	3.4092
5e-2	3.00	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2 9966	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2.9966	2 9966	2 9966	2.9966	2.7747	2 7748	2.7751	2.9974	2.7760	3.0282	3.1221
6e-2	2.78	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2.7746	2 7746	2.7746			2 7746	2.7746	2,6019	2 6019	2 6021	2.6024	2.7733	2.7/60	2.8092 2.6392	2.9120
7e-2	2.60	2 6019	2.6019	2.6019	2.6019	2 6019	2.6019	2.6019	2.6019	2.6019	2.6019	2 6019	2.6019	2.6019	2 6019	2 6019	2.4624	2 4625	2 4627	2.4630	2.4634	2 4640		2 7500
8e-2	2 46		2.4624	2.4624	2.4624	2.4624	2.4624	2.4624	2 4624	2.4624	2.4624	2 4624	2.4624	2.4624	2 4624	2.4624	2.3468	2.3468	2.3470	2.3473	2.4634		2.5024	2.6206
9e-2	2 35	2 3467	2.3467	2.3467	2.3467	2.3467	2.3467 2.2488	2.3467	2 3467 2 2488	2.3467	2.3467	2.3467	2.3467	2.3467	2 3467 2 2488	2 3467 2 2488	2.2488	2.3468	2.2490	2.2494	2.2499	2 3484	2 3891	2 5 1 4 4
	2.249	2.2488	2.2488	2.2488	2.2488	1.7152	1.7152	1.7152	1.7152	1.7152	1 7152	2.2488 1.7152	2.2488 1 7152	2.2488 1.7152	1 7152	1 7152	1.7152	1.7153	1 7156	1.7161	1.7169	1.7178	1 7784	2.4253
	1.716	1 7152	1.7152	1.7152	1 7152 1 4763	1.4763	1.4763	1.4763	1.4763	1.4763	1.4763	1./152	1 4763	1.4763	1.4763	1.4763	1.4763	1.4764	1.4768	1.4774	1.4783	1.4794	1.5537	1.9620
	1.477	1.4763	1.4763	1.4763		1.3325	1.3325	1.3325	1 3325	1 3325	1 3325	1.3325	1.3325	1.3325	1 3325	1 3325	1.3325	1 3326	1 3331	1 3338	1.3348	1.3361	1 4218	1 7748
	1.333	1.3325	1.3325	1.3325	1.3325	1.2336	1 2336	1.2336	1.2336	1 2336	1.2336	1.2336	1.2336	1.2336	1 2336	1.2336	1 2336	1 2337	1 2342	1 2350	1.2362	1.2376	1.3334	1.6099
	1.234	1.2336	1 2336	1.2336	1 1600	1 1600	1.1600	1 1600	1.1600	1.1600	1.1600	1.1600	1.1600	1.1600	1.1600	1.1600	1 1601	1.1602	1.1607	1.1616	1.1629	1.1645	1.2692	1.5673
	1 160	1 1600	1.1600	1.1600	1 1025	1.1025	1.1025	1 1025	1 1025	1 1025	1 1025	1 1025	1 1025	1.1025	1 1025	1.1025	1 1025	1.1026	1.1032	1.1042	1.1056	1.1043	1.2203	
	1.103	1.1025	1.1025	1.1025	1 0558	1.0558	1.1023	1 0558	1.0558	1 0558	1.0558	1 0558	1 0558	1.1025	1 0558	1.1025	1 0558	1 0560	1.0566	1.0576	1.0591	1.10/3	1.1815	1.5372
	1 057	1.0558	1 0558	1.0558	1.0169	1.0358	1.0358	1 0169	1.0558	1.0169	1.0358	1.0169	1.0169	1.0558	1 0169	1.0169	1 0169	1.0171	1.0177	1.0376	1.0391	1.0224		1.5151
	1.018	1.0169	1.0169	1.0169	0.9838	0.9838	0 9838	0.9838	0.9838	0.9838	0.9838	0.9838	0.9838	0.9838	0 9838	0 9838	0.9838	0 9840	0.9847	0 9859	0 9875	0 9896	1.1501	1.4984
	0 985	0.9838	0 9838	0.9838	0.8006	0.8006	0.8006	0.8006	0.8006	0.9838	0.8006	0.8006	0.9838	0.8006	0 8006	0 8006	0.8007	0 8009	0.8019	0 8036	0.8060	0 8090	0.9951	1.4856
	0 803	0.8006	0.8006	0.8006	0.8008	0.8008	0.8008	0.8008	0.8008	0 7162	0.8008	0.8006	0 7162	0.8006	0 7162	0 7163	0.8007	0 7166	0.7179	0 7200	0.7229	0.7267		1.4395
	0 719	0 7162	0.7162	0.7162	0 6644	0.6644	0 6644	0.6644	0.6644	0 6644	0 6644	0.7162	0 6644	0.7162	0 /162	0 6645	0 6645	0 6649	0.6664	0 6688	0.7229	0.7267	0.9493	1 4319
4e+0	0 667	0 6644	0.6644	0.6644	0 0044]	0.00441	0 0044	0.0044	0.00441	0 00441	0 0044]	0.0044	0 0044	U 0044	0 0044	0 0043	0 3043	0 0047	0.0004]	0 0000	0.0722	0 0/00	0.9275	1.4302

<u> </u>	0	1-10-5	2.10-5	4.10-5	6-10-5	8-10-5	1.10-4	2.10⁴	4.10-4	6.10-4	8-10-4	1.10-3	2.10-3	4·10 ⁻³	6-10-3	8-10-1	1.10-2	2.10-2	4-10-2	6-10-2	8-10-2	0.1	0.5	1.0
5e+0	0 630	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6282	0 6283	0 6283	0 6287	0 6304	0 6332	0 6370	0 6420	0 9156	1 4298
6e+0	0 602	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6009	0 6010	0 6010	0 6015	0 6033	0 6064	0 6107	0 6161	0 9086	1 4297
7e+0	0 580	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5793	0 5794	0 5794	0 5800	0 5820	0 5853	0 5900	0 5959	0 9044	1 4296
8e+0	0 562	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5616	0 5617	0 5618	0 5623	0 5645	0 5681	0 5731	0 5795	0 9016	1 4296
9e+0	0 547	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5467	0 5468	0 5468	0 5469	0 5475	0 5498	0 5536	0 5590	0 5658	0 8998	1 4296
1e+1	0 534	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339	0 5339 0 4612	0 5339 0 4612	0 5340 0 4613	0 5340	0 5341	0 5347	0 5372	0 5413	0 5470	0 5542	0 8986	1 4296
2e+1	0.461 0.427	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4611	0 4261	0 4261	0 4262	0 4262	0 4613 0 4264	0 4614	0 4624	0 4661	0 4401	0 4805 0 4506	0 4910 0 4636	0 8960 0 8959	1 4296 1 4296
3e+1 4e+1	0 427	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4040	0 4041	0 4041	0 4043	0 4044	0 4059	0 4114	0 4205	0 4328	0 4480	0 8959	1 4296
5e+1	0.389	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3882	0 3883	0 3884	0 3885	0 3887	0 3903	0 3967	0 4071	0 4210	0 4379	0 8959	1 4296
6e+1	0.377	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3761	0 3762	0 3763	0 3765	0 3767	0 3785	0 3857	0 3972	0 4124	0 4309	0 8959	1 4296
7e+1	0.367	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3664	0 3665	0 3666	0 3668	0 3670	0 3690	0 3769	0 3895	0 4060	0 4258	0 8959	1 4296
8e+1	0 359	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3583	0 3584	0 3586	0 3588	0 3590	0 3612	0 3698	0 3833	0 4010	0 4220	0 8959	1 4296
9e+1	0 352	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3515	0 3516	0 3518	0 3520	0 3523	0 3546	0 3638	0 3783	0 3971	0 4190	0 8959	1 4296
1e+2	0 346	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3456	0 3457	0 3459	0 3461	0 3464	0 3489	0 3587	0 3741	0 3938	0 4167	0 8959	1 4296
2e+2	0 311	0 3108	0 3108	0 3108	0 3108	0 3 1 0 8	0 3 1 0 8	0 3108	0 3108	0 3108	0 3 1 0 8	0 3108	0 3109	0 3110	0 3113	0 3117	0 3121	0 3 1 6 1	0 3310	0 3532	0 3797	0 4081	0 8959	1 4296
3e+2	0 294	0 2933	0 2933	0 2933	0 2933	0.2933	0 2933	0 2933	0 2933	0 2933	0 2934	0 2934	0 2934	0 2936	0 2940	0 2945	0 2951	0 3003	0 3192	0 3427	0 3760	0 4065	0 8959	1 4296
4e+2	0 283	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2820	0 2821	0 2821	0 2824	0 2828	0 2834	0 2842	0 2904	0 3127	0 3410	0 3747	0 4061	0 8959	1 4296
5e+2	0 274	0 2738	0 2738	0 2738	0 2738	0.2738	0 2738	0 2738	0 2738	0 2738	0 2738	0 2738	0 2739	0 2742	0 2747	0 2754	0 2763	0 2835	0 3087	0 3401	0 3743	0 4060	0 8959	1 4296
6e+2	0 268	0 2674 0 2622	0.2674	0 2674	0 2674	0 2674 0 2622	0 2674	0.2674 0.2622	0 2674 0 2623	0 2674 0 2623	0 2674	0 2675 0 2623	0 2675 0 2624	0 2679 0 2628	0 2685 0 2634	0 2693 0 2643	0 2703 0 2654	0 2784	0 3060	0 3396	0 3741	0 4060 0.4060	0.8959	1 4296
7e+2 8e+2	0 263 0 258	0 2579	0.2622	0 2622	0 2579	0 2579	0 2579	0 2622	0 2579	0 2579	0 2579	0 2579	0 2524	0 2585	0 2592	0 2602	0 2614	0 2744	0 3042	0 3391	0 3740	0.4060	0 8959	1 4296
9e+2	0 254	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2542	0 2544	0 2548	0 2556	0 2566	0 2580	0 2686	0 3019	0 3391	0 3739	0.4060	0 8959	1.4296
1e+3	0 251	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2510	0 2511	0 2516	0 2525	0 2536	0 2550	0 2663	0 3012	0 3390	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+3	0 232	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2315	0 2316	0 2318	0 2326	0 2340	0 2358	0 2382	0 2553	0 2990	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+3	0 222	0 2214	0 2214	0 2214	0 2214	0 2214	0 2214	0 2214	0 2214	0 2215	0 2215	0 2215	0 2218	0 2229	0 2247	0 2272	0 2303	0 2515	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+3	0 215	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2148	0 2149	0 2152	0 2166	0 2189	0 2219	0 2256	0 2498	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+3	0 210	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2099	0 2100	0 2104	0 2121	0 2147	0 2182	0 2224	0 2490	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+3	0 206	0 2060	0 2060	0 2060	0 2060	0 2060	0 2060	0 2060	0 2060	0 2061	0 2061	0 2062	0 2067	0 2085	0 2115	0 2155	0 2202	0 2486	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+3	0 203	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2029	0 2030	0 2030	0 2036	0 2057	0 2090	0 2134	0 2186	0 2483	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+3	0 200	0 2002	0 2002	0 2002	0 2002	0 2002	0 2002	0 2002	0 2002	0 2003	0 2003	0 2004	0 2010	0 2033	0 2070	0 2118	0 2173	0 2482	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+3	0 198 0 1964	0 1979	0 1979 0 1959	0 1979 0 1959	0 1979	0 1979 0 1959	0 1979	0 1979 0 1959	0 1980 0 1960	0 1980 0 1960	0 1981	0 1982 0 1962	0 1988 0 1969	0 2013	0 2053 0 2039	0 2104	0 2163	0 2481	0 2988 0 2988	0 3389	0 3739	0 4060 0 4060	0 8959 0 8959	1.4296
1e+4 2e+4	0 1964	0 1939	0 1937	0 1837	0 1837	0 1837	0 1939	0 1939	0 1838	0 1839	0 1840	0 1841	0 1853	0 1899	0 1966	0 2044	0 2125	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+4	0 1777	0 1772	0 1772	0 1772	0 1772	0 1772	0 1772	0 1772	0 1773	0 1774	0 1776	0 1778	0 1795	0 1855	0 1939	0 2030	0 2119	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+4	0 1733	0 1729	0 1729	0 1729	0 1729	0 1729	0 1729	0 1729	0 1730	0 1731	0 1733	0 1736	0 1757	0 1830	0 1926	0 2025	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+4	0 1701	0 1697	0 1697	0 1697	0 1697	0 1697	0 1697	0 1697	0 1698	0 1700	0 1702	0 1705	0 1730	0 1814	0 1920	0 2024	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+4	0 1675	0 1671	0 1671	0 1671	0 1671	0 1671	0 1671	0 1672	0 1673	0 1675	0 1678	0 1681	0 1709	0 1804	0 1916	0 2023	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+4	0 1654	0 1650	0 1650	0 1650	0 1650	0 1650	0 1650	0 1651	0 1652	0 1654	0 1657	0 1661	0 1693	0 1796	0 1914	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+4	0 1636	0 1632	0 1632	0 1632	0 1633	0 1633	0 1633	0 1633	0 1634	0 1637	0 1641	0 1645	0 1680	0 1791	0 1913	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+4	0 1621	0 1617	0 1617	0 1617	0 1617	0 1617	0 1617	0 1618	0 1619	0 1622	0 1626	0 1631	0 1669	0 1787	0 1912	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+5	0 1608	0 1604	0 1604	0 1604	0 1604	0 1604	0 1604	0 1604	0 1606	0 1609	0 1613	0 1619	0 1660	0 1784	0 1912	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+5	0 1524	0 1520	0 1520	0 1520 0 1475	0 1520	0 1520 0 1476	0 1521	0 1521	0 1525	0 1530 0 1489	0 1537 0 1499	0 1546 0 1511	0 1613 0 1596	0 1775 0 1774	0 1911	0 2022 0 2022	0 2118	0 2480 0 2480	0 2988 0 2988	0 3389	0 3739	0 4060 0 4060	0 8959 0 8959	1 4296
3e+5 4e+5	0 1479	0 1475 0 1445	0 1475	0 14/5	0 1475 0 1445	0 14/6	0 14/6	0 1477 0 1447	0 1481	0 1489	0 1475	0 1490	0 1588	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+5	0 1449	0 1443	0 1422	0 1443	0 1443	0 1443	0 1443	0 1447	0 1433	0 1462	0 1473	0 1475	0 1584	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+5	0 1428	0 1404	0 1404	0 1404	0 1404	0 1425	0 1405	0 1407	0 1415	0 1428	0 1445	0 1465	0 1582	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+5	0 1393	0 1389	0 1389	0 1389	0 1390	0 1390	0 1390	0 1392	0 1402	0 1416	0 1435	0 1457	0 1581	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+5	0 1380	0 1377	0 1377	0 1377	0 1377	0 1377	0 1378	0 1380	0 1390	0 1406	0 1427	0 1451	0 1581	0 1774		0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+5	0 1369	0 1366	0 1366	0 1366	0 1366	0 1366	0 1367	0 1370	0 1381	0 1398	0 1421	0 1446	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+6	0 1360	0 1356	0 1356	0 1356	0 1356	0 1357	0 1357	0 1360	0 1373	0 1391	0 1415	0 1443	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+6	0 1299	0 1296	0 1296	0 1296	0 1296	0 1297	0 1298	0 1303	0 1324	0 1355	0 1391	0 1428	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+6	0 1266	0 1263	0 1263	0 1263	0 1264	0 1265	0 1266	0 1273	0 1302	0 1342	0 1384	0 1425	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+6	0 1244	0 1240	0 1241	0 1241	0 1242	0 1243	0 1244	0 1254	0 1289	0 1335	0 1382	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+6	0 1227	0 1224	0 1224	0 1224	0 1225	0 1226	0 1228	0 1240	0 1281	0 1332	0 1381	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+6	0 1213	0 1210	0 1210	0 1211	0 1212	0 1213	0 1215	0 1229	0 1276	0 1330	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296

" A	0	1.10-5	2.10-5	4.10-5	6·10 ⁻⁵	8·10 ⁻⁵	1.10-4	2.10-4	4.10-4	6-10-4	8-10-4	1 10-3	2.10-3	4·10 ³	6·10 ³	8-103	1-10 2	2 10 '	4-10-2	6 10-2	8-10-2	0.1	0.5	1.0
7e+6	0 1202	0 1199	0 1199	0 1200	0 1201	0 1203	0 1205	0 1221	0 1272	0 1329	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+6	0 1192	0 1190	0 1190	0 1191	0 1192	0 1194	0 1196	0 1214	0 1269	0 1328	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+6	0 1184	0 1182	0 1182	0 1183	0 1184	0 1186	0 1188	0 1208	0 1267	0 1328	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+7	0 1177	0 1174	0 1175	0 1175	0 1177	0 1179	0 1182	0 1203	0 1265	0 1328	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+7	0 1131	0 1129	0 1129	0 1131	0 1134	0 1138	0 1142	0 1177	0 1260	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+7	0 1106	0 1104	0 1104	0 1107	0 1111	0 1116	0 1123	0 1168	0 1260	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+7	0 1089	0 1087	0 1087	0 1091	0 1096	0 1102	0 1111	0 1163	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+7	0 1076	0 1074	0 1075	0 1078	0 1085	0 1093	0 1102	0 1161	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+7	0 1066	0 1063	0 1065	0 1069	0 1076	0 1085	0 1096	0 1160	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+7	0 1057	0 1055	0 1056	0 1061	0 1069	0 1080	0 1092	0 1159	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+7	0 1049	0 1048	0 1049	0 1055	0 1064	0 1075	0 1088	0 1159	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+7	0 1043	0 1041	0 1043	0 1049	0 1059	0 1071	0 1086	0 1159	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+8	0 1037	0 1036	0 1037	0 1044	0 1055	0 1068	0 1083	0 1159	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+8	0 1002	0 1001	0 1004	0 1016	0 1034	0 1054	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+8	0 0982	0 0981	0 0986	0 1003	0 1025	0 1050	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+8	0 0968	0 0968	0 0974	0 0995	0 1021	0 1048	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+8	0 0958	0 0958	0 0966	0 0990	0 1019	0 1048	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+8	0 0950	0 0951	0 0959	0 0986	0 1018	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+8	0 0943	0 0944	0 0954	0 0984	0 1018	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+8	0 0937	0 0939	0 0949	0 0982	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+8	0 0932	0 0934	0 0946	0 0981	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+9	0 0927	0 0930	0 0943	0 0980	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+9	0 0899	0 0905	0 0926	0 0977	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+9 4e+9	0 0883	0 0893	0 0920	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+9	0 0872	0 0880	0 0916	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580 0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+9	0.0857	0 0876	0 0915	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911		0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060		1 4296
7e+9	0 0851	0 0873	0 0915	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+9	0 0846	0 0871	0 0915	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+9	0 0842	0 0869	0 0915	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+10	0 0838	0 0867	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+10	0 0814	0 0862	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+10	0 0801	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+10	0 0792	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+10	0 0785	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+10	0 0779	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+10	0 0774	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+10	0 0770	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+10	0 0767	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+11	0 0764	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
2e+11	0 0744	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
3e+11	0 0733	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
4e+11	0 0726	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
5e+11	0 072	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
6e+11	0 0716	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
7e+11	0 0712	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0.2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
8e+11	0 0709	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
9e+11	0 0706	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296
1e+12	0 0704	0 0860	0 0914	0 0976	0 1017	0 1047	0 1072	0 1158	0 1259	0 1327	0 1380	0 1424	0 1580	0 1774	0 1911	0 2022	0 2118	0 2480	0 2988	0 3389	0 3739	0 4060	0 8959	1 4296

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции G(u,0) взяты из [Hantush, 1959b]. Остальные значения рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1959b, 1964с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

Функция $H(u, \beta)$

Функция:
$$H(u,\beta) = \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau-u)}}\right) d\tau$$
,

где $\operatorname{erfc} u$ – кратный интеграл вероятностей (Приложение 4).

Предельное значение функции: H(u,0) = W(u),

где W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

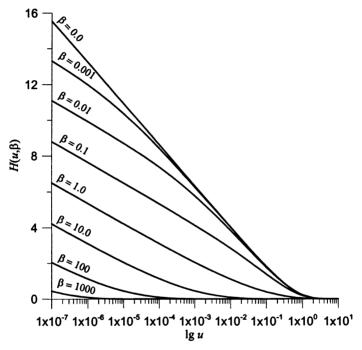


Рис. П17. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация [Hantush, 1960]:

Диапазон	Зависимость
$u > 10^4 \beta^2$	$H(u,\beta) \approx W(u) - \frac{4\beta}{\sqrt{\pi u}} \left[0.258 + 0.693 \exp\left(-\frac{u}{2}\right) \right]$
$u < 10^{-5} \beta^{-2}$ и $u < 10^{-4} \beta^2$	$H(u,\beta) \approx \frac{1}{2} \ln \frac{0.044}{u\beta^2}$

Значения функции $H(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-7} \div 10$, $\beta=0, \beta=10^{-4} \div 500$.

Значения функции $H(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = \mathbf{0} \div \mathbf{0.1}$

\\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\	0	0.0001	0.0002	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1
<u> </u>	8		80	80	88	80	80	- 00	0 0	80	
16-7	1.55409e+1	1.49791e+1	1 46038e+1	1 39253e+1	1 33190e+1	1 26701e+1	1.17806e+1	1.10964e+1	1 04077e+1	9.49424e+0	8 80218e+0
2e-7	1.48477e+1	1.44248e+1	1 41148e+1	1.35094e+1	1.29361e+1	1.23052e+1	1.14266e+1	1.07461e+1	1.00593e+1	9.14701e+0	8 45539e+0
3e-7	1.44423e+1 1.41546e+1	1 40866e+1 1.38409e+1	1.38135e+1 1.35928e+1	1.32552e+1 1.30694e+1	1.27058e+1 1.25390e+1	1 20884e+1 1 19327e+1	1.12182e+1 1 10696e+1	1.05406e+1 1.03944e+1	9 85522e+0 9.71021e+0	8 94377e+0 8.79950e+0	8 25249e+0 8 10850e+0
4e-7 5e-7	1.39314e+1	1.36473e+1	1 34178e+1	1.29219e+1	1 24074e+1	1.18108e+1	1.09539e+1	1.02807e+1	9.71021e+0	8.68756e+0	7 99680e+0
6e-7	1.37491e+1	1.34873e+1	1.32723e+1	1.27990e+1	1.22983e+1	1.17102e+1	1.08589e+1	1 01876e+1	9 50551e+0	8.59605e+0	7.90552e+0
7e-7	1.35950e+1	1.33507e+1	1.31477e+1	1.26935e+1	1.22049e+1	1 16246e+1	1.07784e+1	1.01088e+1	9 42757e+0	8.51866e+0	7 82834e+0
8e-7	1.34614e+1	1 32316e+1	1 30385e+1	1 26008e+1	1.21231e+1	1 15498e+1	1.07083e+1	1.00404e+1	9 36001e+0	8 45161e+0	7.76147e+0
9e-7 1e-6	1.33437e+1 1.32383e+1	1.31259e+1 1.30308e+1	1 29413e+1 1 28536e+1	1.25180e+1 1.24432e+1	1 20502e+1 1 19843e+1	1 14835e+1 1.14238e+1	1 06464e+1 1.05909e+1	9.98002e+0 9.92590e+0	9.30037e+0 9.24697e+0	8.39244e+0 8.33950e+0	7.70249e+0 7.64972e+0
2e-6	1.25451e+1	1.23949e+1	1 22610e+1	1.19319e+1	1 15356e+1	1 10212e+1	1.02211e+1	9 56772e+0	8.89466e+0	7.99082e+0	7 30240e+0
3e-6	1.21397e+1	1.20157e+1	1.19030e+1	1.16175e+1	1.12594e+1	1.07765e+1	1.00007e+1	9.35609e+0	8.68753e+0	7.78647e+0	7.09909e+0
4e-6	1.18520e+1	1.17439e+1	1.16445e+1	1.13878e+1	1.10569e+1	1 05981e+1	9.84199e+0	9.20475e+0	8.53997e+0	7.64126e+0	6 95476e+0
5e-6	1.16289e+1 1.14465e+1	1.15318e+1 1.13576e+1	1 14417e+1 1.12746e+1	1.12059e+1 1.10551e+1	1.08959e+1 1.07618e+1	1.04566e+1 1 03390e+1	9.71739e+0	9 08659e+0 8.98947e+0	8 42513e+0 8 33101e+0	7.52848e+0	6 84275e+0 6 75119e+0
6e-6 7e-6	1.14463e+1	1.13376e+1 1.12099e+1	1.12/46e+1	1.09260e+1	1.06467e+1	1 03390e+1	9.61451e+0 9.52671e+0	8 90693e+0	8 25122e+0	7.43622e+0 7 35814e+0	6 67375e+0
8e-6	1.11589e+1	1.10815e+1	1.10086e+1	1.08130e+1	1.05456e+1	1.01494e+1	9 45000e+0	8 83508e+0	8.18193e+0	7.29044e+0	6 60664e+0
9e-6	1.10411e+1	1.09680e+1	1 08990e+1	1.07126e+1	1 04554e+1	1 00702e+1	9.38180e+0	8.77142e+0	8.12066e+0	7.23067e+0	6 54743e+0
1e-5	1 09357e+1	1 08663e+1	1 08005e+1	1.06221e+1	1.03740e+1	9.99872e+0	9.32036e+0	8.71424e+0	8 06573e+0	7.17715e+0	6 49444e+0
2e-5	1.02426e+1	1.01931e+1	1 01455e+1	1 00128e+1	9.81970e+0	9.50974e+0	8.90449e+0	8.33151e+0	7 70106e+0	6.82384e+0	6 14536e+0
3e-5 4e-5	9.83713e+0 9.54946e+0	9.79659c+0 9.51427c+0	9.75731e+0 9.48005e+0	9 64642e+0 9.38267e+0	9.48152e+0 9 23587e+0	9.20845e+0 8 98783e+0	8.65045e+0 8.46468e+0	8.10135e+0 7.93464e+0	7 48447e+0 7.32899e+0	6.61593e+0 6.46772e+0	5 94068e+0 5 79518e+0
5e-5	9 32632e+0	9.29481e+0	9.26407e+0	9 17613e+0	9.04229e+0	8.81284e+0	8.31719e+0	7.80312e+0	7.20719e+0	6.35229e+0	5 68213e+0
6e-5	9.14401e+0	9.11521e+0	9 08706e+0	9 00621e+0	8.88227e+0	8 66742e+0	8.19437e+0	7.69410e+0	7.10681e+0	6.25765e+0	5 58963e+0
7e-5	8.98987e+0	8.96319e+0	8 93706e+0	8.86179e+0	8.74575e+0	8.54279e+0	8.08886e+0	7.60076e+0	7 02127e+0	6.17736e+0	5 51132e+0
8e-5	8.85635e+0	8.83138e+0	8 80689e+0	8 73617e+0	8.62663e+0	8 43362e+0	7.99620e+0	7.51899e+0	6 94666c+0	6 10761e+0	5 44340e+0
9e-5 1e-4	8.73858e+0 8 63322e+0	8 71502e+0 8.61087e+0	8 69189e+0 8.58890e+0	8.62497e+0 8.52521e+0	8.52091e+0 8.42585e+0	8 33641e+0 8 24875e+0	7.91348e+0 7.83868e+0	7.44613e+0 7.38035e+0	6.88042e+0 6 82080e+0	6.04592e+0 5 99059e+0	5 38342e+0 5.32971e+0
2e-4	7.94018e+0	7.92434e+0	7.90869e+0	7 86289e+0	7.79010e+0	7.65638e+0	7.32767e+0	6.93212e+0	6.41902e+0	5 62263e+0	4 97473e+0
3e-4	7.53481e+0	7.52187e+0	7.50906e+0	7.47138e+0	7.41101e+0	7.29850e+0	7.01353e+0	6.65634e+0	6.17498e+0	5 40354e+0	4.76548e+0
4e-4	7 24723e+0	7 23602e+0	7.22490e+0	7 19214e+0	7.13937e+0	7 04016e+0	6.78403e+0	6.45413e+0	5.99710e+0	5 24596e+0	4 61610e+0
5e-4	7.02419e+0 6 84197e+0	7.01416e+0 6 83281e+0	7.00421e+0	6.97482e+0	6.92733e+0	6 83749e+0	6.60239e+0	6 29344e+0	5.85616e+0	5 12233e+0	4 49964e+0 4.40404e+0
6e-4 7e-4	6 68791e+0	6.67944e+0	6.82372e+0 6.67102e+0	6 79684e+0 6.64610e+0	6.75329e+0 6.60564e+0	6 67053e+0 6.52848e+0	6.45171e+0 6.32278e+0	6.15963e+0 6.04473e+0	5.73895e+0 5.63836e+0	5.02032e+0 4 93331e+0	4.40404e+0
8e-4	6.55448e+0	6.54656e+0	6 53868e+0	6 51535e+0	6.47739e+0	6.40481e+0	6 21001e+0	5.94389e+0	5.55008e+0	4 85734e+0	4 25230e+0
9e-4	6.43680e+0	6.42933e+0	6 42190e+0	6.39988e+0	6.36402e+0	6.29527e+0	6.10972e+0	5.85394e+0	5.47131e+0	4.78983e+0	4 18983e+0
1e-3	6.33154e+0	6.32445e+0	6 31741e+0	6 29650e+0	6 26242e+0	6.19695e+0	6.01938e+0	5.77270e+0	5.40011e+0	4.72904e+0	4 13376e+0
2e-3 3e-3	5 63939e+0 5.23493e+0	5 63440e+0 5.23086e+0	5 62942e+0 5.22681e+0	5.61461e+0 5.21472e+0	5.59031e+0 5.19485e+0	5.54310e+0 5.15603e+0	5.41153e+0 5.04649e+0	5.22032e+0 4.88377e+0	4.91391e+0 4.61488e+0	4.31839e+0 4.06834e+0	3 75985e+0 3 53628e+0
4e-3	4 94824e+0	4 94473e+0	4.94123e+0	4.93078e+0	4.91357e+0	4.87985e+0	4.78398e+0	4.63962e+0	4.39626e+0	3.88597e+0	3 37506e+0
5e-3	4.72610e+0	4.72296e+0	4.71984e+0	4 71052e+0	4.69514e+0	4 66495e+0	4.57864e+0	4 44746e+0	4 22310e+0	3.74150e+0	3 24834e+0
6e-3	4 54477e+0	4 54192e+0	4.53908e+0	4.53059e+0	4.51657e+0	4 48900e+0	4.40990e+0	4 28880e+0	4 07941e+0	3.62145e+0	3.14364e+0
7e-3	4 39162e+0 4 25908e+0	4.38899e+0 4 25663e+0	4.38636e+0 4.25418e+0	4.37852e+0	4.36556e+0	4.34006e+0	4.26663e+0	4.15359e+0	3.95642e+0	3.51850e+0	3 05426e+0 2 97617e+0
9e-3	4.14229e+0	4.13999e+0	4.23418e+0 4 13769e+0	4.24686e+0 4.13080e+0	4.23476e+0 4.11942e+0	4 21093e+0 4.09697e+0	4.14214e+0 4.03206e+0	4.03575e+0 3.93129e+0	3.84882e+0 3 75314e+0	3.42826e+0 3.34783e+0	2 90678e+0
1e-2	4 03793e+0	4 03575e+0	4.03357e+0	4 02706e+0	4.01628e+0	3.99502e+0	3.93342e+0	3.83747e+0	3.66696e+0	3 27524e+0	2.84427e+0
2e-2	3.35471e+0	3.35320e+0	3.35170e+0	3.34721e+0	3.33976e+0	3.32500e+0	3.28183e+0	3.21337e+0	3 08804e+0	2.78292e+0	2 42276e+0
3e-2	2.95912e+0	2 95792e+0	2.95672e+0	2.95314e+0	2.94719e+0	2.93538e+0	2.90070e+0	2.84526e+0	2.74234e+0	2.48443e+0	2.16806e+0
4e-2 5e-2	2.68126e+0 2.46790e+0	2.68025e+0 2.46701e+0	2.67923e+0 2.46612e+0	2.67620e+0 2.46346e+0	2.67115e+0 2.45904e+0	2.66114e+0 2.45026e+0	2.63164e+0 2.42436e+0	2.58424e+0 2.38260e+0	2.49553e+0 2.30398e+0	2.26911e+0 2.10071e+0	1 98416e+0 1 84008e+0
6e-2	2 29531e+0	2.29451e+0	2.29372e+0	2.29134e+0	2.43304e+0	2.43020e+0 2.27953e+0	2.25631e+0	2.21880e+0	2.14785e+0	1 96265e+0	1 72170e+0
7e-2	2 15084e+0	2.15012e+0	2.14939e+0	2.14724e+0	2 14365e+0	2 13651e+0	2.11541e+0	2.08124e+0	2.01641e+0	1.84585e+0	1.62134e+0
8e-2	2.02694e+0	2.02628e+0	2.02562e+0	2.02364e+0	2.02034e+0	2 01379e+0	1 99441e+0	1.96297e+0	1.90316e+0	1 74482e+0	1.53435e+0
9e-2 1e-1	1.91874e+0 1.82292e+0	1.91813e+0 1 82235e+0	1.91752e+0 1.82178e+0	1.91569e+0	1.91264e+0	1.90658e+0	1.88863e+0	1.85948e+0	1 80390e+0	1 65596e+0 1 57679e+0	1.45771e+0 1.38930e+0
2e-1	1.22265e+0	1.22231e+0	1.22197e+0	1.82008e+0 1.22096e+0	1.81724e+0 1.21927e+0	1.81159e+0 1 21590e+0	1.79487e+0 1.20590e+0	1.76767e+0 1.18954e+0	1.71571e+0 1.15796e+0	1 07140e+0	9.49752e-1
3e-1	9.05677e-1	9.05440e-1	9.05203e-1	9.04495e-1	9.03316e-1	9.00965e-1	8.93970e-1	8.82503e-1	8.60261e-1	7 98625e-1	7 10332e-1
4e-1	7.02380e-1	7 02203e-1	7.02027e-1	7 01498e-1	7.00617e-1	6 98861e-1	6.93631e-1	6.85045e-1	6.68347e-1	6.21765e-1	5.54263e-1
5e-1	5.59774e-1	5 59637e-1	5.59499e-1	5.59089e-1	5 58406e-1	5 57042e-1	5 52981e-1	5.46307e-1	5.33304e-1	4 96868e-1	4.43647e-1
7e-1	4.54380e-1 3.73769e-1	4.54270e-1 3.73681e-1	4.54161e-1 3.73592e-1	4.53835e-1 3.73328e-1	4.53291e-1 3 72888e-1	4 52207e-1 3.72010e-1	4 48974e-1 3 69392e-1	4 43659e-1 3 65084e-1	4.33288e-1 3.56672e-1	4 04134e-1 3.32963e-1	3 61299e-1 2.97971e-1
8e-1	3.10597e-1	3.10524e-1	3.10452e-1	3.73328e-1 3 10235e-1	3.09874e-1	3.09154e-1	3 07006e-1	3.03470e-1	2.96559e-1	2.77042e-1	2.48132e-1
9e-1	2.60184e-1	2.60124e-1	2.60064e-1	2.59884e-1	2.59585e-1	2.58988e-1	2 57208e-1	2 54276e-1	2 48542e-1	2.32322e-1	2 08224e-1
1e+0	2.19384e-1	2.19334e-1	2.19284e-1	2.19134e-1	2.18884e-1	2.18385e-1	2 16897e-1	2.14447e-1	2.09651e-1	1.96067e-1	1.75835e-1
2e+0	4 89005e-2	4.88899e-2	4.88793e-2	4.88475e-2	4.87945e-2	4.86887e-2	4.83729e-2	4.78520e-2	4.68298e-2	4.39135e-2	3 95122e-2
3e+0 4e+0	1.30484e-2 3.77935e-3	1.30456e-2 3.77856e-3	1.30428e-2 3.77777e-3	1.30345e-2 3.77539e-3	1.30207e-2 3.77143e-3	1.29931e-2 3 76352e-3	1.29106e-2 3 73992e-3	1.27744e-2 3.70094e-3	1.25069e-2 3 62431e-3	1.17414e-2 3 40470e-3	1.05799e-2 3 07047e-3
5e+0	1.14830e-3	1 14806e-3	1.14782e-3	3.7/339e-3 1.14710e-3	1.14591e-3	1 14352e-3	1 13641e-3	1 12466e-3	1.10154e-3	1.03523e-3	9.34120e-4
6e+0	3.60082e-4	3.60008e-4	3.59933e-4	3.59710e-4	3.59338e-4	3.58595e-4	3.56376e-4	3.52710e-4	3.45499e-4	3.24798e-4	2 93189e-4
	1.15482e-4	1.15458e-4	1.15434e-4	1.15363e-4	1.15244e-4	1.15007e-4	1.14298e-4	1.13127e-4	1.10823e-4	1.04206e-4	9 40927e-5
8e+0	3.76656e-5	3.76579e-5	3.76501e-5	3.76269e-5	3.75882e-5	3.75112e-5	3.72808e-5	3.69001e-5	3.61510e-5	3.39983e-5	3 07056e-5
1e+1	1.24474e-5 4.15697e-6	1.24448e-5 4.15612e-6	1.24423e-5 4.15527e-6	1.24346e-5	1.24218e-5 4.14847e-6	1.23965e-5	1.23205e-5	1.21950e-5 4.07288e-6	1.19481e-5 3.99056e-6	1.12381e-5 3.75388e-6	1 01516e-5 3.39144e-6
		************************	7.155276-0	4.15272e-6	7.1704/6-0	4.14001e-6	4.11470e-6	7.072000-0	3.770300-0	3.,33000-01	3.37.770-0

Значения функции $H(u,\beta)$ для аргумента $\beta=0.2\div500$

		3114	тепии ф	ушкции	11 (4, 1)	ј для ар	1 y MICHII	p = 0.2	2 - 300		
<u>"</u>	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200	500
0	- 00	∞	œ	- 00	- 00	- 00	- 00	- 00	α0	∞ ∞	- 00
1e-7	8 10984e+0	7.19481e+0	6.50327e+0	5.81295e+0	4 90415e+0	4.22208e+0	3.54859e+0	2.68240e+0	2.05911e+0	1 48165e+0	8.28479e-1
2e-7	7.76337e+0	6.84881e+0	6 15784e+0	5.46852e+0	4.56230e+0	3.88394e+0	3.21686e+0		1.76334e+0	1.21711e+0	6.25650e-1
3e-7 4e-7	7.56070e+0 7.41692e+0	6 64649e+0 6 50300e+0	5.95596e+0 5.81282e+0	5.26738e+0 5 12484e+0	4.36304e+0 4.22205e+0	3.68738e+0 3.54858e+0	3 02491e+0 2.88983e+0	2 18534e+0 2.05911e+0	1.59666e+0 1.48165e+0	1 07166e+0 9.73105e-1	5.20307e-1 4.51853e-1
5e-7	7.41692e+0	6.39173e+0	5.70185e+0	5 01439e+0	4.11293e+0	3.44134e+0	2.78577e+0	1.96253e+0	1.39445e+0	8.99491e-1	4.02441e-1
6e-7	7.21427e+0		5.61123e+0	4 92424e+0	4.02395e+0		2 70125e+0	1.88455e+0		8 41270e-1	3 64487e-1
7e-7	7 13724e+0	6.22401e+0	5 53465e+0	4.84807e+0	3.94885e+0		2.63016e+0	1.81931e+0	1.26658e+0	7 93445e-1	3.34106e-1
8e-7	7.07050e+0	6 15746e+0	5.46833e+0	4.78214e+0	3.88390e+0	3.21684e+0	2.56888e+0	1.76334e+0	1.21711e+0	7.53082e-1	3 09055e-1
9e-7	7.01164e+0	6.09878e+0	5 40986c+0	4.72403e+0	3.82670e+0	3.16090e+0	2.51506e+0	1.71440e+0	1.17410e+0	7.18319e-1	2.87935e-1
1e-6	6.95899e+0		5.35758e+0	4.67208e+0	3.77559e+0		2.46712e+0	1 67097e+0	1.13615e+0	6.87902e-1	2.69814e-1
2e-6	6 61262e+0	5.70125e+0	5 01409e+0	4.33122e+0	3.44128e+0	2.78574e+0	2.15684e+0	1.39445e+0	8.99489e-1	5.04489e-1	1.68469e-1
3e-6	6 41003e+0	5.49965e+0	4.81364e+0	4.13267e+0	3.24747e+0	2.59843e+0	1.98009e+0	1.24092e+0	7.72462e-1	4.11236e-1	1.22958e-1
40-6	6 26630e+0 6.15482e+0	5.35673e+0 5.24596e+0	4.67166e+0 4.56170e+0	3.99226e+0 3 88364e+0	3.11090e+0 3.00556e+0	2 46708e+0 2.36617e+0	1.85713e+0 1.76331e+0	1.13614e+0 1.05742e+0	6.87899e-1	3.51576e-1 3 09054e-1	9 63649e-2 7 87592e-2
5e-6 6e-6	6.06373e+0		4.47197e+0	3.79510e+0	2.91992e+0	2.28442e+0	1.68773e+0	9.94853e-1	6 25646e-1 5 77016e-1	2 76747e-1	6 62012e-2
7e-6	5.98672e+0		4.39619e+0	3.72040e+0	2.84783e+0	2.21581e+0	1.62463e+0	9.43226e-1	5.37504e-1	2.51132e-1	5.67842e-2
8e-6	5.92001e+0		4 33062e+0	3 65581e+0	2 78563e+0	2.15679e+0	1.57058e+0	8 99479e-1	5.04485e-1	2.30194e-1	4.94628e-2
9e-6	5 86117e+0		4 27284e+0	3 59894e+0		2.10504e+0	1 52340e+0	8.61665e-1	4.76302e-1	2.12679e-1	4 36127e-2
1e-5	5.80854e+0	4.90239e+0	4 22120e+0	3.54815e+0	2.68223e+0	2.05903e+0	1.48161e+0	8.28466e-1	4.51848e-1	1 97761e-1	3 88365e-2
2e-5	5.46229e+0	4.55982e+0	3.88270e+0	3.21624e+0	2.36599e+0	1 76323e+0	1 21706e+0	6.25632e-1	3 09049e-1	1.16593e-1	1.65808e-2
3e-5	5.25974e+0		3.68586e+0	3.02416e+0	2.18505e+0	1.59652e+0	1 07160e+0	5.20287e-1	2 40164e-1	8 17898e-2	9.29819e-3
4e-5	5.11603e+0		3.54683e+0	2 88897e+0	2.05877e+0	1.48149e+0	9.73032e-1	4.51831e-1	1.97756e-1	6 21272e-2	5.91625e-3
5e-5	5.00454e+0 4.91345e+0	4.10901e+0 4.01965e+0	3.43939e+0 3.35188e+0	2.78481e+0 2.70020e+0	1.96216e+0 1.88414e+0	1.39428e+0 1.32442e+0	8.99412e-1 8.41185e-1	4.02417e-1 3.64462e-1	1.68461e-1 1 46792e-1	4 94612e-2 4.06358e-2	4.05814e-3 2.92808e-3
6e-5 7e-5	4.91343e+0 4.83642e+0		3.33188e+0 3.27811e+0		1.81888e+0	1.26638e+0	7.93354e-1	3.04462e-1	1 30014e-1	3.41530e-2	2.19178e-3
8e-5	4 76969e+0	3.87894e+0	3.21438e+0	2.56767e+0	1.76287e+0	1 21689e+0	7.52987e-1	3 09029e-1	1.16587e-1	2 92058e-2	1 68736e-3
9e-5	4.71083e+0	3 82144e+0	3.15829e+0	2.51378e+0	1.71391e+0	1.17388e+0	7.18220e-1	2.87907e-1	1 05572e-1	2.53194e-2	1.32827e-3
1e-4	4.65817e+0	3 77006e+0	3.10824e+0	2 46577e+0	1.67046e+0	1.13591e+0	6.87799e-1	2 69786e-1	9 63569e-2	2 21957e-2	1 06476e-3
2e-4	4 31157e+0	3 43348e+0	2.78189e+0	2.15496e+0	1.39374e+0	8.99172e-1	5.04358e-1	1.68437e-1	4.94553e-2	8 42701e-3	2.06688e-4
3e-4	4 10864e+0	3 23794e+0	2.59373e+0	1.97780e+0	1.24008e+0	7.72091e-1	4.11089e-1	1.22925e-1	3 15172e-2	4.35501e-3	6.68746e-5
4e-4	3.96454e+0	3 09992e+0	2.46168e+0	1.85452e+0	1.13519e+0	6.87486e-1	3.51416e-1	9 63321e-2	2.21908e-2	2.59720e-3	2.74975e-5
5e-4	3 85268e+0	2 99332e+0	2.36016e+0	1.76041e+0	1.05638e+0	6.25198e-1	3.08886e-1	7.87267e-2	1 65751e-2	1 68691e-3	1.30538e-5 6.83065e-6
6e-4 7e-4	3.76121e+0 3.68383e+0	2 90653e+0 2.83339e+0	2.27786e+0 2.20875e+0	1 68458e+0 1.62124e+0	9.93725e-1 9.42024e-1	5.76540e-1 5.37003e-1	2.76572e-1 2.50952e-1	6.61692e-2 5.67527e-2	1.28816e-2 1.03032e-2	1.16058e-3 8.32585e-4	3.83732e-6
8e-4	3 61674e+0	2.77021e+0	2.14926e+0	1.56698e+0	8.98211e-1	5.03962e-1	2.30009e-1	4.94320e-2	8.42355e-3	6.16711e-4	2 27641e-6
9e-4	3.55753e+0	2.71464e+0		1.51961e+0	8.60336e-1	4.75760e-1	2.12490e-1	4.35826e-2	7 00747e-3	4.68556e-4	1 41024e-6
1e-3	3.50454e+0	2.66505e+0	2 05065e+0	1.47763e+0	8.27081e-1	4.51288e-1	1.97570e-1	3.88070e-2	5.91244e-3	3.63445e-4	9 05141e-7
2e-3	3.15492e+0	2.34197e+0	1.75164e+0	1.21165e+0	6.23844e-1	3.08376e-1	1.16389e-1	1.65573e-2	1.68530e-3	5 51000e-5	
3e-3	2 94941e+0	2.15588e+0	1.58256e+0	1.06517e+0	5.18239e-1	2.39432e-1	8.15864e-2	9.27920e-3	7.13042e-4	1.49954e-5	
4e-3	2 80301e+0	2.02534e+0		9.65797e-1	4 49592e-1	1.96989e-1	6 19285e-2	5.90053e-3	3.62781e-4	5.37310e-6	
5e-3	2.68907e+0	1.92502e+0	1.37670e+0	8.91497e-1	4.00030e-1	1.67672e-1	4 92687e-2	4.04490e-3	2.06091e-4	2.27101e-6	
6e-3 7e-3	2 59570e+0 2.51654e+0	1 84370e+0 1.77543e+0	1.30537e+0 1 24600e+0	8.32682e-1 7.84331e-1	3.61956e-1 3.31475e-1	1.45990e-1 1.29203e-1	4.04500e-2 3.39740e-2	2 91678e-3 2.18203e-3	1.26137e-4 8.15081e-5	1.07361e-6 5.50787e-7	
8e-3	2.44780e+0	1 71666e+0	1.19531e+0	7.84331e-1 7.43498e-1	3.06340e-1	1.15772e-1	2.90334e-2	1.67886e-3	5 49058e-5	3 00865e-7	
9e-3	2.38703e+0	1.66512e+0	1.15117e+0	7 08308e-1	2.85147e-1	1.04755e-1	2.51533e-2	1.32081e-3	3.82281e-5	1 72761e-7	
1e-2	2.33255e+0	1.61927e+0	1 11217e+0	6.77500e-1	2.66965e-1	9.55404e-2	2.20357e-2	1.05815e-3	2.73442e-5	1 03338e-7	
2e-2	1.97140e+0	1.32395e+0	8 67662e-1	4.91351e-1	1.65294e-1	4 86885e-2	8.31338e-3	2.04234e-4	2.25181e-6		
3e-2	1.75791e+0	1.15702e+0	7 35308e-1	3.96443e-1	1.19691e-1	3.08184e-2	4.27002e-3	6.57114e-5	3.99221e-7		
4e-2	1.60563e+0	1.04161e+0	6 46685e-1	3.35638e-1	9.30910e-2	2.15556e-2	2.53124e-3	2.68700e-5	1 01637e-7		
5e-2 6e-2	1.48724e+0 1.39048e+0	9.54020e-1 8.83829e-1	5 81159e-1 5 29803e-1	2.92275e-1 2.59327e-1	7.55189e-2 6.30150e-2	1.59963e-2 1.23522e-2	1.63432e-3 1.11780e-3	1.26860e-5 6.60201e-6			
7e-2	1.30876e+0	8.25525e-1	4.87970e-1	2.3932/e-1 2.33214e-1	5.36628e-2	9.81723e-3	7.97226e-4	3.68875e-6			
8e-2	1.23813e+0	7.75846e-1	4.52944e-1	2.11883e-1	4.64118e-2	7.97590e-3	5 87100e-4	2.17645e-6			
9e-2	1 17604e+0	7.32704e-1	4 23005e-1	1.94057e-1	4.06346e-2	6.59371e-3	4 43489e-4	1.34104e-6			
1e-1	1.12070e+0	6.94681e-1	3.97000e-1	1.78893e-1	3.59320e-2	5.52887e-3	3.42027e-4	8.56099e-7			
2e-1	7.66473e-1	4.60280e-1	2.45190e-1	9.70631e-2	1.43306e-2	1.48284e-3	4.89925e-5				
3e-1	5.73880e-1 4 48247e-1	3.38953e-1	1.72934e-1	6.28606e-2	7.52058e-3	5.90997e-4	1.26074e-5				
4e-1 5e-1	3.59106e-1	2.61936e-1 2.08253e-1	1.29560e-1	4.41450e-2 3 25174e-2	4.48172e-3 2.88038e-3	2.83397e-4 1.51778e-4	4.27297e-6 1.70861e-6				
6e-1	2.92672e-1	1.68750e-1	1.00564e-1 7.99196e-2	2.47284e-2	1.94771e-3	8.75896e-5	7.64239e-7				
7e-1	2.41532e-1	1.38630e-1	6.45980e-2	1.92420e-2	1.36647e-3	5.33702e-5	3.70973e-7				
8e-1	2.01248e-1		5.28874e-2	1.52360e-2	9.86006e-4	3.39007e-5	1.91740e-7				
9e-1	1.68966e-1	9.63234e-2	4.37381e-2	1.22305¢-2	7.27474e-4	2.22566e-5	1.04176e-7				
1e+0	1.42747e-1	8.11640e-2	3.64673e-2	9.92739e-3	5.46527e-4	1.50109e-5					
2e+0	3.21653e-2	1.80342e-2	7.60287e-3	1.73413e-3	5.50836e-5	6.83411e-7					
3e+0	8.62436e-3	4.80714e-3	1.96412e-3	4.05842e-4	9.11283e-6						
4e+0 5e+0	2.50498e-3 7.62504e-4	1.39167e-3 4.22720e-4	5.57831e-4	1.07976e-4	1.88678e-6						
6e+0	2.39421e-4	1.32534e-4	1.67245e-4 5.19389e-5	3.08859e-5 9.25560e-6	4.44715e-7 1.14067e-7						
7e+0	7.68603e-5	4.25002e-5	1.65348e-5	2.86484e-6	1.1 -00/0"/						
8e+0	2.50881e-5	1 38608e-5	5.36168e-6	9.08056e-7							
9e+0	8.29600e-6	4.58032e-6	1.76354e-6	2.93096e-7							
1e+1	2.77197e-6	1.52960e-6	5.86664e-7					· •	· I	ı	

П р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1960.

Функция $I(u, \beta)$

Функция:
$$I(u,\beta) = e^{-\beta} \int_{1}^{\infty} \exp\left(-u\tau + \frac{\beta}{\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau}$$
.

Предельное значение функции: I(u,0) = W(u),

где W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

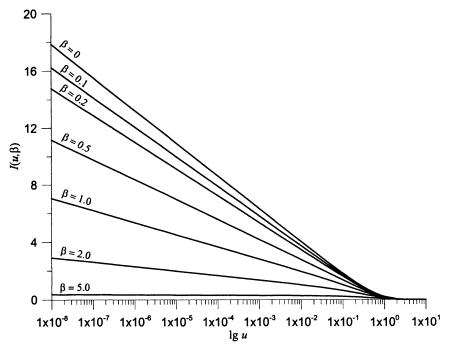


Рис. П18. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация [Hantush, 1964b]:

Диапазон	Зависимость
β < 0.1	$I(u,\beta) \approx e^{-\beta} \left\{ (1-u\beta) W(u) + \beta e^{-u} \right\}$
<i>u</i> < 0.01	$I(u,\beta) \approx e^{-\beta} \left\{ (1-u\beta)[W(\beta)-W(10u\beta)+W(0.1)] + ue^{\beta} + 10u\beta e^{-0.1} - 0.1\exp(10u\beta) \right\}$

Значения функции $I(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-8}\div 10.0$; $\beta=0,\,\beta=10^{-4}\div 10.0$.

Значения функции $I(u, \beta)$

	•	0.0001	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1e-8	17.84347	17.84178	17.82663	17.67584	17.02139	16.23823	14.78131	13.45885	12.25835	11.16842	10.17879	9.28010	8.46392	7.72256	7.04907	2.91341	1.29952	0.65040	0.37626	0.25150	0.18860	0.15283	0.12994	0.11383
								12.94536					8.15246	7.44074	6.79408	2.81960	1.26501	0.63771	0.37159	0.24979	0.18797	0.15259	0.12986	0.11379
3e-8	16.74485	16.74328	16.72912	16.58816	15.97636	15.24417	13.88184	12.64498	11.52193	10.50208	9.57585	8.73455	7.97028	7.27589	6.64492	2.76473	1.24482	0.63028	0.36886	0.24878	0.18760	0.15246	0.12981	0.11378
								12.43186				8.59169	7.84101	7.15893	6.53908	2.72579	1.23050	0 62501	0.36692	0.24807	0.18734	0.15236	0.12977	0.11376
								12.26655				8.48088	7.74075	7.06821	6.45699	2.69559	1.21939	0.62093	0.36542	0.24752	0.18713	0.15229	0.12975	0.11375
								12.13149						6.99408	6.38992	2.67092	1.21031	0.61759	0.36419	0.24706		0.15222	0.12972	0.11375
								12.01729						6.93141	6.33321			0.61476	0.36315	0.24668				0.11374
								11.91837					7.52956	6.87712		2.63199						0.15213		0.11373
								11.83111							6.24076							0.15209		0.11373
								11.75306						6.78639								0.15205		0.11372
								11.23956					7.11784									0.15182		
								10.93918						6.33973		2.45310			0.35334					
								10.72606					6.80639							0.24236		0.15159	******	
								10.36076						6.13204		2.38397			0.34990	0.24181				0.11365
								10.42369			7.84716		6.55494	6 05792	5.48614	2.35930				0.24136				0.11364
								10.21257						5.94095					0.34763		0.18473		0.12942	0.11363
								10.12531			7.70923		6.44202		5.39368				0.34594	0.24064			0.12940	0.11363
								10.04726			7.65141		6.39467		5.35492			0.56606	0.34523	0.24009			0.12939	0.11362
								9.53376						5.56841	5.09992	2.19635	1.07024	0.55336	0.34323	0.23837		0.15128	0.12938	0.11362
								9.23338						5.40356			1.01553			0.23737		0.15091	0.12924	0.11357
				11.74400					8.24214		6.89058			5.28659		2.10254					0.18314		0.12920	0.11355
				11.52308													0.99010				0.18293			0.11354
				11.34257				8.71988						5.12173			0.98102					0.15068		0.11354
7e-6	11.29239	11.29136	11.28210	11.18996	10.78981	10.31057	9.41773	8.60568	7.86701	7.19497	6.58345	6.02690	5.52030	5.05906	4.63903	2,02679	0.97334		0.33212			0.15063		0.11353
8e-6	11.15886	11.15785	11.14871	11.05775	10.66280	10.18974	9.30840	8.50676	7.77750	7.11398	6.51016	5.96059	5.46029	5.00476	4.58991	2.00872				0.23493		0.15058	0.12912	
9e-6	11.04108	11.04008	11.03104	10.94114	10.55076	10.08317	9.21196	8.41950	7.69854	7.04253	6.44552	5.90210	5.40737	4.95687	4.54657	1.99277	0.96082	0.52580	0.33042	0.23464	0.18239	0.15054	0.12910	0.11352
1e-5	10.93572	10.93473	10.92579	10.83683	10.45054	9.98783	9.12570	8.34144	7.62791	6.97863	6.38769	5.84977	5 36002	4.91403	4.50781	1.97851	0.95558	0.52387	0.32971	0.23438	0.18230	0.15051	0.12909	0.11351
2e-5	10.24258	10.24166	10.23334	10.15059	9.79120	9.36065	8.55819	7.82793	7.16326	6.55818	6.00726	5.50554	5.04853	4.63218	4.25278	1.88467	0.92105	0.51116	0.32503	0.23266	0.18166	0.15027	0.12900	0.11348
3e-5	9.83713	9.83624		9.74917			8.22622	7.52754	6.89145	6.31223	5.78470	5.30416	4.86631	4.46730	4.10358	1 82977	0.90084	0.50373	0.32229	0.23165	0.18129	0.15013	0.12895	0.11346
		9.54860											4 73702		3.99771		0 88650	0.49845	0 32035	0.23093	0.18103	0.15004	0.12891	0.11344
				9.24344					6 54899		5.50430				3.91559		0.87537			0.23037	0.18082	0.14996	0.12888	0.11343
	-			9.06295						5.89175		4.95986			3.84849					0.22992	0.18065	0.14989	0.12886	0.11342
				8.91034				6.89979						4.12268			0.85859		0.31656		0.18051	0.14984	0.12884	0.11341
				8.77814				6.80086														0.14979	0.12882	0.11341
9e-5	8.73858	8.73780	8.73084	8.66154	8.36051	7.99971	7.32671	6.71359	6.15492	5.64575	5.18162	4 75843	4.37249	4.02045	3.69923	1.68092	0 84604	0 48354	0.31485	0.22890	0.18027	0.14975	0.12881	0.11340

	0	0.0001	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
16-4	8.63322	8.63246	8.62559	8.55724	8.26029	7.90437	7.24044	6.63552	6 08427	5.58183	5.12377	4 70608	4.32512	3.97758	3 66044	1 66664	0 84078	0.48160	0.31414	0.22863	0.18017	0.14972	0.12879	0.11339
2e-4	7.94018	7 93948	7.93324	7.87108	7.60101	7.27720	6 67288	6.12191	5 61948	5.16122	4.74314	4 36163	4.01341	3 69549	3.40516	1.57258	0.80611	0 46881	0.30941	0 22688	0.17952	0.14946	0.12869	0.11335
3e-4	7 53481	7.53416	7.52828	7.46974	7.21538		6.34087	5.82144	5.34755	4 91511	4.52040	4.16005		3 53038	3 25572	1 51747	0.78577	0 46129	0.30662	0.22584	0.17912	0.14931	0.12862	0.11332
<u>4e-4</u>	7 24723	7.24661	7.24098	7.18501	6 94178			5.60822	5.15457	4 74045	4.36232	4.01697			3.14963	1 47831	0 77129	0.45593	0 30462	0.22509				
5e-4	7.02419	7.02358	7.01816	6.96418	6.72958	6.44818		5.44283	5.00486	4 60494	4.23966	3.90594		3.32220	3.06730	1 44789	0 76004	0 45175	0.30307	0 22450		0.14910	0.12853	0.11327
6e-4	6.84197	6 84138	6 83612	6.78377	6.55622	6.28323		5.30768	4 88253	4.49420	4.13942	3 81520		3.24784	2.99998	1 42300	0 75082	0 44833	0.30178	0.22401	0.17841	0.14902	0.12849	
7e-4	6.68791	6 68735	6 68222	6.63124	6.40965	6.14378		5.19340		4 40055	4.05464			3 18494	2 94304	1.40193	0 74301	0.44542	0 30069	0.22359		0.14894	0.12846	
8e-4	6.55448	6.55393	6.54893 6.43136	6.49913	6.28269			5 09440	4 68945	4.31941	3.98118	3.67195		3 13043	2 89369	1.38365	0 73622	0 44289	0 29974	0.22322	0.17810	0.14888	0.12842	0.11321
9e-4 1e-3		6.33101	6.32620	6.27839			5.44121	5.00707 4.92895	4.61039	4.24783	3.91637 3.85838	3.61327		3.08233	2.85014 2.81116	1.36751	0.73022	0.44065	0.29889	0.22290		0.14882	0.12839	0.11319
2e-3		5.63893	5.63474	5.59307				4.41483		3 76209					2.55412	1.25737	0.72484	0.43863	0.29813	0.22260			0.12836	
	5.23493	5.23450	5.23067	5.19258		4.82785				3.51504						1 20077	0 66769	0 41695	0.28972	0.22034		0.14801	0.12812	0.11285
4e-3		4.94784	4.94427	4.90870						3 33953	3.09347			2.47028	2.29556		0.65223	0.41094	0.28730	0.21915			0.12772	
	4.72610	4.72572	4.72234	4.68871	4.54240		4.03694	3.73474	3 45756	3.20325	2.96986		2.55880			1 12843	0 64002	0 40614	0.28532	0.21727	0.17539			0.11257
6e-3		4.54441	4.54119	4.50915	4.36969	4.20204		3.59934	3.33471	3 09179		2.66380				1.10224	0 62988	0.40210	0.28363	0.21649			0.12736	
7e-3	4.39162	4.39127	4 38819	4.35747	4.22380	4.06305	3.76157	3 48486		2.99746	2.78308	2.58606		2.23831	2 08502	1.07991	0 62117	0.39859	0 28213	0.21579		0.14697	0.12719	0.11229
8e-3	4.25908	4.25875	4.25578	4.22621	4.09752	3.94273	3 65234	3.38568	3 14074	2.91568	2.70882	2.51861	2.34365	2.18266	2.03446	1 06042	0.61350	0.39547	0 28078	0.21514	0.17425	0.14674	0.12702	0.11215
9e-3	4.14229	4.14198	4.13911	4.11055	3.98623	3.83668	3.55602	3.29819	3.06128	2 84349	2.64323	2.45902	2 28950	2.13345	1.98974	1 04308	0 60664	0.39265	0 27953	0.21453	0.17390	0.14652	0.12685	0.11201
1e-2	4.03793	4 03762	4 03484	4.00718	3.88675	3.74187	3 46988	3.21994	2 99017	2.77887	2.58450	2 40564	2 24098	2 08934	1 94963	1 02746	0 60042	0.39006	0.27838	0.21395	0.17357	0.14630	0 12669	0.11188
2e-2	3 35471	3.35446	3.35227	3.33039	3.23510	3.12031	2 90436	2.70534	2.52185	2.35262	2.19648	2.05236	1.91929	1 79637	1.68277	0 92129	0.55682	0 37117	0.26945	0.20918	0.17063	0.14423	0.12508	0.11055
	2.95912	2.95891	2.95704	2.93843	2.85730			2.40498	2.24773	2 10240	1.96803	1.84375	1.72874	1.62228	1.52368	0.85555	0.52842	0.35800	0.26269	0.20525	0.16802			
	2.68126	2.68108	2.67944	2.66306			2.34294	2.19258	2 05344	1.92462	1.80532	1 69478	1 59233	1 49732	1.40917	0 80674	0.50648	0.34732	0.25690	0.20169				
5e-2		2.46773	2.46626	2.45156	2.38746		2 16390	2.02851	1.90303	1.78671	1.67883	1.57873	1 48580	1 39951	1 31934	0 76741	0.48820	0.33807	0.25168	0.19838			0.12056	0.10672
6e-2		2.29516		2.28045	2.22214			1.89507	1.78049	1.67414	1.57537	1.48361	1.39833	1.31903	1.24526	0.73420	0.47232	0.32977	0 24685	0.19523			0.11910	
		2.15070		2.13720			1.89651	1.78283	1.67724	1.57911	1.48789	1.40304	1 32410		1.18216	0.70531	0.45816	0 32217	0 24232	0.19222	0 15876		0.11768	
8e-2		2 02681	2.02568	2.01433	1.96480			1.68613	1 58814	1 49699	1 41216	1.33318	1 25962	1 19107	1.12716	0 67964	0.43347	0.31512	0.23802	0 18931		0.13344	0.11627	
9e-2	1.91874	1.91863	1.91757	1.90701	1.86093	1.80518	1.69958	1.60133	1.50989	1.36036	1.34545	1 27155	1.20265	1.13838	1.07841	0.63534	0.43347	0.30849	0.23391	0.18649			0.11488	0.10188
1e-1 2e-1	1.22265	1.22259	1.82182	1.81196	1.19075	1.71676	1.61794	1.52593	0.99433	0 94588	0.90041	1.21644 0.85772	1.15163 0.81763	1.09113 0 77997	0.74456	0.63334	0.42248	0.30223	0.19649	0.15961	0.13384		0.10081	0.08970
3e-1	0.90568	0.90563	0.90524	0.90132	0.88418	0.86333	0.82348	0.78597	0.75065	0.71737	0.68600	0.65642	0.62852	0.60219	0.74438	0.48021	0.28235	0.23188	0.15049	0.13957	0.13384	0.10191	0.08964	0.08970
4e-1	0.70238	0.70235	0.70207	0.69926	0.68695	0.67196	0.64325	0.61612	0.79048	0.71737	0.54333	0.52164	0.50112	0.00219	0.46327	0.32368	0.23851	0.18412	0.14780	0.13337		0.09040	0.07977	0.07133
5e-1	0.55977	0.55975	0.55954	0.55745	0.54828		0.51561	0.49526	0.47598	0.45769	0.44036	0.42391	0 40829	0 39347	0.37938	0.27115	0.20342	0.15919	0.12908	0.10776	0 09212	0 08026	0.07103	0.06366
6e-1	0.45438	0.45436	0.45420	0.45260	0.44559	0.53702	0.42054	0.40489	0.39003	0.37590	0.36247	0 34970	0.33755	0.32598	0.31497	0 22937	0.17466	0.13825	0.11306	0 09498	0 08157	0.07132	0.06328	0.05683
7e-1	0.37377	0.37375	0.37363	0.37238	0.36691	0.36023	0.34735	0.33510	0 32343	0.31232	0.30174	0 29165	0.28204	0.27287	0.26412	0.19543	0.15071	0 12046	0.09925	0 08384	0 07231	0 06342	0 05641	0.05075
8e-1	0.31060	0.31059	0.31049	0.30950	0.30518	0.29988	0.28967	0.27994	0.27066	0 26180	0 25335	0.24528	0.23757	0 23021	0.22317	0 16742	0 13054	0 10525	0 08728	0 07410	0 06415	0 05643	0 05030	0 04533
9e-1	0 26018	0.26018	0.26010	0.25931	0.25585	0.25161	0.24342	0 23560	0.22813	0.22100	0.21417	0.20765	0 20141	0 19544	0.18972	0 14407	0 11343	0 09215	0 07687	0 06556	0.05695	0 05023	0 04487	0 04051
1e+0	0 21938	0.21938	0.21931	0.21868	0.21588	0.21245	0.20583	0 19949	0.19342	0 18762	0 18207	0 17675	0 17165	0 16676	0 16208	0 12442	0 09882	0.08083	0 06779	0 05805	0 05059	0.04474	0.04004	0 03621
2e+0	0 04890	0 04890	0.04889	0.04879	0.04834	0 04778	0 04670	0 04566	0.04465	0.04368	0 04274	0.04183	0 04095	0 04009	0 03927	0 03230	0 02714	0 02323	0 02020	0 01781	0 01589	0.01432	0.01301	0.01191
3e+0	0.01305	0 01305	0.01305	0.01302	0 01293	0.01281	0 01258	0.01236	0.01214	0 01193	0 01172	0 01152	0 01133	0 01114	0 01095	0 00935	0 00811	0 00712	0 00633	0 00568	0 00514		0 00431	0 00398
4e+0	0 00378	0.00378	0.00378	0.00377	0 00375	0.00372	0 00367	0.00361	0 00356	0 00351	0 00346	0.00341	0 00336	0 00331	0 00326	0 00285	0 00253	0 00226	0 00204	0 00185	0 00169	0 00156	0 00144	0 00134
5e+0	0 00115	0 00115	0.00115	0.00115			0 00112	0 00110	0 00109	0.00108	0 00106	0 00105		0.00102	0 00101	0.00090	0 00081	0 00073	0 00067	0 00061	0 00057	0.00052	0 00049	0.00046
6e+0	0 00036	0 00036	0 00036	0 00036	0 00036	0 00036	0 00035	0 00035	0 00034	0 00034	0 00034	0 00033	0 00033	0 00033	0 00032	0 00029	0 00026	0 00024	0 00022	0.00021	0 00019	0 00018	0 00017	0.00016
7e+0		1.155e-4	1.155e-4		1 149e-4		1 131e-4	1 120e-4	1 109e-4	1 098e-4	1 087e-4	1 076e-4	1 065e-4	1 055e-4		9 520e-5		8.044e-5	7 453e-5	6 936e-5	6 482e-5		5.722e-5	
8e+0	3.767e-5		3.766e-5		3.749e-5					3 597e-5	3 565e-5	3 533e-5		3 471e-5	3 440e-5		2.919e-5	2 709e-5		2.362e-5	2.217e-5	2.089e-5	1.973e-5	1.869e-5
	1 245e-5		1.245e-5				1 224e-5				1 184e-5		1 164e-5			1 060e-5					7 627e-6			
Ie+1	4.157e-6	4 157e-6	4.157e-6	4.154e-6	4 141e-6	4.125e-6	4 093e-6	4 061e-6	4 030e-6	3 999e-6	3.969e-6	3.939e-6	3 909e-6	3 880e-6	3.832e-6	3 384c-b	3 348e-6	3 139e-6	2 953e-6	2 /80c-6	∠ 635c-6	2 300e-6	2 3 / /e-6	2 204C-0

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1964b.

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Модифицированная функция Бесселя 1-го рода $I_m(u)$ порядков 2÷11

Функция: $I_m(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(u \cos \tau) \cos(m\tau) d\tau$.

Разложение в ряд: $I_m(u) = \left(\frac{u}{2}\right)^m \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(u^2/4\right)^n}{n!(m+n)!}$.

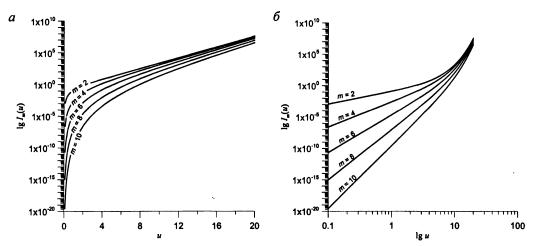


Рис. П19. Зависимость логарифма функции от аргумента (a) и от логарифма аргумента (δ) для различных порядков функции.

Значения $I_m(u)$ для аргумента $u = 0 \div 20.0$ и для порядка $m = 2 \div 11$

						,				
*	2	3	4	5	6	7	8	,	10	11
0.0	0	0	0	0_	0	0	0	0	0	0
0.1	1 25104E-03	2 08464E-05	2 60547E-07	2.60525E-09	2.17091E-11	1.55058E-13	9 69081E-16	5 38363E-18	2 69176E-20	1 22350E-22
0.2	5 01669E-03	1.67084E-04	4 17501E-06	8 34723E-08	1 39087E-09	1 98661E-11	2 48292E-13	2 75849E-15	2.75824E-17	2 50730E-19
0.3	1 13346E-02	5 65671E-04	2.11889E-05	6 35189E-07	1.58712E-08	3 39961E-10	6 37228E-12	1 06178E-13	1 59235E-15	2 17101E-17
0.4	2 02680E-02	1 34672E-03	6 72018E-05	2 68450E-06	8 93981E-08	2 55241E-09	6 37748E-11	1 41659E-12	2 83215E-14	5 14780E-16
0.5	3 19061E-02	2 64511E-03	1 64806E-04	8.22317E-06	3 42124E-07	1 22051E-08	3 81078E-10	1.05782E-11	2 64304E-13	6 00407E-15
0.6	4 63653E-02	4 60217E-03	3 43621E-04	2 05557E-05	1 02559E-06	4 38835E-08	1 64358E-09	5 47312E-11	1 64060E-12	4 47131E-14
0.7	6 37897E-02	7 36737E-03	6 40737E-04	4 46697E-05	2.59817E-06	1 29625E-07	5 66149E-09	2 19870E-10	7 68691E-12	2 44357E-13
0.8	8 43529E-02	1 11002E-02	1 10126E-03	8 76351E-05	5.82023E-06	3.31639E-07	1 65453E-08	7.34041E-10	2.93191E-11	1 06486E-12
0.9	1 08260E-01	1.59721E-02	1 77897E-03	1 59039E-04	1.18709E-05	7 60387E-07	4 26521E-08	2.12783E-09	9 55765E-11	3 90396E-12
1.0	1 35748E-01	2.21684E-02	2.73712E-03	2.71463E-04	2 24887E-05	1 59922E-06	9 96062E-08	5 51839E-09	2 75295E-10	1 24898E-11
1.1	1 67089E-01	2 98907E-02	4.04933E-03	4 41011E-04	4 01385E-05	3 13686E-06	2 14760E-07	1.30804E-08	7 17453E-10	3 57908E-11
1.2	2 02596E-01	3 93590E-02	5 80067E-03	6 87895E-04	6 82086E-05	5 80929E-06	4 33538E-07	2 87877E-08	1 72164E-09	9 36530E-11
1.3	2.42617E-01	5 08145E-02	8 08883E-03	1 03709E-03	1.11240E-04	1 02526E-05	8 28183E-07	5.95348E-08	3 85500E-09	2 27071E-10
1.4	2 87549E-01	6.45222E-02	1.10256E-02	1 51905E-03	1 75196E-04	1 73687E-05	1 50954E-06	1 16776E-07	8 13818E-09	5 15975E-10
1.5	3 37835E-01	8 07741E-02	1.47382E-02	2 17056E-03	2 67769E-04	2 84064E-05	2.64258E-06	2 18854E-07	1 63309E-08	1 10876E-09
1.6	3 93967E-01	9 98923E-02	1.93713E-02	3 03561E-03	3 98741E-04	4 50599E-05	4 46657E-06	3 94241E-07	3 13577E-08	2 26960E-09
1.7	4 56498E-01	1.22233E-01	2 50891E-02	4 16647E-03	5.80392E-04	6 95873E-05	7 32077E-06	6 85935E-07	5 79261E-08	4 45185E-09
1.8	5 26040E-01	1 48189E-01	3.20769E-02	5 62481E-03	8.27979E-04	1 04953E-04	1 16770E-05	1 15736E-06	1 03406E-07	8 40913E-09
1.9	6 03272E-01	1 78197E-01	4.05446E-02	7 48302E-03	1 16027E-03	1 54998E-04	1 81804E-05	1 90014E-06	1 79054E-07	1.53593E-08
2.0	6 88948E-01	2 12740E-01	5 07286E-02	9 82568E-03	1 60017E-03	2 24639E-04	2.76994E-05	3 04419E-06	3 01696E-07	2 72220E-08
2.1	7 83902E-01	2.52352E-01	6 28953E-02	1 27512E-02	2.17544E-03	3 20107E-04	4 13879E-05	4 77073E-06	4 95996E-07	4.69556E-08
2.2	8.89057E-01	2 97628E-01	7.73449E-02	1 63736E-02	2 91947E-03	4 49225E-04	6 07608E-05	7 32885E-06	7 97480E-07	7 90291E-08
2.3	1 00543E+00	3 49223E-01	9 44146E-02	2 08247E-02	3 87224E-03	6 21732E-04	8 77847E-05	1.10564E-05	1 25652E-06	1 30072E-07
2.4	1 13415E+00	4 07868E-01	1 14483E-01	2 62565E-02	5 08137E-03	8 49665E-04	1 24989E-04	1 64060E-05	1 94355E-06	2 09757E-07
2.5	1 27647E+00	4 74370E-01	1 37977E-01	3 28435E-02	6 60327E-03	1 14780E-03	1 75597E-04	2 39779E-05	2.95574E-06	3 31989E-07
2.6	1 43374E+00	5 49627E-01	1 65373E-01	4 07859E-02	8 50454E-03	1.53416E-03	2 43685E-04	3 45597E-05	4 42561E-06	5 16485E-07
2.7	1 60750E+00	6 34630E-01	1 97207E-01	5 03128E-02	1 08635E-02	2 03062E-03	3 34368E-04	4 91754E-05	6 53192E-06	7 90850E-07
2.8	1 79940E+00	7 30483E-01	2 34079E-01	6 16860E-02	1 37719E-02	2 66358E-03	4 54025E-04	6 91463E-05	9 51342E-06	1 19330E-06
2.9	2.01130E+00	8 38407E-01	2 76661E-01	7 52040E-02	1.73370E-02	3 46476E-03	6 10558E-04	9 61627E-05	1 36860E-05	1 77615E-06
3.0	2 24521E+00	9 59754E-01	3 25705E-01	9 12065E-02	2 16836E-02	4 47212E-03	8 13702E-04	1 32373E-04	1 94644E-05	2 61037E-06

* -	2	3	4		6 "	7		•	10	11
3.1	2.50339E+00	1.09602E+00	3 82053E-01	1 10080E-01	2 69568E-02	5.73089E-03	1 07539E-03	1 80489E-04	2 73882E-05	3 79127E-06
3.2	2.78830E+00	1.2488E+00	4.46647E-01	1 32263E-01	3 33249E-02	7.29479E-03	1.41018E-03	2 43915E-04	3 81550E-05	5 44588E-06
3.3	3.10266E+00	1.42016E+00	5 20538E-01	1.58254E-01	4 09822E-02	9.22738E-03	1 83572E-03	3 26895E-04	5 26603E-05	7 74206E-06
3.4	3.44946E+00	1 61192E+00	6 04903E-01	1 88615E-01	5.01532E-02	1 16037E-02	2 37340E-03	4 34701E-04	7 20461E-05	1 09000E-05
3.5	3 83201E+00 4.25395E+00	1.82639E+00 2.06610E+00	7 01053E-01 8 10456E-01	2 23985E-01 2 65085E-01	6 10963E-02 7 41089E-02	1 45118E-02 1 80555E-02	3 04894E-03 3 89321E-03	5 73840E-04 7 52315E-04	9 77608E-05 1 31631E-04	1 52067E-05 2 10336E-05
3.7	4 71930E+00	2 33380E+00	9.34747E-01	3 12730E-01	8 95320E-02	2.23556E-02	4.94313E-03	9 79921E-04	1 75947E-04	2 88586E-05
3.8	5.23245E+00	2.63258E+00	1 07575E+00	3 67838E-01	1 07757E-01	2 75538E-02	6 24273E-03	1 26860E-03	2 33569E-04	3 92929E-05
3.9	5 79830E+00	2 96582E+00	1 23550E+00	4.31447E-01	1 29230E-01	3 38147E-02	7.84433E-03	1 63286E-03	3 08050E-04	5 31146E-05
4.0	6 42219E+00	3.33728E+00	1 41628E+00	5 04724E-01	1 54465E-01	4 13300E-02	9 80993E-03	2 09025E-03	4 03789E-04	7 13082E-05
4.1	7.11004E+00 7 86835E+00	3 75112E+00 4 21195E+00	1 62059E+00 1.85128E+00	5 88986E-01 6 85711E-01	1 84043E-01 2 18632E-01	5 03218E-02 6 10478E-02	1 22128E-02 1 51395E-02	2 66196E-03	5 26203E-04	9 51146E-05
4.2	8.70430E+00	4 72487E+00	2 11146E+00	7 96564E-01	2 58989E-01	7 38055E-02	1 86916E-02	3 37343E-03 4.25521E-03	6 81942E-04 8 79141E-04	1 26090E-04 1 66176E-04
4.4	9.62579E+00		2 40465E+00	9.23416E-01	3.05975E-01	8.89386E-02	2 29886E-02	5 34377E-03	1 12771E-03	2 17792E-04
4.5	1 06415E+01	5 93010E+00	2 73472E+00	1.06837E+00	3 60572E-01	1 06843E-01	2 81702E-02	6 68262E-03	1 43971E-03	2 83929E-04
4.6	1 17611E+01	6 63554E+00	3 10602E+00	1 23378E+00	4 23891E-01	1 27976E-01	3 44000E-02	8 32351E-03	1 82970E-03	3 68286E-04
4.7	1 29950E+01	7 41948E+00	3 52335E+00	1 42229E+00	4 97194E-01	1 52859E-01 1 82096E-01	4 18686E-02	1.03278E-02	2 31532E-03	4 75407E-04
4.8	1 43550E+01 1 58538E+01	8 29034E+00 9 25745E+00	3.99208E+00 4 51816E+00	1.63688E+00 1 88086E+00	5 81913E-01 6 79666E-01	2 16376E-01	5 07984E-02 6 14478E-02	1 27682E-02 1.57304E-02	2 91776E-03 3 66249E-03	6 10867E-04 7 81478E-04
5.0	1.75056E+01	1 03312E+01	5.10823E+00	2.15797E+00	7 92286E-01	2 56489E-01	7 41166E-02	1 93157E-02	4 58004E-03	9 95541E-04
5.1	1.93259E+01	1 15228E+01	5 76966E+00	2 47239E+00	9 21845E-01	3 03338E-01	8 91528E-02	2 36430E-02	5 70687E-03	1 26314E-03
5.2	2 13319E+01	1.28451E+01	6 51063E+00	2.82877E+00	1 07069E+00	3 57956E-01	1 06959E-01	2 88520E-02	7 08644E-03	1 59650E-03
5.3	2 35425E+01	1.43120E+01	7 34025E+00	3 23236E+00	1 24145E+00	4 21522E-01	1 28000E-01	3 51065E-02	8 77047E-03	2 01038E-03
5.4	2 59784E+01 2 86626E+01	1 59388E+01 1.77426E+01	8 26862E+00 9.30697E+00	3 68900E+00 4 20524E+00	1 43713E+00	4 95379E-01	1 52814E-01 1.82019E-01	4 25980E-02	1 08204E-02	2 52259E-03 3 15453E-03
5.5	3 16203E+01	1 97424E+01	1 04678E+01	4 78838E+00	1 66108E+00 1 91710E+00	5 81060E-01 6.80309E-01	2.16329E-01	5 15503E-02 6 22245E-02	1 33088E-02 1 63219E-02	3 93189E-03
5.7	3 48794E+01	2 19587E+01	1 17649E+01	5 44660E+00	2 20946E+00	7.95107E-01	2 56565E-01	7 49246E-02	1 99612E-02	4 88543E-03
5.8	3 84704E+01	2 44148E+01	1 32137E+01	6 18903E+00	2 54297E+00	9 27711E-01	3 03669E-01	9 00040E-02	2 43461E-02	6 05187E-03
5.9	4 24273E+01	2.71361E+01	1.48313E+01	7 02586E+00	2 92305E+00	1 08068E+00	3 58722E-01	1 07873E-01	2 96175E-02	7 47501E-03
6.0	4 67871E+01	3 01505E+01	1 66366E+01	7 96847E+00	3 35577E+00	1 25692E+00	4 22966E-01	1 29009E-01	3 59405E-02	9 20697E-03
6.1	5.15909E+01 5 68838E+01	3 34893E+01 3 71867E+01	1 86506E+01 2 08966E+01	9.02956E+00 1 02233E+01	3 84800E+00 4 40742E+00	1 45972E+00 1.69282E+00	4 97821E-01 5 84913E-01	1 53961E-01 1 83370E-01	4 35088E-02 5 25492E-02	1 13096E-02 1 38564E-02
6.2	6 27155E+01	4 12806E+01	2.34006E+01	1 15655E+01	5 04266E+00	1.96045E+00	6 86102E-01	2 17971E-01	6 33267E-02	1 69341E-02
6.4	6 91410E+01	4 58130E+01	2 61913E+01	1 30738E+01	5 76344E+00	2 26739E+00	8 03511E-01	2.58617E-01	7 61509E-02	2 06453E-02
6.5	7 62205E+01	5 08301E+01	2 93005E+01	1 47679E+01	6 58063E+00	2 61906E+00	9.39565E-01	3 06288E-01	9 13825E-02	2 51112E-02
6.6	8 40208E+01	5 63830E+01	3.27635E+01	1 66697E+01	7 50644E+00	3.02158E+00	1 09703E+00	3 62115E-01	1 09442E-01	3 04741E-02
6.7	9 26150E+01	6 25283E+01	3.66195E+01	1 88035E+01	8 55458E+00	3.48186E+00	1.27905E+00	4 27400E-01	1 30817E-01	3 69019E-02
6.8	1 02084E+02	6 93283E+01	4 09119E+01	2 11966E+01	9 74039E+00	4.00771E+00 4 60794E+00	1.48923E+00	5 03636E-01	1 56075E-01	4 45914E-02
7.0	1 12517E+02 1 24011E+02	7 68520E+01 8 51755E+01	4 56889E+01 5 10038E+01	2 38794E+01 2 68855E+01	1 10811E+01 1.25959E+01	5 29249E+00	1 73164E+00 2.01093E+00	5 92543E-01 6 96090E-01	1 85875E-01 2 20980E-01	5 37735E-02 6 47186E-02
7.1	1 36676E+02	9 43829E+01	5 69157E+01	3 02525E+01	1 43065E+01	6 07258E+00	2 33237E+00	8 16539E-01	2 62272E-01	7 77431E-02
7.2	1 50630E+02	1 04567E+02	6 34903E+01	3.40224E+01	1 62369E+01	6.96084E+00	2.70197E+00	9 56477E-01	3 10774E-01	9 32165E-02
7.3	1 66004E+02	1.15831E+02	7 08001E+01	3.82416E+01	1 84143E+01	7 97150E+00	3 12652E+00	1 11887E+00	3 67664E-01	1 11570E-01
7.4	1 82942E+02	1 28287E+02	7 89258E+01	4 29621E+01	2 08689E+01	9 12059E+00	3 61374E+00	1 30710E+00	4 34304E-01	1 33306E-01
7.5	2 01605E+02	1.42061E+02	8 79563E+01	4,82414E+01	2 36345E+01	1 04261E+01	4 17239E+00	1 52505E+00	5 12265E-01	1 59009E-01
7.6	2 22168E+02 2 44825E+02	1 57292E+02 1 74131E+02	9.79907E+01 1 09138E+02	5 41437E+01 6 07404E+01	2 67490E+01 3 02546E+01	1.19084E+01 1 35903E+01	4 81237E+00 5 54492E+00	1 77714E+00 2 06842E+00	6 03356E-01 7 09659E-01	1 89360E-01 2 25149E-01
7.8	2 69787E+02	1 92747E+02	1.21520E+02	6 81108E+01	3.41987E+01	1 54975E+01	6 38275E+00	2 40464E+00	8 33567E-01	2 67292E-01
7.9	2.97291E+02	2 13327E+02	1 35271E+02	7 63433E+01	3 86340E+01	1 76587E+01	7 34022E+00	2 79238E+00	9 77834E-01	3 16853E-01
8.0	3 27596E+02	2 36075E+02	1.50539E+02	8 55358E+01	4 36197E+01	2.01063E+01	8.43361E+00	3 23911E+00	1 14562E+00	3 75062E-01
8.1	3 60986E+02	2 61220E+02	1 67490E+02	9 57975E+01	4 92214E+01	2.28768E+01	9 68127E+00	3 75333E+00	1 34054E+00	4 43344E-01
8.2	3 97776E+02 4 38313E+02	2.89011E+02 3 19725E+02	1 86305E+02 2 07187E+02	1 07250E+02 1 20027E+02	5 55130E+01 6 25764E+01	2 60110E+01 2.95547E+01	1 11040E+01 1 27251E+01	4 34472E+00 5 02431E+00	1 56677E+00 1 82905E+00	5 23345E-01 6 16968E-01
8.4	4 82978E+02	3 53667E+02	2 30359E+02	1.34278E+02	7 05034E+01	3.35593E+01	1 45712E+01	5 80458E+00	2 13283E+00	7 26405E-01
8.5	5 32193E+02	3 91176E+02	2 56068E+02	1 50171E+02	7 93961E+01	3.80825E+01	1 66721E+01	6 69975E+00	2 48436E+00	8 54189E-01
8.6	5.86420E+02	4 32624E+02	2.84589E+02	1 67890E+02	8.93688E+01	4 31889E+01	1 90613E+01	7 72594E+00	2 89076E+00	1 00324E+00
8.7	6 46171E+02	4 78421E+02	3 16226E+02	1 87639E+02	1 00549E+02	4 89510E+01	2.17770E+01	8.90145E+00	3 36018E+00	1 17690E+00
8.8	7 12010E+02	5 29022E+02	3.51313E+02	2 09647E+02	1.13078E+02	5.54501E+01	2 48617E+01	1 02470E+01	3 90191E+00	1 37904E+00
9.0	7 84557E+02 8 64496E+02	5 84929E+02 6 46694E+02	3 90223E+02 4 33367E+02	2 34167E+02 2.61479E+02	1 27114E+02 1.42834E+02	6 27770E+01 7.10338E+01	2 83637E+01 3 23372E+01	1 17861E+01 1.35455E+01	4 52656E+00 5 24623E+00	1 61410E+00 1 88718E+00
9.1	9.52582E+02	7 14929E+02	4 81200E+02	2.91896E+02	1.60435E+02	8.03344E+01	3.68432E+01	1.55552E+01	6 07472E+00	2 20413E+00
9.2	1 04964E+03	7 90308E+02	5 34226E+02	3.25764E+02	1.80134E+02	9 08065E+01	4 19504E+01	1 78493E+01	7 02774E+00	2 57165E+00
9.3	1 15660E+03	8 73577E+02	5 93002E+02	3 63467E+02	2 02177E+02	1.02593E+02	4 77360E+01	2 04666E+01	8 12318E+00	2 99746E+00
9.4	1 27446E+03	9 65556E+02	6 58146E+02 7 30340E+02	4 05432E+02	2 26836E+02	1 15854E+02	5,42870E+01	2.34507E+01	9 38138E+00	3 49035E+00 4 06043E+00
9.5	1.40433E+03 1 54745E+03	1 06715E+03 1 17937E+03	7 30340E+02 8 10340E+02	4 52132E+02 5 04091E+02	2.54412E+02 2.85244E+02	1 30768E+02 1.47536E+02	6.17010E+01 7 00877E+01	2 68510E+01 3 07231E+01	1 08255E+01 1 24819E+01	4 71925E+00
9.7	1 70516E+03	1.30332E+03	8 98980E+02	5 61894E+02	3 19707E+02	1 66380E+02	7.95704E+01	3 51302E+01	1 43803E+01	5 48001E+00
9.8	1 87895E+03	1 44022E+03	9 97185E+02	6 26187E+02	3 58219E+02	1 87552E+02	9 02876E+01	4 01434E+01	1 65549E+01	6 35780E+00
9.9	2 07047E+03	1 59141E+03	1 10598E+03	6.97686E+02	4 01244E+02	2.11329E+02	1 02395E+02	4 58429E+01	1 90441E+01	7 36987E+00
10.0	2 28152E+03	1 75838E+03	1 22649E+03	7.77188E+02	4 49302E+02	2 38026E+02	1 16066E+02	5 23193E+01	2 18917E+01	8 53588E+00
10.1	2 51410E+03	1.94278E+03 2 14642E+03	1 35997E+03	8 65575E+02	5 02968E+02	2.67989E+02 3 01609E+02	1 31498E+02 1 48910E+02	5 96748E+01	2 51472E+01 2 88669E+01	9 87830E+00 1 14227E+01
10.2	2 77041E+03 3.05288E+03	2.37130E+03	1.50781E+03 1.67153E+03	9 63826E+02 1.07303E+03	5 62884E+02 6.29762E+02	3.39322E+02	1 48910E+02 1 68549E+02	6 80246E+01 7.74984E+01	3 31145E+01	1 31983E+01
10.4	3 36417E+03	2 61964E+03	1.85284E+03	1 19438E+03	7 04397E+02	3.81611E+02	1 90690E+02	8 82426E+01	3 79622E+01	1 52384E+01
10.5	3 70723E+03	2 89386E+03	2 05359E+03	1 32922E+03	7 87671E+02	4 29021E+02	2 15643E+02	1 00422E+02	4 34916E+01	1 75807E+01
10.6	4.08530E+03	3 19666E+03	2 27587E+03	1 47902E+03	8 80566E+02	4 82156E+02	2 43756E+02	1.14222E+02	4 97952E+01	2 02684E+01
10.7	4 50197E+03	3 53102E+03	2 52196E+03	1.64544E+03	9 84172E+02	5 41691E+02	2.75418E+02	1 29851E+02	5 69776E+01	2 33505E+01 2 68827E+01
10.8	4.96118E+03 5 46728E+03	3 90020E+03 4 30784E+03	2 79440E+03 3 09599E+03	1.83027E+03 2.03555E+03	1 09970E+03 1 22851E+03	6.08380E+02 6 83063E+02	3 11064E+02 3 51182E+02	1.47544E+02 1 67566E+02	6 51572E+01 7 44677E+01	3 09283E+01
11.0	6 02506E+03	4 75793E+03	3 42983E+03	2.03335E+03 2 26351E+03	1 37209E+03	7.66679E+02	3.96320E+02	1 90214E+02	8 50601E+01	3 55593E+01
11.1	6 63981E+03	5 25487E+03	3 79934E+03	2 51661E+03	1.53212E+03	8.60272E+02	4 47087E+02	2 15822E+02	9 71054E+01	4 08575E+01
11.2	7 31734E+03	5 80355E+03	4 20830E+03	2.79762E+03	1.71043E+03	9 65009E+02	5 04170E+02	2 44766E+02	1 10796E+02	4 69154E+01
11.3	8 06410E+03	6 40932E+03	4 66092E+03	3 10955E+03	1 90910E+03	1 08219E+03	5 68335E+02	2 77468E+02	1 26351E+02	5 38385E+01
11.4	8 88714E+03	7 07812E+03	5.16181E+03	3 45580E+03	2 13041E+03	1 21326E+03	6 40438E+02	3 14402E+02	1 44014E+02	6 17460E+01
11.5	9 79428E+03 1 07941E+04	7 81650E+03	5 71610E+03 6 32945E+03	3 84008E+03 4.26655E+03	2 37690E+03 2 65139E+03	1.35984E+03 1 52373E+03	7 21439E+02 8 12410E+02	3 56101E+02 4.03163E+02	1 64063E+02 1 86812E+02	7 07734E+01 8 10738E+01
11.6	1 18961E+04	8 63169E+03 9.53165E+03	7 00812E+03	4.20033E+03 4.73978E+03	2 95703E+03	1 70693E+03	9 14550E+02	4.03163E+02	2 12612E+02	9 28212E+01
11.8	1 31108E+04	1 05252E+04	7 75902E+03	5 26484E+03	3 29729E+03	1 91167E+03	1 02920E+03	5 16145E+02	2 41860E+02	1 06212E+02

•	2	3	7		6	<u> </u>		9 1		
11.9	1 44497E+04	1 16220E+04	8 58980E+03	5 84738E+03	3 67604E+03	2 14045E+03	8 1 15786E+03	5 83665E+02	10 2 75006E+02	11 1 21470E+02
12.0	1 59254E+04	1 28329E+04	9 50892E+03	6 49361E+03	4 09758E+03	2 39604E+03	1 30220E+03	6 59766E+02	3 12552E+02	1 38846E+02
12.1	1 75520E+04	1 41696E+04	1 05257E+04	7 21045E+03	4 56668E+03	2 68151E+03	1 46410E+03	7 45515E+02	3 55068E+02	1 58626E+02
12.2	1 93449E+04	1.56452E+04	1 16505E+04	8 00553E+03	5.08863E+03	3 00032E+03	1 64564E+03	8 42104E+02	4 03192E+02	1 81133E+02
12.3	2 13212E+04 2 34997E+04	1 72742E+04 1 90724E+04	1 28948E+04 1.42711E+04	8.88733E+03 9.86523E+03	5.66933E+03 6 31529E+03	3.35629E+03 3.75367E+03	1 84916E+03 2.07727E+03	9 50870E+02 1 07331E+03	4 57646E+02 5 19239E+02	2 06731E+02 2 35832E+02
12.5	2 59010E+04	2 10574E+04	1 57935E+04	1.09496E+04	7.03376E+03	4 19721E+03	2 33289E+03	1 21111E+03	5 88882E+02	2 68902E+02
12.6	2 85480E+04	2.32486E+04	1 74772E+04	1 21520E+04	7.83279E+03	4 69219E+03	2 61925E+03	1 36615E+03	6 67602E+02	3 06468E+02
12.7	3 14658E+04	2 56674E+04	1 93395E+04	1 34851E+04	8 72131E+03	5 24448E+03	2.94000E+03	1 54054E+03	7 56552E+02	3 49122E+02
12.8	3 46822E+04	2 83374E+04	2 13991E+04	1.49630E+04	9 70922E+03	5 86061E+03	3 29918E+03	1 73664E+03	8 57026E+02	3 97537E+02
12.9	3 82278E+04 4 21363E+04	3 12847E+04 3 45380E+04	2.36768E+04 2 61957E+04	1 66014E+04 1.84175E+04	1 08075E+04 1 20284E+04	6 54787E+03 7.31434E+03	3.70131E+03 4.15145E+03	1.95709E+03 2 20486E+03	9 70484E+02 1 09856E+03	4 52469E+02 5 14771E+02
13.1	4 64449E+04	3 81290E+04	2 89813E+04	2 04305E+04	1 33855E+04	8 16902E+03	4 65521E+03	2 48326E+03	1 24310E+03	5 85406E+02
13.2	5 11946E+04	4 20928E+04	3 20615E+04	2 26616E+04	1 48937E+04	9 12192E+03	5 21889E+03	2 79600E+03	1 40616E+03	6 65461E+02
13.3	5 64307E+04	4 64682E+04	3 54676E+04	2.51343E+04	1 65697E+04	1 01842E+04	5 84947E+03	3 14723E+03	1 59006E+03	7 56160E+02
13.4	6 22029E+04	5 12976E+04	3 92338E+04	2 78744E+04	1.84320E+04	1 13682E+04	6 55477E+03	3 54159E+03	1 79741E+03	8 58882E+02
13.5	6 85662E+04 7 55813E+04	5 66283E+04 6 25122E+04	4 33981E+04 4 80024E+04	3 09109E+04 3 42755E+04	2 05011E+04 2 27998E+04	1 26877E+04 1 41580E+04	7.34351E+03 8 22539E+03	3 98428E+03 4 48110E+03	2 03114E+03 2 29452E+03	9 75182E+02 1 10681E+03
13.7	8 33150E+04	6 90067E+04	5 30931E+04	3 80035E+04	2 53533E+04	1 57962E+04	9 21123E+03	5 03855E+03	2 59123E+03	1 25574E+03
13.8	9 18410E+04	7 61752E+04	5 87214E+04	4 21338E+04	2 81896E+04	1.76211E+04	1 03131E+04	5 66390E+03	2 92540E+03	1 42419E+03
13.9	1 01241E+05	8 40874E+04	6 49438E+04	4 67097E+04	3 13397E+04	1 96538E+04	1 15445E+04	6 36526E+03	3 30167E+03	1 61466E+03
14.0	1 11603E+05	9 28206E+04	7 18230E+04	5 17789E+04	3 48380E+04	2 19177E+04	1 29203E+04	7 15171E+03	3 72523E+03	1 82996E+03
14.1	1 23028E+05 1 35623E+05	1.02460E+05 1 13099E+05	7 94280E+04 8.78351E+04	5.73943E+04 6.36145E+04	3 87228E+04 4 30362E+04	2.44388E+04 2 72459E+04	1 44573E+04 1 61740E+04	8 03338E+03	4 20189E+03 4 73819E+03	2 07326E+03 2 34811E+03
14.2	1 49510E+05	1 24842E+05	9 71289E+04	7 05042E+04	4.78252E+04	3 03711E+04	1 80913E+04	9 02162E+03 1 01291E+04	5 34144E+03	2 65852E+03
14.4	1 64820E+05	1 37803E+05	1 07402E+05	7 81350E+04	5.31420E+04	3 38501E+04	2 02322E+04	1 13699E+04	6 01984E+03	3 00898E+03
14.5	1 81700E+05	1 52108E+05	1 18759E+05	8 65864E+04	5 90440E+04	3 77224E+04	2 26223E+04	1 27598E+04	6 78256E+03	3 40456E+03
14.6	2 00311E+05	1 67898E+05	1 31312E+05	9 59461E+04	6 55953E+04	4 20321E+04	2 52905E+04	1 43166E+04	7 63990E+03	3 85095E+03
14.7	2 20830E+05 2 43453E+05	1 85325E+05	1 45187E+05	1 06311E+05	7 28667E+04	4 68281E+04	2 82684E+04 3 15917E+04	1 60598E+04	8 60337E+03 9 68588E+03	4 35452E+03
14.8	2 68397E+05	2 04559E+05 2 25788E+05	1 60524E+05 1 77476E+05	1 17789E+05 1 30499E+05	8 09367E+04 8 98926E+04	5 21647E+04 5 81022E+04	3 52999E+04	1 80115E+04 2 01962E+04	9 68388E+03	4 92246E+03 5 56282E+03
15.0	2 95899E+05	2 49218E+05	1 96212E+05	1 44572E+05	9 98307E+04	6 47075E+04	3 94370E+04	2 26413E+04	1 22675E+04	6 28467E+03
15.1	3 26223E+05	2 75079E+05	2 16920E+05	1 60154E+05	1 10858E+05	7 20550E+04	4 40520E+04	2 53774E+04	1 38008E+04	7 09815E+03
15.2	3 59658E+05	3 03621E+05	2 39808E+05	1 77406E+05	1.23093E+05	8 02275E+04	4 91994E+04	2 84386E+04	1 55222E+04	8 01469E+03
15.3 15.4	3 96524E+05 4 37173E+05	3 35123E+05 3 69891E+05	2 65103E+05 2 93059E+05	1 96507E+05 2 17652E+05	1 36667E+05 1 51727E+05	8 93165E+04	5 49400E+04	3 18629E+04	1 74541E+04	9 04708E+03 1 02097E+04
15.5	4 81993E+05	4 08264E+05	3 23955E+05	2 41062E+05	1 68432E+05	9 94240E+04 1.10663E+05	6.13411E+04 6.84780E+04	3 56929E+04 3 99759E+04	1 96221E+04 2 20544E+04	1 15187E+04
15.6	5 31414E+05	4 50617E+05	3 58100E+05	2 66976E+05	1 86962E+05	1.23159E+05	7 64344E+04	4 47648E+04	2 47827E+04	1 29920E+04
15.7	5 85908E+05	4 97360E+05	3 95834E+05	2 95661E+05	2.07515E+05	1 37051E+05	8 53031E+04	5 01184E+04	2 78426E+04	1 46501E+04
15.8	6 45996E+05	5 48950E+05	4 37534E+05	3 27414E+05	2 30310E+05	1 52495E+05	9 51877E+04	5 61024E+04	3 12735E+04	1 65157E+04
15.9	7 12253E+05 7 85314E+05	6 05889E+05 6 68731E+05	4 83616E+05 5 34540E+05	3.62560E+05 4 01461E+05	2 55591E+05	1 69661E+05 1 88741E+05	1 06203E+05	6 27902E+04 7 02635E+04	3 51200E+04	1 86142E+04 2 09742E+04
16.1	8 65877E+05	7 38088E+05	5 90813E+05	4 44517E+05	2 83626E+05 3 14716E+05	2 09946E+05	1 18478E+05 1 32154E+05	7 86132E+04	3 94314E+04 4 42632E+04	2 36278E+04
16.2	9 54714E+05	8 14636E+05	6 52997E+05	4.92169E+05	3 49189E+05	2 33511E+05	1 47389E+05	8 79409E+04	4 96773E+04	2 66109E+04
16.3	1 05267E+06	8 99120E+05	7 21710E+05	5.44907E+05	3 87412E+05	2 59695E+05	1.64361E+05	9 83596E+04	5 57427E+04	2 99636E+04
16.4	1 16070E+06	9.92363E+05	7 97639E+05	6 03271E+05	4 29791E+05	2 88789E+05	1.83264E+05	1 09996E+05	6 25368E+04	3 37311E+04
16.5	1 27982E+06 1 41118E+06	1 09527E+06 1 20885E+06	8 81538E+05 9 74244E+05	6 67859E+05 7 39334E+05	4 76775E+05 5 28863E+05	3 21113E+05 3 57023E+05	2 04316E+05 2 27759E+05	1 22989E+05 1 37497E+05	7 01458E+04 7 86660E+04	3 79639E+04 4 27184E+04
16.7	1 55603E+06	1 33420E+06	1 07668E+06	8 18426E+05	5 86604E+05	3 96914E+05	2 53862E+05	1 53693E+05	8 82052E+04	4 80579E+04
16.8	1 71577E+06	1 47255E+06	1 18986E+06	9.05946E+05	6 50611E+05	4 41224E+05	2 82924E+05	1 71772E+05	9 88834E+04	5 40534E+04
16.9	1 89193E+06	1 62524E+06	1 31492E+06	1 00279E+06	7 21558E+05	4 90438E+05	3 15278E+05	1 91950E+05	1.10835E+05	6 07841E+04
17.0	2 08619E+06	1 79375E+06	1 45310E+06	1 10994E+06	8 00196E+05	5 45096E+05	3 51293E+05	2 14468E+05	1 24209E+05	6 83389E+04
17.1	2 30042E+06 2 53667E+06	1 97974E+06 2 18501E+06	1 60577E+06 1 77446E+06	1 22850E+06 1 35968E+06	8 87353E+05 9 83947E+05	6 05797E+05 6 73202E+05	3 91379E+05 4 35992E+05	2 39594E+05 2 67628E+05	1 39174E+05 1 55916E+05	7 68172E+04 8 63301E+04
17.3	2 79721E+06	2 41155E+06	1 96083E+06	1 50481E+06	1 09100E+06	7 48049E+05	4 85640E+05	2 98902E+05	1 74643E+05	9 70020E+04
17.4	3 08453E+06	2 66158E+06	2 16674E+06	1 66538E+06	1 20963E+06	8 31152E+05	5 40885E+05	3 33787E+05	1 95588E+05	1 08972E+05
17.5	3 40139E+06	2 93753E+06	2 39424E+06	1 84302E+06	1.34109E+06	9.23417E+05	6 02353E+05	3 72694E+05	2 19011E+05	1 22396E+05
17.6	3 75084E+06	3.24209E+06	2 64559E+06	2 03955E+06	1 48676E+06	1 02585E+06	6 70740E+05	4 16084E+05	2 45199E+05	1 37449E+05
17.7	4 13623E+06 4 56125E+06	3 57821E+06 3.94918E+06	2 92328E+06 3 23007E+06	2 25696E+06 2 49746E+06	1 64816E+06 1 82700E+06	1 13956E+06 1 26578E+06	7 46818E+05 8 31444E+05	4 64468E+05 5 18414E+05	2 74477E+05 3 07205E+05	1 54324E+05 1.73239E+05
17.9	5 03000E+06	4.35861E+06	3.56901E+06	2 76352E+06	2 02514E+06	1 40588E+06	9 25571E+05	5 78555E+05	3 43784E+05	1.73239E+05
18.0	5 54695E+06	4 81048E+06	3 94346E+06	3 05783E+06	2.24467E+06	1 56138E+06	1.03026E+06	6 45597E+05	3 84662E+05	2 18194E+05
18.1	6 11709E+06	5 30919E+06	4 35714E+06	3 38338E+06	2 48787E+06	1 73396E+06	1 14668E+06	7 20323E+05	4 30339E+05	2 44810E+05
18.2	6 74589E+06 7 43939E+06	5.85960E+06 6 46707E+06	4 81415E+06 5 31904E+06	3 74349E+06 4.14181E+06	2 75729E+06 3 05575E+06	1 92549E+06 2 13803E+06	1 27615E+06	8 03605E+05	4 81371E+05	2 74626E+05
18.4	8 20425E+06	7 13751E+06	5 87680E+06	4.14181E+06 4.58238E+06	3 38637E+06	2 37388E+06	1 42010E+06 1 58016E+06	8 96415E+05 9 99833E+05	5 38380E+05 6 02058E+05	3 08022E+05 3 45422E+05
18.5	9 04781E+06	7.87746E+06	6 49296E+06	5 06969E+06	3.75259E+06	2 63558E+06	1 75810E+06	1.11506E+06	6 73177E+05	3 87300E+05
18.6	9 97820E+06	8 69411E+06	7 17365E+06	5.60867E+06	4 15824E+06	2 92594E+06	1 95592E+06	1 24343E+06	7 52597E+05	4 34186E+05
18.7	1 10044E+07	9 59543E+06	7 92560E+06	6 20479E+06	4 60753E+06	3.24809E+06	2 17581E+06	1 38643E+06	8 41276E+05	4 86672E+05
18.8	1 21361E+07 1 33844E+07	1 05902E+07	8 75628E+06 9 67391E+06	6 86410E+06 7 59328E+06	5 10516E+06	3 60549E+06 4 00197E+06	2 42023E+06	1 54572E+06	9 40283E+05	5 45418E+05
19.0	1 47612E+07	1.16881E+07	1 06876E+07	8 39971E+06	5 65631E+06 6 26670E+06	4 44180E+06	2 69188E+06 2 99379E+06	1 72313E+06 1 92071E+06	1 05081E+06 1 17418E+06	6 11163E+05 6 84729E+05
19.1	1 62798E+07	1.42371E+07	1 18074E+07	9 29157E+06	6 94268E+06	4 92967E+06	3 32931E+06	2 14072E+06	1 31187E+06	7 67038E+05
19.2	1 79547E+07	1 57130E+07	1.30443E+07	1.02779E+07	7 69128E+06	5 47083E+06	3.70214E+06	2 38571E+06	1 46553E+06	8 59115E+05
19.3	1 98021E+07	1 73420E+07	1.44108E+07	1 13686E+07	8 52028E+06	6 07105E+06	4 11641E+06	2.65848E+06	1 63700E+06	9 62107E+05
19.4	2.18397E+07	1 91399E+07	1.59201E+07	1.25748E+07	9 43827E+06	6 73675E+06	4 57670E+06	2 96215E+06	1 82831E+06	1 07729E+06
19.5	2 40872E+07 2 65662E+07	2 11241E+07 2.33141E+07	1.75875E+07 1.94292E+07	1.39087E+07 1.53838E+07	1 04548E+07 1 15803E+07	7.47503E+06 8 29379E+06	5 08808E+06 5 65620E+06	3.30020E+06 3 67649E+06	2.04174E+06 2 27983E+06	1 20610E+06 1 35013E+06
19.7	2 93005E+07	2.53141E+07	2.14636E+07	1.70149E+07	1.28266E+07	9 20175E+06	6 28730E+06	4 09531E+06	2 54540E+06	1 51115E+06
19.8	3 23165E+07	2 83987E+07	2.37109E+07	1.88186E+07	1 42065E+07	1 02086E+07	6 98834E+06	4 56143E+06	2 84158E+06	1 69115E+06
19.9	3 56433E+07	3 13429E+07	2.61931E+07	2.08130E+07	1 57343E+07	1 13250E+07	7 76701E+06	5.08016E+06	3 17188E+06	1 89234E+06
20.0	3 93128E+07	3 45924E+07	2.89351E+07	2.30184E+07	1.74259E+07	1 25629E+07	8.63185E+06	5.65739E+06	3 54020E+06	2 11719E+06

П р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Функция $J^{\star}(u, \beta_1, \beta_2)$

Функция:
$$J^*(u, \beta_1, \beta_2) = 2 \int_1^\infty \exp \left[-\beta_1 (\tau - 1) - u \left(\tau^2 + \beta_2^2 \right) \right] \frac{\tau}{\tau^2 + \beta_2^2} d\tau$$
.

Предельные значения функции: $J^*(u, \infty, \beta_2) = J^*(\infty, \beta_1, \beta_2) = J^*(0, \infty, \beta_2) = 0$, $J^*(u, 0, \beta_2) = W(u + u\beta_2)$, где W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26).

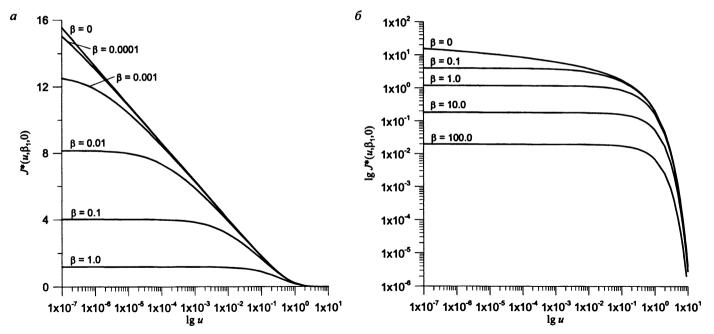


Рис. П20. Зависимость функции (a) и логарифма функции (b) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента (значение третьего аргумента равно нулю).

Значения функции $J^*(u, \beta_1, \beta_2)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u = 0, u = 10^{-7} \div 10$; $\beta_1 = 0, \beta_1 = 10^{-4} \div 100$; $\beta_2 = 0$.

Значения функции $J^{\star}(u, oldsymbol{eta}_1, oldsymbol{eta}_2)$

										<u> </u>		(// 1	,, ,,								
A	0	0.0001	0.0002	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	60
0	8	17.26818	15.88353	14.05540	12.67575	11.30136	9.49957	8.15702	6.84495	5.18886	4.02929	2.98670	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
1e-7	15.54088	15.02780	14.59153	13.59471	12.51436	11.25452	9.49162	8.15501	6.84445	5.18878	4.02926	2.98669	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		14.47649					9.48386	8.15301	6.84394	5.18869	4.02924	2.98669	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
3e-7	14.44227	14.13609	13.85838	13.15936	12.29795	11.17481	9 47626	8.15102	6.84343	5.18861	4.02922	2.98668	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
4e-7	14.15459	13.88787	13.64293	13.01379	12.21483	11.13981	9.46881	8.14904	6.84292	5.18852	4.02920	2.98667	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.69195					9.46151	8.14707	6.84241	5.18844	4.02918	2.98667	1.84582	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.52988					9.45435	8.14511	6.84191	5.18836	4.02915	2.98666	1.84581	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.39156					9.44732	8.14317	6.84140		4.02913	2.98666	1.84581	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.27085					9.44042	8.14123	6.84090		4.02911	2.98665	1.84581	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.16373					9.43363	8.13931	6 84040		4.02909	2.98664	1.84581	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		13.06741					9.42695	8.13739	6.83989	5.18802	4.02907	2.98664	1.84581	1.19269	0.72266	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		12.42371					9.36540	8.11878	6.83490		4.02885	2.98658	1.84580	1.19269	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		12.04040					9.31121	8.10103	6.82998	5.18635	4.02863	2.98652	1.84579	1.19268	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		11.76599					9.26244	8.08405	6.82513	5.18552	4.02841	2.98646	1.84577	1.19268	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		11.55194					9.21790		6.82034		4.02819	2.98640	1.84576	1.19267	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
6e-6		11.37634					9.17677	8.05202	6.81561	5.18386	4.02797	2.98634	1.84575	1.19267	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		11.22743						8.03686	6.81094		4.02775		1.84574	1.19267	0.72265	0.34084	0.18313	0.09544	0.03923	0.01980	0
		11.09812					9.10261	8.02219		5.18220	4.02753	2.98622	1.84573	1.19266	0.72265	0.34084	0.18312	0.09544	0.03923	0.01980	0
		10.98385					9.06880	8.00797	6.80177	5.18138	4.02731	2.98616	1.84571	1.19266	0.72264	0.34084	0.18312	0.09544	0.03923	0.01980	- 0
		10.88145					9.03681	7.99418	6.79727	5.18056	4.02709	2.98610	1.84570	1.19265	0.72264	0.34084	0.18312	0.09544	0.03923	0.01980	<u> </u>
2e-5 3e-5	9.83713	$\overline{}$	9.77542	9.68522		9.56130 9.27259	8.78332 8.59952	7.87396 7.77584	6.75478	5.17244	4.02491 4.02274	2.98550 2.98490	1.84558 1.84546	1.19261	0.72263	0.34083	0.18312	0.09543	0.03923	0.01980	
4e-5	9.54946	9.52271	9.49620	9.41809	9.29243	9.27239	8.45330		6.71614 6.68051	5.16450 5.15673	4.02274	2.98490	1.84534	1.19257	0.72261	0.34083	0.18312	0.09543	0.03923	0.01980	<u> </u>
5e-5	9.32632	9.30249	9.49620	9.41809	9.29243	8.88365	8.43330	7.61826	6.64734	5.13673	4.02039	2.98430	1.84534	1.19253	0.72258	0.34083	0.18312	0.09543	0.03923	0.01980	
6e-5	9.14401	9.12232	9.10080	9.03716	8.93414	8.73879	8.22568	7.55223	6.61624	5.14162	4.01631	2.98311	1.84510	1.19249	0.72257	0.34082	0.18312	0.09543	0.03923	0.01980	
7e-5	8.98987	8.96985	8.94997	8.89114	8.79571	8.61406	8.13280		6.58690	5.13428	4.01420	2.98252	1.84498	1.19243	0.72255	0.34082	0.18311	0.09543	0.03923	0.01980	
8e-5	8.85635	8.83768	8.81913	8.76418	8.67490		8.04964	7.43724	6.55910	5.12707	4.01209	2.98193	1.84486	1.19237	0.72254	0.34081	0.18311	0.09543	0.03923	0.01980	
9e-5	8.73858	8.72102	8.70357	8.65185	8.56769		7.97425	7.38632	6.53265	5.11998	4.00999	2.98133	1.84474	1.19233	0.72252	0.34080	0.18311	0.09543	0.03923	0.01980	
10-4	8.63322	8.61661	8.60009	8.55111	8.47130		7.90525	7.33887	6.50741	5.11300	4.00791	2.98074	1.84462	1.19229	0.72251	0.34080	0.18311		0.03923	0.01980	
2e-4	7.94018	7.92866	7.91719	7.88307	7.82712	7.71853	7.41707	6.98283	6.30093	5.04872	3.98764	2.97487	1.84343	1.19190	0.72236	0.34075	0.18308	0.09542	0.03922	0.01980	<u> </u>
3e-4	7.53481	7.52555	7.51632	7.48880		7.35529	7.10696	6.74076	6.14539	4.99214	3.96833	2.96909	1.84224	1.19150	0.72221	0.34070	0.18306	0.09541	0.03922	0.01980	
4e-4	7.24723	7.23930		7.20783	7.16900		6.87750	6.55501	6.01888	4.94122	3.94984	2.96339	1.84105	1.19110	0.72206	0.34065	0.18304	0.09540	0.03921	0.01980	0
5e-4	7.02419	7.01717		6.98930			6.69468	6.40346	5.91151	4.89473	3.93210	2.95776	1.83986	1.19070	0.72191	0.34060	0.18302	0.09538	0.03921	0.01979	0
6e-4	6.84197	6.83562	6.82929	6.81040		6.71792	6.54243	6.27507		4.85181	3.91501	2.95220	1.83868	1.19030	0.72176	0.34056	0.18299	0.09537	0.03921	0.01979	0
7e-4	6.68791	6.68209	6.67628	6.65892	6.63025	6.57386	6.41183	6.16349		4 81186	3.89852	2.94672	1.83750	1.18990	0.72161	0.34051	0.18297	0.09536	0.03920		0
8e-4	6.55448	6.54908	6.54368	6.52757	6.50093	6.44848	6.29740	6.06468		4.77443	3.88257	2.94130	1.83632	1.18950	0.72146	0.34046	0.18295	0.09535	0.03920		0
9e-4	6.43680	6.43174	6.42669	6.41160	6.38665	6.33747	6.19551	5.97595	5.59110	4.73917	3 86712	2.93595	1.83515	1.18911	0.72131	0.34041	0.18293	0.09534	0.03919	0.01979	0
1e-3	6.33154	6.32677	6.32201	6.30779	6.28426		6.10366	5.89536		4.70581	3.85213	2.93066	1.83398	1.18871	0.72116	0.34036	0.18291	0.09533	0.03919	0.01978	0
2e-3	5.63939	5.63619	5.63300	5.62345	5.60761	5.57625	5.48461	5.33957		4.44165	3.72161	2.88086	1.82242	1.18476	0.71967	0.33989	0.18269	0.09523	0.03915	0.01976	0
3e-3	5.23493	5.23241	5.22991	5.22240	5.20994	5.18522	5.11266	4.99678	4.78232	4.25040	3.61527	2.83565	1.81114	1.18084	0.71818	0.33941	0.18247	0.09512	0.03911	0.01974	0
4e-3	4.94824	4.94613	4.94403	4.93773	4.92726	4.90648	4.84531	4.74709	4.56357	4.09845	3.52453	2.79404	1.80012	1.17694	0.71669	0.33893	0.18225	0.09502	0.03907	0.01972	0
5e-3	4.72610	4.72426	4.72243	4.71694	4.70783	4.68972	4.63631	4.55022	4.38830	3.97161	3.44489	2.75539	1.78933	1 17308	0.71522	0.33845	0.18203	0.09491	0 03903	0.01970	0
6e-3	4.54477	4.54314	4.54151	4.53662	4.52849	4.51234	4.46464	4.38754	4.24180	3.86237	3.37367	2.71921	1.77877	1.16925	0.71374	0.33798	0.18181	0.09481	0.03899	0.01968	0

B	0	0.0001	0.0002	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	80
7e-3	4.39162	4.39014	4.38866	4.38423	4.37687	4.36224	4.31895	4.24885	4.11581	3.76622	3.30908	2.68515	1.76843	1.16544	0.71227	0.33750	0.18159	0.09470	0.03895	0.01966	0
8e-3	4.25908	4.25773	4.25637	4.25231	4.24557	4.23214	4.19241	4.12794	4.00520	3.68023	3.24989	2.65292	1.75828	1.16167	0.71081	0.33703	0.18138	0.09460	0.03891	0.01964	0
9e-3	4.14229	4.14104	4.13979	4.13603	4.12979	4.11736	4.08056	4.02075	3.90658	3.60237	3.19519	2.62231	1.74833	1.15792	0.70935	0.33655	0.18116	0.09450	0.03886	0.01962	0
1e-2	4.03793	4.03676	4.03559	4.03209	4.02627	4.01469	3.98035	3.92447	3.81758	3.53119	3.14429	2.59313	1.73856	1.15420	0.70789	0.33608	0.18094	0.09439	0.03882	0.01960	0
2e-2	3.35471	3.35399	3.35327	3.35112	3.34753	3.34039	3.31914	3.28432	3.21688	3.03053	2.76487	2.35644	1.64940	1.11837	0.69357	0.33139	0.17878	0.09336	0.03842	0.01940	0
3e-2	2.95912	2.95859	2.95806	2.95647	2.95383	2.94857	2.93288	2.90710	2.85688	2.71609	2.51011	2.18068	1.57226	1.08482	0.67968	0.32678	0.17665	0.09234	0.03803	0.01921	0
4e-2	2.68126	2.68084	2.68042	2.67916	2.67706	2.67287	2.66039	2.63983	2.59963	2.48596		2.03962	1.50396	1.05326	0.66619	0.32223	0.17454	0.09133	0.03763	0.01901	0
5e-2	2.46790	2.46755	2.46720	2.46615	2.46441	2.46093	2.45056	2.43346	2.39993	2.30456	2.16111	1.92143	1.44254	1.02344	0.65309	0.31776	0.17246	0.09033	0.03724	0.01882	0
6e-2	2.29531	2.29501	2.29471	2.29382	2.29233	2.28936	2.28050	2.26587	2.23716	2.15509	2.03059	1.81962	1.38666	0.99519	0.64036	0.31335	0.17041	0.08934	0.03686	0.01863	0
7e-2	2.15084	2.15058	2.15032	2.14954	2.14825		2.13794	2.12519		2.02823	1.91840	1.73021	1.33540	0.96835	0.62797	0.30902	0.16838	0.08837	0.03648	0.01844	0
8e-2	2.02694	2.02671	2.02648	2.02580	2.02465		2.01554	2.00427	1.98207	1.91822	1.82015	1.65053	1.28803	0.94278	0.61592	0.30475	0.16637	0.08740	0.03610	0.01825	0
9e-2	1.91874	1.91854	1.91834	1.91772	1.91670		1.90856			1.82129	1.73287	1.57873	1.24401	0.91838		0.30054	0.16439	0.08644	0.03573	0.01807	0
le-1	1.82292	1.82274	1.82255	1.82200	1.82108		1.81373	1.80463	1.78668	1.73481	1.65445	1.51343	1.20291	0.89504	0.59277	0.29640	0.16244	0.08550	0.03536		0
2e-1	1.22265	1.22256	1.22248	1.22222	1.22178	1.22092	1.21833	1.21404	1.20555	1.18071	1.14138	1.06965	0.89811	0.70627	0.49308	0.25827	0.14415	0.07660	0.03186	0.01615	0
3e-1	0.90568	0.90563	0.90557	0.90542	0.90516	0.90465	0.90312	0.90057	0.89551	0.88065	0.85688	0.81274	0.70275	0.57151	0.41413	0.22545	0.12798	0.06864	0.02872	0.01458	
4e-1	0.70238	0.70235	0.70231	0.70221	0.70204	0.70171	0.70070	0.69902	0.69569	0.68587	0.67005	0.64037	0.56446	0.46996		0.19712	0.11367	0.06151	0.02588		0
5e-1	0.55977	0.55975	0.55973	0.55966	0.55954		0.55860	0.55743		0.54822	0.53709	0.51605	0.46124	0.39088		0.17259	0.10099	0.05513	0.02333	0.01189	0
6e-1	0.45438	0.45436	0.45435	0.45429	0.45421	0.45404	0.45353	0.45267	0.45098	0.44597	0.43785	0.42239	0.38158	0.32792	0.25482	0.15131	0.08977	0.04941	0.02103		0
7e-1	0.37377	0.37376	0.37374	0.37370	0.37364	0.37351	0.37313	0.37250		0.36748	0.36139	0.34974	0.31864	0.27698	0.21868	0.13281	0.07982	0.04430	0.01895	0.00970	
8e-1	0.31060	0.31059	0.31058	0.31055	0.31050	0.31040	0.31011	0.30963	0.30866	0.30579	0.30113	0.29218	0.26807	0.23526	0.18829	0.11670	0.07100	0.03971	0.01708		0
9e-1	0.26018	0.26018	0.26017	0.26015	0.26011	0.26003	0.25981	0.25943	0.25868	0.25645	0.25282	0.24584	0.22688	0.20074		0.10264	0.06317	0.03560	0.01540		0
1e+0	0.21938	0.21938	0.21937	0.21935	0.21932		0.21909	0.21879		0.21645	0.21359	0.20807	0.19299	0.17197	0.14076	0.09036	0.05623	0.03192	0.01388		0
2e+0	0.04890	0.04890	0.04890	0.04890	0.04889	0.04888	0.04886	0.04882	0.04874	0.04850	0.04810	0.04732	0.04513	0.04187	0.03654	0.02629	0.01781	0.01077	0.00492	0.00258	0
3e+0	0.01305	0.01305	0.01305	0.01305	0.01305	0.01305	0.01304	0.01303	0.01302	0.01297	0.01289	0.01274	0.01230	0.01162	0.01046	0.00803	0.00576	0.00366	0.00174	0.00093	
4e+0	0.00378	0.00378	0.00378	0.00378	0.00378	0.00378	0.00378	0.00378		0.00376	0.00374	0.00371	0.00360	0.00344	0.00316	0.00253	0.00189	0.00125	0.00062	0.00034	0
5e+0	0.00115	0.00115	0.00115	0.00115	0.00115	0.00115	0.00115	0.00115		0.00114	0.00114	0.00113	0.00110	0.00106	0.00099	0.00082	0.00063	0.00043	0.00022	0.00012	
6e+0	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036		0.00036	0.00036	0.00036	0.00035	0.00034	0.00032	0.00027	0.00021	0.00015	0.00008		<u>0</u>
7e+0	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011	0.00010	0.00009	0.00007	0.00005	0.00003	0.00002	
8e+0	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00003	0.00003	0.00002	0.00002	0.00001	0.00001	<u>0</u>
9e+0	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00000		<u>u</u>
le+1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000]	U

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1965.

приложение 21

Функция Бесселя 1-го рода $J_m(u)$ порядков $2\div11$

Функция:
$$J_m(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(u \sin \tau - m\tau) d\tau$$
.

Разложение в ряд:
$$J_m(u) = \left(\frac{u}{2}\right)^m \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(-u^2/4\right)^n}{n!(m+n)!}$$
.

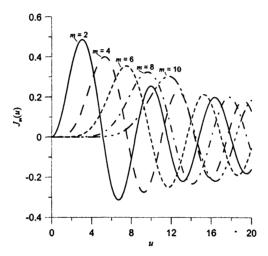


Рис. П21. Зависимость функции от аргумента для различных порядков функции.

Значения $J_m(u)$ для аргумента $u=0\div 20.0$ и для порядка $m=2\div 11$

		·	* ` /				<u>-</u> _			
	2	3	4	5	6	7	8	9 1	10	11
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1 24896E-03	2 08203E-05	2 60286E-07	2 60308E-09	2 16936E-11	1 54961E-13	9 68543E-16	5 38094E-18	2 69053E-20	1 22299E-22
0.2	4 98335E-03	1 66250E-04	4 15834E-06	8 31945E-08	1 38691E-09	1 98165E-11	2 47740E-13	2 75298E-15	2 75323E-17	2 50312E-19
0.3	1 11659E-02	5 59343E-04	2 09990E-05	6 30443E-07	1 57695E-08	3 38054E-10	6 34050E-12	1 05701E-13	1 58585E-15	2 16289E-17
0.4	1 97347E-02	1 32005E-03	6 61351E-05	2 64894E-06	8 83822E-08	2 52701E-09	6 32104E-11	1 40530E-12	2 81163E-14	5 11360E-16
0.5	3 06040E-02	2 56373E-03	1 60736E-04	8 05363E-06	3 36068E-07	1.20159E-08	3 75822E-10	1 04468E-11	2 61318E-13	5 94185E-15
0.6	4 36651E-02	4 39966E-03	3 31470E-04	1 99482E-05	9 99555E-07	4 29071E-08	1 61103E-09	5 37549E-11	1 61397E-12	4 40474E-14
0.7	5 87869E-02	6 92965E-03	6 10097E-04	4.28824E-05	2 50881E-06	1 25716E-07	5 50945E-09	2 14549E-10	7 51759E-12	2 39418E-13
0.8	7 58178E-02	1 02468E-02	1 03298E-03	8 30836E-05	5 56015E-06	3 18635E-07	1 59673E-08	7 10924E-10	2 84784E-11	1 03684E-12
0.9	9 45863E-02	1 44340E-02	1 64055E-03	1.48658E-04	1.12036E-05	7 22850E-07	4 07753E-08	2 04337E-09	9 21215E-11	3 77440E-12
1.0	1 14903E-01	1 95634E-02	2 47664E-03	2 49758E-04	2 09383E-05	1 50233E-06	9 42234E-08	5 24925E-09	2 63062E-10	1 19801E-11
1.1	1 36564E-01	2 56945E-02	3 58782E-03	3 98710E-04	3 68150E-05	2 90838E-06	2 00798E-07	1 23125E-08	6 79058E-10	3 40311E-11
1.2	1 59349E-01	3 28743E-02	5 02267E-03	6 10105E-04	6 15414E-05	5 30928E-06	4 00205E-07	2 67879E-08	1.61256E-09	8 81991E-11
1.3	1 83027E-01	4 11358E-02	6 83096E-03	9 00841E-04	9 85905E-05	9 22484E-06	7 53964E-07	5 47108E-08	3 56996E-09	2 11631E-10
1.4	2 07356E-01	5 04977E-02	9 06287E-03	1 29013E-03	1 52307E-04	1 53661E-05	1 35380E-06	1 05874E-07	7 44450E-09	4 75512E-10
1.5	2 32088E-01	6 09640E-02	1.17681E-02	1.79942E-03	2.28013E-04	2 46798E-05	2 33207E-06	1 95567E-07	1 47433E-08	1 00954E-09
1.6	2 56968E-01	7.25234E-02	1.49952E-02	2 45236E-03	3 32101E-04	3 83972E-05	3.87441E-06	3 46873E-07	2.79130E-08	2 03997E-09
1.7	2 81739E-01	8 51499E-02	1 87902E-02	3.27460E-03	4 72130E-04	5 80872E-05	6 23484E-06	5 93643E-07	5 07952E-08	3 94678E-09
1.8	3.06144E-01	9 88020E-02	2 31965E-02	4 29361E-03	6 56899E-04	8 57125E-05	9 75338E-06	9 84263E-07	8 92449E-08	7 34718E-09
1.9	3 29926E-01	1 13423E-01	2.82535E-02	5 53849E-03	8 96512E-04	1.23688E-04	1 48764E-05	1 58632E-06	1 51956E-07	1 32144E-08
2.0	3 52834E-01	1 28943E-01	3 39957E-02	7.03963E-03	1 20243E-03	1 74944E-04	2 21796E-05	2 49234E-06	2 51539E-07	2 30428E-08
2.1	3 74624E-01	1 45277E-01	4 04526E-02	8.82842E-03	1 58750E-03	2 42983E-04	3 23938E-05	3 82663E-06	4 05899E-07	3 90736E-08
2.2	3.95059E-01	1.62325E-01	4 76471E-02	1 09369E-02	2 06595E-03	3 31946E-04	4 64337E-05	5 75345E-06	6 39985E-07	6 45953E-08
2.3	4 13915E-01	1 79979E-01	5 55957E-02	1 33973E-02	2 65343E-03	4.46669E-04	6 54286E-05	8 48656E-06	9 87953E-07	1 04340E-07
2.4	4 30980E-01	1 98115E-01	6 43070E-02	1 62417E-02	3 36689E-03	5 92740E-04	9 07560E-05	1 23002E-05	1 49583E-06	1 64998E-07
2.5	4 46059E-01	2 16600E-01	7 37819E-02	1 95016E-02	4 22462E-03	7 76553E-04	1 24077E-04	1 75420E-05	2 22473E-06	2 55870E-07
2.6	4 58973E-01	2.35294E-01	8 40129E-02	2 32073E-02	5 24608E-03	1 00536E-03	1 67375E-04	2 46466E-05	3 25472E-06	3 89693E-07
2.7	4 69562E-01	2 54045E-01	9 49836E-02	2.73876E-02	6.45184E-03	1 28729E-03	2 22993E-04	3 41524E-05	4 68937E-06	5 83669E-07
2.8	4.77685E-01	2 72699E-01	1 06669E-01	3 20690E-02	7 86343E-03	1 63142E-03	2 93674E-04	4 67189E-05	6 66114E-06	8 60727E-07
2.9	4 83227E-01	2 91093E-01	1.19033E-01	3 72756E-02	9 50315E-03	2 04776E-03	3 82602E-04	6 31459E-05	9 33755E-06	1 25106E-06
3.0	4 86091E-01	3 09063E-01	1.32034E-01	4 30284E-02	1 13939E-02	2 54729E-03	4 93442E-04	8 43950E-05	1 29284E-05	1 79399E-06
3.1	4 86207E-01	3 26443E-01	1 45618E-01	4 93448E-02	1 35591E-02	3 14195E-03	6 30378E-04	1 11612E-04	1 76936E-05	2 54016E-06

	2	3	4	5	6	7	8	•	10	11
3.2	4 83528E-01	3 43066E-01	1 59722E-01	5 62380E-02	1 60220E-02	3 84461E-03	7 98153E-04	1 46152E-04	2 39530E-05	3 55417E-06
3.3	4 78032E-01	3 58769E-01	1.74275E-01	6 37169E-02	1 88061E-02	4 66909E-03	1,00211E-03	1 89604E-04	3 20960E-05	4 91766E-06
3.4	4 69723E-01	3 73389E-01	1 89199E-01	7.17854E-02	2 19344E-02	5 63005E-03	1.24820E-03	2 43816E-04	4 25933E-05	6 73284E-06
3.5	4.58629E-01 4 44805E-01	3 86770E-01 3 98763E-01	2 04405E-01 2 19799E-01	8 04420E-02 8 96797E-02	2 54290E-02 2.93112E-02	6.74300E-03	1 54305E-03	3 10928E-04	5 60095E-05 7 30169E-05	9 12666E-06 1 22555E-05
3.6	4 28330E-01	4 09225E-01	2 35279E-01	9 94854E-02	3 36009E-02	8 02417E-03 9 49045E-03	1 89395E-03 2 30891E-03	3 93394E-04 4 94015E-04	9 44103E-05	1 63107E-05
3.8	4 09304E-01	4 18026E-01	2 50736E-01	1 09840E-01	3 83164E-02	1 11593E-02	2 79661E-03	6 15967E-04	1 21123E-04	2 15242E-05
3.9	3 87855E-01	4 25044E-01	2 66059E-01	1.20718E-01	4 34740E-02	1 30484E-02	3 36649E-03	7 62827E-04	1 54246E-04	2 81759E-05
4.0	3 64128E-01	4 30171E-01	2 81129E-01	1 32087E-01	4.90876E-02	1.51761E-02	4 02867E-03	9 38602E-04	1 95041E-04	3.66009E-05
4.1	3.38292E-01		2 95827E-01	1 43908E-01	5.51683E-02	1 75604E-02	4 79396E-03	1 14776E-03	2 44965E-04	4 71979E-05
4.2	3 10535E-01 2.81059E-01		3 10029E-01 3 23611E-01	1 56136E-01 1 68720E-01	6 17245E-02 6.87611E-02	2.02195E-02 2 31714E-02	5 67387E-03	1 39523E-03 1 68647E-03	3 05691E-04 3 79121E-04	6 04386E-05 7 68775E-05
4.4	2 50086E-01	4 30127E-01	3 36450E-01	1 81601E-01	7 62792E-02	2 64333E-02	6 68054E-03 7 82670E-03	2 02745E-03	4 67415E-04	9 71630E-05
4.5	2 17849E-01	4 24704E-01	3 48423E-01	1 94715E-01	8 42763E-02	3.00220E-02	9 12563E-03	2 42466E-03	5 73010E-04	1 22049E-04
4.6	1 84593E-01	4 17069E-01	3 59409E-01	2 07991E-01	9 27455E-02	3.39534E-02	1 05911E-02	2.88515E-03	6.98639E-04	1 52408E-04
4.7	1 50573E-01	4 07228E-01	3 69292E-01	2 21355E-01	1 01676E-01	3 82421E-02	1 22372E-02	3 41653E-03	8 47358E-04	1 89244E-04
4.8	1 16050E-01 8 12915E-02	3 95209E-01 3 81055E-01	3 77960E-01	2 34725E-01	1 11051E-01	4 29014E-02 4.79429E-02	1 40785E-02	4 02695E-03	1 02256E-03	2 33706E-04
5.0	4 65651E-02	3 64831E-01	3 85307E-01 3 91232E-01	2 48017E-01 2 61141E-01	1 20850E-01 1 31049E-01	5 33764E-02	1 61296E-02 1 84052E-02	4 72512E-03 5 52028E-03	1 22800E-03 1 46780E-03	2 87105E-04 3 50927E-04
5.1	1.21398E-02	3 46619E-01	3 95647E-01	2 74004E-01	1 41616E-01	5 92094E-02	2 09201E-02	6 42220E-03	1 74651E-03	4 26851E-04
5.2	-2.17184E-02	3 26517E-01	3 98468E-01	2 86512E-01	1 52515E-01	6 54473E-02	2 36887E-02	7 44114E-03	2 06905E-03	5 16763E-04
5.3	-5 47481E-02	3 04641E-01	3.99625E-01	2 98567E-01	1 63708E-01	7 20925E-02	2 67254E-02	8 58782E-03	2 44081E-03	6 22775E-04
5.4	-8 66954E-02	2 81126E-01	3 99058E-01	3 10070E-01	1 75147E-01	7 91449E-02	3 00437E-02	9 87338E-03	2 86757E-03	7 47240E-04
5.5	-1 17315E-01 -1 46375E-01	2 56118E-01 2 29779E-01	3 96717E-01 3.92567E-01	3 20925E-01 3 31031E-01	1 86783E-01 1 98560E-01	8 66012E-02 9 44548E-02	3 36568E-02	1 13093E-02	3 35558E-03 3 91153E-03	8 92772E-04 1 06226E-03
5.7	-1 73656E-01	2 02284E-01	3 86586E-01	3.40294E-01	2 10420E-01	1 02696E-01	3 75768E-02 4 18150E-02	1 29075E-02 1 46799E-02	4 54255E-03	1 25887E-03
5.8	-1.98954E-01	1 73818E-01	3 78766E-01	3.48617E-01	2 22298E-01	1.11310E-01	4 63815E-02	1 66388E-02	5 25623E-03	1 48610E-03
5.9	-2 22082E-01	1 44579E-01	3 69111E-01	3,55911E-01	2.34127E-01	1 20281E-01	5 12848E-02	1 87965E-02	6 06056E-03	1 74775E-03
6.0	-2 42873E-01	1 14768E-01	3 57642E-01	3 62087E-01	2 45837E-01	1 29587E-01	5 65320E-02	2 11653E-02	6 96398E-03	2 04795E-03
6.1	-2 61182E-01	8 45982E-02	3 44393E-01	3 67065E-01	2 57352E-01	1 39202E-01	6 21284E-02	2 37574E-02	7 97530E-03	2 39118E-03
6.2	-2 76882E-01 -2 19871E-01	5 42833E-02 2 40416E-02	3 29414E-01 3 12768E-01	3.70767E-01 3.73124E-01	2 68597E-01 2 79493E-01	1 49099E-01 1 59243E-01	6 80772E-02 7 43798E-02	2 65846E-02 2 96585E-02	9 10372E-03 1 03588E-02	2 78229E-03 3 22646E-03
6.4	-3 00072E-01	-5 90769E-03	2 94534E-01	3.74075E-01	2 89958E-01	1 69597E-01	8 10349E-02	3 29903E-02	1 17502E-02	3 72925E-03
6.5	-3 07430E-01	-3 53466E-02	2 74803E-01	3 73565E-01	2 99913E-01	1 80121E-01	8 80388E-02	3 65903E-02	1 32883E-02	4 29661E-03
6.6	-3 11916E-01	-6 40599E-02	2.53680E-01	3 71551E-01	3 09276E-01	1 90769E-01	9 53853E-02	4 04684E-02	1 49831E-02	4 93483E-03
6.7	-3 13525E-01	-9 18370E-02	2 31283E-01	3 67996E-01	3 17964E-01	2 01493E-01	1 03065E-01	4 46333E-02	1 68451E-02	5 65056E-03
6.8	-3 12278E-01	-1 18474E-01	2 07742E-01	3.62876E-01	3.25899E-01	2.12241E-01	1 11067E-01	4 90928E-02	1 88848E-02	6 45084E-03
6.9	-3 08219E-01 -3 01417E-01	-1 43775E-01	1 83197E-01 1 57798E-01	3 56177E-01	3 33002E-01	2 22957E-01	1 19375E-01	5 38535E-02	2 11128E-02	7 34301E-03
7.0	-2 91966E-01	-1 67556E-01 -1 89641E-01	1 31706E-01	3.47896E-01 3 38042E-01	3.39197E-01 3 44410E-01	2 33584E-01 2 44059E-01	1 27971E-01 1 36833E-01	5 89205E-02 6 42976E-02	2 35393E-02 2 61747E-02	8 33476E-03 9 43409E-03
7.2	-2 79980E-01	-2 09872E-01	1 05087E-01	3.26635E-01	3.48573E-01	2 54320E-01	1 45938E-01	6 99867E-02	2 90290E-02	1 06493E-02
7.3	-2 65595E-01	-2 28102E-01	7 81139E-02	3.13706E-01	3 51621E-01	2.64300E-01	1 55257E-01	7 59882E-02	3 21116E-02	1 19888E-02
7.4	-2 48968E-01	-2 44202E-01	5 09660E-02	2 99301E-01	3 53494E-01	2.73933E-01	1 64758E-01	8 23003E-02	3 54319E-02	1 34615E-02
7.5	-2 30273E-01	-2 58061E-01	2 38247E-02	2.83474E-01	3 54141E-01	2.83151E-01	1 74408E-01	8 89192E-02	3 89983E-02	1 50761E-02
7.6	-2 09703E-01 -1 87465E-01	-2 69584E-01 -2 78697E-01	-3 12601E-03 -2 97016E-02	2.66293E-01 2 47838E-01	3.53512E-01 3.51569E-01	2 91884E-01 3 00062E-01	1.84168E-01	9 58389E-02	4 28187E-02	1 68418E-02 1 87676E-02
7.7	-1 63778E-01	-2 85346E-01	-5 57187E-02	2 28198E-01	3 48280E-01	3 07618E-01	1 93998E-01 2 03854E-01	1 03051E-01 1 10545E-01	4 69002E-02 5 12489E-02	2 08627E-02
7.9	-1 38873E-01	-2 89495E-01	-8 09963E-02	2 07474E-01	3 43621E-01	3 14482E-01	2 13690E-01	1 18307E-01	5 58699E-02	2 31361E-02
8.0	-1 12992E-01	-2 91132E-01	-1 05357E-01	1 85775E-01	3 37576E-01	3.20589E-01	2 23455E-01	1.26321E-01	6 07670E-02	2 55967E-02
8.1	-8 63797E-02	-2 90264E-01	-1 28631E-01	1 63222E-01	3 30139E-01	3 25873E-01	2 33099E-01	1 34569E-01	6 59429E-02	2 82533E-02
8.2	-5 92888E-02	-2 86920E-01	-1 50653E-01	1 39942E-01	3 21313E-01	3,30273E-01	2 42567E-01	1 43029E-01	7 13987E-02	3 11143E-02
8.3	-3 19725E-02 -4 68434E-03	-2 81148E-01 -2.73017E-01	-1 71267E-01 -1 90328E-01	1 16071E-01 9 17524E-02	3 11112E-01 2 99557E-01	3 33729E-01 3 36186E-01	2 51804E-01 2 60753E-01	1 51677E-01 1 60486E-01	7 71340E-02 8 31466E-02	3 41879E-02 3 74817E-02
8.5	2 23247E-02	-2 62616E-01	-2 07701E-01	6 71330E-02	2 86681E-01	3 37593E-01	2 69355E-01	1 69427E-01	8 94329E-02	4 10029E-02
8.6	4 88084E-02	-2 50053E-01	-2 23264E-01	4 23657E-02	2 72527E-01	3 37904E-01	2 77550E-01	1 78467E-01	9 59869E-02	4 47578E-02
8.7	7 45271E-02	-2.35454E-01	-2 36909E-01	1.76064E-02	2 57146E-01	3.37078E-01	2 85278E-01	1 87572E-01	1 02801E-01	4 87523E-02
8.8	9 92506E-02	-2 18960E-01	-2 48541E-01	-6.98685E-03	2.40602E-01	3 35080E-01	2.92480E-01	1 96702E-01	1 09865E-01	5 29913E-02
9.0	1 22759E-01 1.44847E-01	-2 00730E-01 -1 80935E-01	-2 58083E-01 -2 65471E-01	-3.12549E-02 -5 50389E-02	2 22965E-01 2 04317E-01	3.31882E-01 3.27461E-01	2 99096E-01 3.05067E-01	2 05819E-01 2 14881E-01	1 17168E-01 1 24694E-01	5 74787E-02
9.0	1.4484/E-01	-1.59761E-01	-2 70660E-01	-7 81816E-02	1 84746E-01	3.2/461E-01 3 21803E-01	3.0306/E-01 3.10335E-01	2 23841E-01	1.32428E-01	6 22174E-02 6 72092E-02
9.1	1.84011E-01	-1.37404E-01	-2 73622E-01	-1 00529E-01	1 64352E-01	3.14901E-01	3 14845E-01	2 32656E-01	1 40351E-01	7 24546E-02
9.3	2 00755E-01	-1 14068E-01	-2.74347E-01	-1 21930E-01	1 43240E-01	3 06755E-01	3 18542E-01	2 41275E-01	1 48441E-01	7 79527E-02
9.4	2 15417E-01	-8 99655E-02	-2.72842E-01	-1 42240E-01	1.21522E-01	2.97375E-01	3.21376E-01	2 49649E-01	1 56675E-01	8 37013E-02
9.5	2 27879E-01 2 38046E-01	-6 53153E-02	-2 69131E-01	-1 61321E-01	9.93191E-02	2 86777E-01	3.23300E-01	2 57728E-01	1 65026E-01	8 96964E-02
9.6	2 38046E-01 2 45845E-01	-4 03388E-02 -1 52594E-02	-2 63258E-01 -2 55283E-01	-1 79043E-01 -1.95284E-01	7 67551E-02 5 39601E-02	2.74987E-01 2 62038E-01	3 24267E-01 3 24240E-01	2 65459E-01 2.72790E-01	1 73468E-01 1 81968E-01	9 59326E-02 1 02403E-01
9.7	2 51223E-01	9 69990E-03	-2.45284E-01	-2 09932E-01	3,10680E-02	2 47974E-01	3.23181E-01	2.72/90E-01 2.79668E-01	1 90495E-01	1 09098E-01
9.9	2.54153E-01	3.43183E-02	-2 33354E-01	-2 22887E-01	8 21544E-03	2 32845E-01	3 21061E-01	2 86041E-01	1 99014E-01	1 16007E-01
10.0	2.54630E-01	5.83794E-02	-2.19603E-01	-2 34062E-01	-1 44588E-02	2 16711E-01	3.17854E-01	2.91856E-01	2 07486E-01	1 23117E-01
10.1	2 52672E-01	8.16727E-02	-2 04154E-01	-2.43379E-01	-3 68152E-02	1.99638E-01	3.13541E-01	2 97061E-01	2 15874E-01	1 30413E-01
10.2	2 48320E-01	1 03996E-01 1.25157E-01	-1 87146E-01 -1.68729E-01	-2 50777E-01	-5.87141E-02	1.81702E-01 1 62984E-01	3 08108E-01	3 01606E-01	2 24137E-01	1 37879E-01
10.3	2 41636E-01 2.32704E-01	1.2515/E-01 1.44974E-01	-1.68/29E-01	-2 56208E-01 -2 59640E-01	-8 00173E-02 -1.00589E-01	1.43576E-01	3.01549E-01 2.93864E-01	3 05442E-01 3 08522E-01	2 32233E-01 2.40117E-01	1 45495E-01 1 53241E-01
10.5	2 21629E-01	1 63280E-01	-1.28326E-01	-2 61053E-01	-1 20295E-01	1.23572E-01	2 85058E-01	3 10802E-01	2 47746E-01	1 61094E-01
10.6	2 08535E-01	1.79921E-01	-1 06693E-01	-2.60444E-01	-1.39009E-01	1 03076E-01	2.75147E-01	3 12240E-01	2 55072E-01	1 69029E-01
10.7	1.93564E-01	1 94760E-01	-8.43532E-02	-2.57828E-01	-1.56607E-01	8,21933E-02	2 64150E-01	3.12797E-01	2 62051E-01	1 77018E-01
10.8	1.76875E-01	2 07676E-01	-6 14994E-02	-2 53231E-01	-1 72974E-01	6.10380E-02	2 52097E-01	3 12439E-01	2 68635E-01	1 85033E-01
10.9	1 58640E-01 1,39048E-01		-3 83286E-02 -1.50395E-02	-2 46697E-01 -2.38286E-01	-1 87999E-01 -2 01584E-01	3 97257E-02 1.83760E-02	2 39023E-01 2 24972E-01	3 11134E-01	2.74776E-01	1 93042E-01
11.0	1.39048E-01	2.2/348E-01 2.33957E-01	8 16852E-03	-2.28070E-01	-2.13637E-01	-2.88892E-03	2 249/2E-01 2 09993E-01	3 08856E-01 3 05582E-01	2.80428E-01 2 85545E-01	2 01014E-01 2 08913E-01
11.2	9.65896E-02	2 38349E-01	3.10976E-02	-2 16137E-01	-2 24077E-01	-2 39456E-02	1 94145E-01	3.01296E-01	2 90080E-01	2 16704E-01
11.3	7.41472E-02	2 40502E-01	5 35529E-02	-2 02588E-01	-2 32835E-01	-4 46696E-02	1.77492E-01	2 95985E-01	2.93989E-01	2 24350E-01
11.4	5.11881E-02	2.40411E-01	7.53442E-02	-1 87538E-01	-2.39851E-01	-6 49369E-02	1.60104E-01	2 89645E-01	2.97229E-01	2 31810E-01
11.5	2.79359E-02	2 38095E-01	9 62878E-02	-1.71113E-01	-2 45081E-01	-8 46245E-02	1 42060E-01	2.82274E-01	2 99759E-01	2 39047E-01
11.6	4.61559E-03	2 33592E-01	1.16208E-01	-1 53449E-01	-2.48491E-01	-1.03611E-01	1 23443E-01	2 73878E-01	3 01539E-01	2 46018E-01
11.7 11.8	-1.85491E-02 -4.13375E-02	2.26959E-01 2.18272E-01	1 34938E-01 1 52323E-01	-1.34693E-01 -1.15002E-01	-2 50061E-01 -2 49783E-01	-1 21779E-01 -1.39014E-01	1.04342E-01 8 48505E-02	2 64469E-01 2 54066E-01	3 02533E-01 3 02707E-01	2 52682E-01 2 58998E-01
11.9	-6.35340E-02		1.68220E-01	-9.45382E-02	-2.47664E-01	-1.55207E-01	6 50675E-02	2 42693E-01	3 02031E-01	2 64922E-01

1.0 1571EG 1 1590EG 1											
12.0 497055-02 191116-01 192066-01 197066-01										- 10 T	
1.0	12.0							4 50953E-02			2 70412E-01
1.323184.01 1.51386.02 1.61586.03 1.61586.03 1.62586.03 1.											2 75427E-01
1.12 1.47355-01 179755-01 219755-01 21975-02											2 79925E-01
1.12											2 83865E-01
1.124 - 180716-01 1.100008-01 2.2616-01 3.77776-02 - 1.9978-01 3.2617											2 87206E-01
1.00 1.00											2 89912E-01
1.971656-01 45010-60 229577-01 260958-00 -160958-01 -20070											2 91944E-01
1.19 1.19	12.7			2 29557E-01	7 60395E-02	-1 69683E-01	-2 36370E-01	-9 08822E-02	1 21873E-01		2 93269E-01
1.1 1.1	12.8	-2 06113E-01	4 70214E-02	2 28154E-01	9 55747E-02	-1 53486E-01	-2 39468E-01	-1 08432E-01	1.03928E-01	2 54581E-01	2 93854E-01
1.1 1.1	12.9	-2 12989E-01	2 52050E-02	2 24713E-01	1 14152E-01	-1 36223E-01	-2.40871E-01	-1 25187E-01	8 55999E-02	2 44629E-01	2 93670E-01
1.1 2.2047E-01 146395-02 21095-01 147375-01 2.9057E-01 2.9057E-01 146326-02 220505-01 1265	13.0		3 31982E-03	2 19276E-01		-1 18031E-01	-2 40571E-01		6 69762E-02	2 33782E-01	2 92688E-01
13.1 1997E-01 4-07002-02 1998E-01 17902E-01 2-3998E-02 2-3998E-01 12292E-01 10001E-02 19977E-01 2-2415513 1.0001E-02 19977E-01 17972E-01 17972E-	13.1	-2 20347E-01	-1 84289E-02	2 11906E-01	1 47837E-01	-9 90531E-02	-2.38573E-01	-1 55910E-01	4 81482E-02	2 22068E-01	2 90887E-01
1.1. 1.1.	13.2	-2 20787E-01	-3 98384E-02	2 02679E-01	1 62674E-01	-7 94407E-02	-2 34893E-01	-1 69688E-01	2 92104E-02	2 09520E-01	2 88245E-01
1.15 2.0935E0 1.0000E0 1.4977E0 1.7977E20 1.4506E0 2.1077E0 2.2077E0 2.2077E0 2.2077E0 1.5007E0 1	13.3	-2 19077E-01	-6 07102E-02	1 91689E-01	1 76012E-01	-5 93490E-02	-2 29560E-01	-1 82293E-01	1 02601E-02	1 96179E-01	2 84745E-0
1.00 1.00	13.4	-2 15248E-01	-8 08521E-02	1 79045E-01	1 87745E-01	-3.89372E-02	-2 22614E-01	-1 93645E-01	-8 60335E-03	1 82088E-01	2 80376E-0
13.1 191667E-01 13161E-01 13161E-01 13161E-01 2,1707E-01 436966-02 1797E-01 2,197E-01 2,197E-0											2 75129E-01
1.18 1.1807E-01 1.059E-00 1.979E-00 2.7705E-01 2.7205E-00 2.7205E-00 2.7205E-00 2.7205E-00 2.7505E-00		-2 01462E-01									2 68999E-01
1.46 1.5000.001 1.7640.002 0.7540.002 2.2907E-00 6.2725E-02 1.55093E-00 2.2907E-00 1.4000.002 1.2907E-00 1.5000.002 2.35785 1.400.002 1.2907E-00 1.2007E-00 1.2007E-00 1.2007E-00 2.35785 1.400.002 1.2007E-00 1.2007E-00 1.2007E-00 2.35785 1.400.002 1.400.002 1.2007E-00 1.2007E-00 1.400.002 1.400.0		-1 91667E-01	-1 35104E-01		2.12475E-01						2 61989E-0
14.00		-1 80076E-01	-1 50586E-01								2 54101E-0
14.1 135849E-01 18773E-01 5.61546E-02 219778E-01 19795E-02 13405E-01 237346E-01 14776E-00 47736E-02 214078E-01 14.2 14466E-01 19795E-01 35746E-01 14406E-01 14755E-01 11705E-01 37746E-01 14776E-01 15105E-02 214078E-01 14.4 8.7055E-02 22073E-01 44944E-02 21104E-01 14755E-01 31904E-01 37946E-01 15105E-02 22073E-01 14406E-02 21073E-01 14755E-01 31904E-01 31904E-01 37946E-01 15105E-02 22073E-01 14755E-01 31904E-01											2 45349E-0
14.2 118466-01 19998E-01 36974E-02 211076-01 130006-01 201316-01 31908E-01 315006-02 21002-02 14.4 367935E-02 2-0472E-01 36140E-03 21107E-01 132006-01 31500E-03 31500E-02 31500E-02 31500E-02 31500E-02 31500E-03 31500E-02 31500E-03 3											2 35745E-0
144											2 25312E-0
14.4											2 14074E-0
14.6 -6.08649E-07 2.10278E-01 -2.61228E-07 193807E-01 16162E-01 -4.9157E-02 2.14775E-01 -1.9107E-01 2.17578E-01 14.7 -1.91078E-02 2.1075E-01 -2.1757E-01 -1.91078E-02 -1.71887E-01 18.001E-01 -2.9174E-02 2.0653E-01 -2.9115E-01 3.97408E-02 1.77078E-01 -1.91078E-01 -1.9078E-01											2 02062E-0
14.6 4.04978E-02 21094E-01 4.5027E-02 18502E-01 13734E-01 23017E-02 24187E-01 22187E-02 21187E-01 14187E-02 20453E-01 22187E-02 21187E-01 24187E-02 24187E											1 89313E-0
1477 19826E-02 2.0965E-01 6.5720E-02 17387E-01 18001E-01 2.2673E-02 2.0685E-01 2.0115E-01 1.97970E-02 14770E-02 14900E-02 2.0115E-01 1.97970E-02 14770E-02 14900E-02 2.0115T-01 1.02172E-01 14677E-02 2.0015E-01 2.0207E-03 2.0015E-01 2.0015E-01 2.0015E-01 2.0015E-01 2.0015E-01 2.0015E-01 2.0015E-01 2.000E-02 2.000E-01 2.0015E-02 2.000E-02											1 75866E-0
14.9 21771EQ 2.0817EQ 3.4999EQ 1.6069EQ 1.7907EQ 1.4070EQ 1.5071EQ 2.0817EQ 1.5077EQ 1.4070EQ 1.5077EQ 1.4070EQ 1.5077EQ 1.4070EQ 1.5077EQ 1.4070EQ 1.5077EQ 1.4070EQ 1.5077EQ 1.5											1 61768E-01
14.9 213771E-02 -20137E-01 -10237ZE-01 -14617E-01 -20474E-01 -12833E-02 -17894E-01 -21531E-01 -73783E-02 -116999 15.0 41577E-02 -14001E-01 -11797E-01 -11689E-01 -21005E-01 -14637E-02 -17894E-01 -12764E-01 -1276											1 47070E-01
1.51 61255-62 1.59052-60 1.59052-60 1.79052-60 1.90052-60 2.00052-60 3.29052-60											
15.2 6.12255E02 1.8507E02 1.8507E03 1.9477E03 1.9409E03 2.1005E03 2.1255E03 1.0505E02 1.7455E03 1.0505E02 1.0745E03 1.0505E03 1.0745E03 1.0745E0											
15.2 801505E02 -17455E01 -14901E01 96250E02 21218E01 71491E02 -145160E01 -12551E01 80150E01 -14850E01 -12905E01 -15905E01											
1.53.4 1.155(2.0) -1.62715(2.0) -1.61781(E-0) -7.62775(2.0) 2.12515(E-0) 1.9045(E-0) -1.3105(E-0) -1.3045(E-0) -1.3045(E-											
15.56 13600FE01 -13450FE01 -12450FE01 -12450FE0											
15.5. 130807E.01 -131437E.01 -182467E.01 392806.02 207899E.01 1216045.03 -97972E.02 22738E.01 1.50908E.01 153924 15.6. 145126.01 -17128E.01 -17092E.01 341458E.03 19610E.01 149899E.01 4.9895E.01 2.98867E.01 127375E.01 1.71092E.01 159715E.01 1737315E.01 15.9915E.01 -17092E.01 341458E.03 19610E.01 149899E.01 4.9895E.02 2.9805E.01 19142E.01 1.17473 15.9. 16109E.01 -8. 18788E.02 2.0003E.01 -19489E.02 18787E.01 1.71092E.01 1.710											
1.55. 1.651265.01 -1.172385.01 -1.072185.01											1 53954E-02
15.9, 16.000.00.00.00.00.00.00.00.00.00.00.00.0											
15.8											-1 87473E-02
15.9											-3.55562E-02
16.0											-5 20763E-02
16.1 191965E-01 -2.4286E-02 -2.01016E-01 -7.55975E-02 1.4015E-01 1.9475E-02 -1.78971E-01 -4.7346E-01 -2.17672E-01 -9.99321E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-02 -4.0158E-01 -9.9732E-01 -4.0158E-01 -9.9732E-01 -4.0158E-01 -9.9732E-01 -4.0158E-01 -9.9732E-01 -1.0158E-01 -1.01											-6 82222E-02
16.2 195813E-01 -4 61251E-03 -1 97522E-01 -9 29291E-02 1 40158E-01 2 94672E-02 -1 67246E-01 -2 1870E-01 -9 9052E-01 -1 9717E-01 1 49482E-02 -2 1840E-04 -1 15370E-01 -1 15370E-01 -1 15370E-01 -1 15370E-01 -3 14071E-02 -1 15470E-01 -1 15370E-01 -1 153											-8 39087E-02
1.5 1.9771/E-0 1.49845E-02 -1.9220/E-01 -1.09316E-01 -1.9316E-01 -2.1936E-01 -2.193											-9 90522E-02
16.4 1976696-01 3.431736-02 -1.851146-01 -1.246178-01 -1.91286-01 2.247876-01 6.541678-02 -1.46468-01 -2.197846-01 -1.27385 -1.65978-01 -1.763168-01 -1.763168-01 -1.763168-01 -1.763168-01 -1.763168-01 -1.65978-01 -1.540858-01 -1.65978-01 -1											-1 13570E-01
16.6 19766E-01 7.1466E-02 -1.15436E-01 -1.15446E-01 7.17466E-02 -1.15471E-02 -1.15466E-02 -1.15471E-02 -1.1546E-02 -1.15471E-02 -1.1546E-02 -1.15471E-02 -1.1546E-02 -1.15471E-03 -1.15481E-01 -1.154									-1 40646E-01		-1 27383E-01
16.7						9 22761E-02				-2 19754E-01	-1 40414E-01
16.8											-1 52588E-01
16.92 16.9227E-01 1.20803E-01 -1.26339E-01 -1.80608E-01 1.94639E-02 1.94433E-01 1.41599E-01 -6.03748E-02 -2.95904E-01 -1.93258 -1.91748E-01 -1.9335E-02 -1.91748E-01 -2.51318E-02 -1.91058E-01 -1.9335E-02 -1.91748E-01 -1.9335E-02 -1.94661E-01 -3.63205E-02 -1.9321E-01 -7.4140E-01 -7.3347E-03 -1.81812E-01 -2.04078 -1.9335E-02 -1.93790E-01 -3.63205E-02 -1.9321E-01 -7.4140E-01 -7.3347E-03 -1.81812E-01 -2.04078 -1.9335E-02 -1.93790E-01 -3.63205E-02 -1.9321E-01 -7.4140E-01 -7.3347E-03 -1.81812E-01 -2.04078 -1.9335E-02 -1.93790E-01 -3.63205E-02 -1.9321E-01 -7.4140E-01 -7.3347E-03 -7.9347E-03 -7.934	16.7	1 86031E-01	8 89206E-02	-1 54083E-01	-1 62733E-01	5 66383E-02	2 03431E-01	1 13903E-01	-9 43027E-02	-2 15546E-01	-1 63837E-01
17.0	16.8	1 78483E-01	1 05419E-01	-1 40833E-01	-1 72483E-01	3 81651E-02	1 99743E-01	1 28288E-01	-7 75646E-02	-2 11393E-01	-1 74093E-0
17.1	16.9	1 69227E-01	1 20803E-01	-1 26339E-01	-1 80608E-01	1 94698E-02	1 94433E-01	1 41599E-01	-6 03748E-02	-2 05904E-01	-1 83298E-01
17.2		1 58364E-01	1 34931E-01	-1.10741E-01	-1 87044E-01	7 15333E-04	1 87549E-01	1 53737E-01	-4 28556E-02		-1 91395E-01
17.53			1 47673E-01								-1 98336E-01
17.4											-2 04078E-01
17.5											-2 08585E-01
17.6 6.67890E-02 18712ZE-01 2.99736E-03 -1.88484E-01 -1.04096E-01 1.17510E-01 1.97570E-01 6.20991E-02 -1.34059E-01 -2.14439 1.77 4.85872E-02 1.89690E-01 7.5744E-02 -1.82587E-01 -1.18871E-01 1.01977E-01 1.99546E-01 7.8384ZE-02 -1.19834E-01 -2.13789 1.78 3.00101E-02 1.90407E-01 3.41721E-02 -1.75049E-01 1.32514E-01 8.57136E-02 1.99929E-01 9.39983E-02 -1.04875E-01 -2.1835121-03 1.86321E-01 5.22032E-02 -1.65946E-01 -1.44911E-01 6.87997E-02 1.98720E-01 1.98828E-01 -8.822849E-02 -2.08587 1.80 -7.53251E-03 1.86321E-01 6.56395E-02 -1.55370E-01 -1.55956E-01 5.87956E-01 5.79351E-01 1.22764E-01 -7.31697E-02 -2.046351 -2.046351 -2.046351-02 -1.18370E-01 -1.02370E-01 -1.02370											-2 11827E-01
17.7 4.8587E-02 189690E-01 157144E-02 -1.82587E-01 -1.18871E-01 101997E-01 1.99546E-01 7.8384E-02 -1.19834E-01 -2.13789 17.84 3.00101E-02 1.0007E-01 3.41721E-02 -1.75049E-01 -1.32514E-01 8.57136E-02 1.9929E-01 9.3998E-02 -1.04875E-01 -2.11835 17.94 1.12418E-02 8.8278E-01 5.2032E-02 -1.65946E-01 -1.4491E-01 6.87997E-02 1.98720E-01 1.08828E-01 -8.2849E-02 -2.08587 18.0 -7.53251E-03 1.86321E-01 6.06399E-02 -1.53570E-01 -1.53956E-01 -1.											-2 13783E-01
17.8 3 00101E-02 199407E-01 3 41721E-02 -1.75049E-01 -1.32514E-01 8 57136E-02 19972E-01 9 3998E-02 -1.04873E-01 2 21835 17.9 112418E-02 189278E-01 5 22032E-02 -1.65946E-01 -1.44911E-01 6 8797FE-02 198720E-01 108828E-01 -8 92849E-02 -2.08587 18.0 -7.53251E-03 1.86321E-01 6.6959SE-02 -1.5370E-01 -1.59596E-01 51399SE-02 199933E-01 122764E-01 -7.31697E-02 -2.04053 18.1 -2.61287E-02 1.18176E-01 8 63196E-02 -1.43424E-01 -1.65599E-01 3 36606E-02 191595E-01 13570SE-01 -5.6596E-02 -1.98290 -1.00000E-01 -1.0000E-01											-2 14439E-0
17.9											-2 13789E-0
18.0 -7.53251E-03 1.86321E-01 6.96395E-02 -1.53370E-01 -1.55956E-01 5.13993E-02 1.95933E-01 1.22764E-01 -7.31697E-02 -2.04063 18.1 -2.61287E-02 1.81576E-01 1.6376E-02 -1.43424E-01 -1.65559E-01 3.36606E-02 1.91593E-01 1.35705E-01 -3.66396E-02 -1.91230 18.3 -4.26351E-02 1.7597E-01 1.6605E-02 -1.43424E-01 -1.7541E-01 1.7541E-01 1.8754E-01 1.37575E-01 -3.9805E-02 -1.91303 18.3 -4.20651E-02 1.66957E-01 1.6805E-01 -1.15895E-01 -1.84935E-01 -2.22705E-03 1.78432E-01 1.58333E-01 -2.2723E-02 -1.8143184 -7.90575E-02 1.57242E-01 1.30332E-01 -1.00576E-01 -1.84935E-01 -2.22705E-03 1.78432E-01 1.58333E-01 -2.2723E-02 -1.8143184 -7.90575E-02 1.4544E-01 8.44119E-02 -1.88176E-01 -3.76484E-02 1.9965E-01 1.7755E-01 1.3191E-02 -1.65518 18.6 -1.10277E-01 1.35334E-01 -6.75553E-02 -1.88176E-01 -3.76484E-02 1.9965E-01 1.87764E-01 1.97756-01 1											-2 11835E-0
18.1 -2.6128TE-02 1.81376E-01 8.6196E-02 -1.43424E-01 -1.65559E-01 3.36606E-02 1.91595E-01 -3.6396E-02 -1.98290 1.82.											
18.2											
18.3 -6 20651E-02 16695TE-01 116805E-01 -1 15895E-01 -1 80135E-01 -2 22705E-03 17843E-01 1.58233E-01 -2 27928E-02 -1 83143 18.4 -7 90575E-02 17424E-01 130332E-01 -1 00576E-01 1.84993E-01 2.00717E-02 169721E-01 167655E-01 -5 71052E-03 173862 18.5 -9 91793E-02 146054E-01 14254E-01 8.44119E-02 188176E-01 3.9968E-01 175755E-01 175755E-01 13192E-02 1.63518 18.6 -1 10277E-01 13310E-01 13334E-01 -6 75553E-02 1.8965E-01 5.48089E-02 148411E-01 182474E-01 2.81771E-02 1.52176 18.7 -1 24207E-01 17375E-01 162625E-01 5.91646E-02 1.89451E-01 7.714085E-02 1.3990E-01 187764E-01 4.47449E-02 1.39908 18.8 -1 36840E-01 04875E-01 170310E-01 32403E-02 1.87546E-01 7.714085E-02 1.3990E-01 1.91588E-01 6.90588E-02 -1.26794 18.9 -1 48057E-01 8.90732E-02 176334E-01 -144345E-02 1.83971E-01 -1.02373E-01 1.08140E-01 1.91920E-01 7.54556E-02 1.71916 19.0 -1 57756E-01 7.24897E-02 1.8046E-01 3.57239E-03 -1.78767E-01 -1.02373E-01 1.08140E-01 1.91920E-01 7.54556E-02 -1.26794 19.1 -1 65849E-01 5.5287E-02 1.83218E-01 2.4166E-02 -1.71986E-01 -1.29506E-01 7.70606E-02 1.94744E-01 9.15533E-02 9.8744 19.2 -1 72266E-01 3.76403E-02 1.83218E-01 2.4166E-02 -1.71986E-01 -1.29506E-01 7.70606E-02 1.94744E-01 9.15533E-01 9.1533E-01 -67528 19.3 -1.76951E-01 1.97175E-02 1.80405E-01 3.90383E-02 -1.6396E-01 -1.41348E-01 6.06296E-02 1.91878E-01 1.9151E-01 -5.76528 19.4 -1.79867E-01 1.69560E-03 1.80392E-01 7.26927E-02 -1.42921E-01 -1.6884E-01 9.4135E-01 1.3750E-01 1.3750E-01 1.3791E-01 -1.9377E-01 -1.02838E-01 -1.6884E-01 9.4746E-01 1.3750E-01 1.3750E-01 1.3750E-01 1.9957E-01 -1.02838E-01 -1.6884E-01 9.4746E-02 1.3750E-01 1.3750E-01 1.3750E-01 1.37495E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-02 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-01 -1.2770E-											-1 98290E-01
18.4 -7-90575E-02 157242E-01 130332E-01 -1-00576E-01 -1-84993E-01 -2-00717E-02 1-67551E-01 -1-67555E-01 -5-71052E-03 -7-73662 -1-67555E-01 -1-1052E-03 -7-73662 -1-67555E-01 -7-73662 -1-67555E-01 -7-73662 -1-67555E-01 -7-73662 -1-6755E-01 -7-73662 -1-6765E-01 -7-73662 -1-6755E-01 -7-7362 -1-6755E-01 -7-736											-1 91303E-0
18.5 -9 51793E-02 1 46054E-01 1 42548E-01 -8 44119E-02 -1 88176E-01 -3 76484E-02 1 59686E-01 1 75755E-01 1 13192E-02 -1 63518 18.6 -1 10277E-01 1 3310E-01 1 53344E-01 -6 75553E-02 -1 89665E-01 -5 48089E-02 1 48411E-01 1 82744E-01 2 81771E-02 -1 52176 18.7 -1 24207E-01 1 19737E-01 1 62625E-01 -5 01646E-02 -1 89451E-01 -7 1085E-02 1 35990E-01 1 87764E-01 4 47449E-02 -1 3990E-01 1 87764E-01 4 77449E-02 -1 3990E-01 1 87764E-01 1 70310E-01 -3 24025E-02 -1 87546E-01 -8 73075E-02 1 22529E-01 1 51538E-01 6 09058E-02 -1 26794 18.9 -1 48057E-01 8 8 9732E-02 1 8047E-01 3 57299E-03 -1 78767E-01 -1 16478E-01 9 29413E-02 1 94744E-01 9 15533E-02 -9 83724 19.1 -1 65849E-01 5 52887E-02 1 83218E-01 2 14516E-02 -1 78767E-01 -1 16478E-01 9 29413E-02 1 94744E-01 9 15533E-02 -9 83724 19.1 -1 65849E-01 5 52887E-02 1 83218E-01 2 14516E-02 -1 717986E-01 -1 770606E-02 1 94059E-01 1 1921E-01 -6 76528 19.3 -1 76951E-01 1 97175E-02 1 83081E-01 5 61709E-02 -1 63969E-01 -1 41348E-01 6 06296E-02 1 91870E-01 1 1921E-01 -6 76528 19.3 -1 79867E-01 1 69560E-03 1 80392E-01 7 26927E-02 -1 42921E-01 -1 6198E-01 2 66652E-02 1 83090E-01 1 53572E-01 -5 94856E-02 1 177896E-01 -1 62501E-02 -1 75995E-01 8 84532E-02 -1 30390E-01 -1 67508E-01 -1 68844E-01 9 41335E-03 1 68694E-01 1 53572E-01 -9 05771 19.6 -1 80332E-01 -3 39459E-02 1 65991E-01 1 17172E-01 -1 177896E-01 -1 67506E-01 -1 77896E-01 -1 67506E-01 -1 153572E-01 -1 905771 19.6 -1 80332E-01 -3 39459E-02 1 65991E-01 1 17172E-01 -1 177896E-01 -1 67916E-01 -1 67916E-01 -1 67516E-01 -1 67916E-01											-1 73862E-0
18.6 -1 10277E-01 133510E-01 1.53344E-01 -6.75553E-02 -1 89665E-01 -5 48089E-02 14841E-01 182474E-01 2 81771E-02 -1 52176 18.7 -1 24207E-01 17973F-01 162625E-01 -5 01646E-02 -1 89451E-01 -7 14085E-02 13590E-01 187764E-01 4 47449E-02 -1 39908 18.8 -1 36640E-01 104875E-01 170310E-01 -3 24025E-02 -1 87546E-01 -8 73075E-02 122329E-01 1.91588E-01 6 09058E-02 -1 26794 18.9 -1 48057E-01 8 80732E-02 176334E-01 -1 44345E-02 -1 83971E-01 -1 02373E-01 108140E-01 19920E-01 7 65456E-02 -1 12919 -1 67756E-01 7 24897E-02 18024E-01 3 57239E-03 -1 78767E-01 -1 16478E-01 9 29415E-02 194744E-01 9 15533E-02 -9 83724 19.1 -1 65849E-01 5 52887E-02 183218E-01 2 14516E-02 -1 71986E-01 -1 29506E-01 7 70006E-02 194059E-01 10582E-01 -8 32594 19.2 -1 72266E-01 3 76405E-02 1 83218E-01 3 90333E-02 -1 63696E-01 -1 41348E-01 6.06296E-02 191873E-01 19251E-01 6.76528 19.3 -1.7986TE-01 1 69560E-03 1 80392E-01 7 26927E-02 -1 42921E-01 -1 61098E-01 2 66652E-02 1 83090E-01 1 31744E-01 -5 1683311 -1 68332E-01 -1 68332E-01 -1 6894E-01 -1 63332E-01 -1 6350E-01 -1 635											-1 63518E-0
18.7 -1.24207E-01 1.19737E-01 1.26225E-01 -5.01646E-02 -1.89451E-01 -7.14085E-02 1.35990E-01 1.8776E-01 4.4749F-02 -1.39908 18.8 -1.36840E-01 0.4875E-01 1.70310E-01 -3.24025E-02 -1.8776E-01 -8.73075E-02 1.2225E-01 1.9158E-01 6.09058E-02 -1.26794 18.9 -1.48057E-01 8.9073E-02 1.76334E-01 -1.44345E-02 -1.83971E-01 -1.02373E-01 1.08140E-01 1.93920E-01 7.5456E-02 -1.2919 19.0 -1.57756E-01 7.24897E-02 1.80647E-01 3.57239E-03 -1.78767E-01 -1.16478E-01 9.29413E-02 1.9474E-01 9.1533E-02 -9.83724 19.1 -1.65840E-01 5.52887E-02 1.824029E-01 3.90383E-02 -1.8997E-01 -1.16478E-01 9.29413E-02 1.94059E-01 0.9532E-01 -8.33294 19.2 -1.72266E-01 3.76405E-02 1.84029E-01 3.90383E-02 -1.6390E-01 -1.4134E-01 6.06296E-02 1.91873E-01 1.9231E-01 -5.7653E 19.3 -1.76951E-01 1.779867E-01 1.8908E-01 -1.23977E-01 -1.51908E-01 4.7846E-02 1.88206E-01 1.3174E-01 -5.16833 19.4 -1.79867E-01 6.9560E-03 1.8092E-01 7.2627E-02 -1.2921E-01 -1.6198E-01 2.66652E-02 1.8390E-01 1.4321E-01 -3.54486 19.5 -1.6231E-02 1.5391E-01 0.9572E-01 -1.2321E-01 -1.6884E-01 9.4333E-03 1.76597E-01 1.33945E-01 -1.9332E-01 -3.9445E-01 -3.											-1 52176E-0
18.8 -1.36840E-01 1.04875E-01 1.70310E-01 -3.24025E-02 -1.87546E-01 -8.73075E-02 1.22529E-01 1.9153E-01 6.09058E-02 -1.26794 18.9 -1.48037E-01 8.7973E-02 1.70334E-01 -1.44345E-02 -1.83971E-01 -1.02373E-01 1.08140E-01 1.93920E-01 7.65456E-02 -1.2919 19.0 -1.57756E-01 7.24897E-02 1.8047E-01 3.7239E-03 -7.8767E-01 -1.16478E-01 9.29413E-02 1.94744E-01 9.1533E-02 -9.83724 19.1 -1.65840E-01 5.52887E-02 1.83218E-01 2.14516E-02 -1.7986E-01 -7.70606E-02 1.94059E-01 1.9822E-01 8.32504 19.2 -1.72660E-01 3.76403E-02 1.84029E-01 3.90383E-02 -1.63696E-01 -1.41348E-01 6.06296E-02 1.94059E-01 1.9822E-01 8.32504 19.3 -1.76951E-01 1.97175E-02 1.83081E-01 5.61709E-02 -1.53977E-01 -1.51908E-01 4.77846E-02 1.88206E-01 1.31744E-01 5.16833 19.4 -1.79867E-01 1.69560E-03 1.80392E-01 7.26927E-02 -1.42921E-01 -1.6198E-01 2.6652E-02 1.83090E-01 1.31212E-01 -3.4486 19.4 -1.79867E-01 1.69560E-03 1.80392E-01 8.84532E-02 -1.3034E-01 -1.68844E-01 9.41335E-03 1.66694E-01 1.53572E-01 -9.0577 19.5 -1.80932E-01 -3.39459E-02 1.69941E-01 1.03309E-01 -1.1723E-01 -1.75084E-01 -7.7684E-01 -3.9135E-03 1.66694E-01 1.62751E-01 -2.62120 19.7 -1.77894E-01 -3.1231E-02 1.53135E-01 1.29783E-01 -1.02838E-01 -1.7970E-01 -2.49170E-02 1.9533E-01 1.77312E-01 1.77312E-01 -1.77314E-01 -3.7741E-01 -3.7741E-											-1 39908E-0
18.9 -148057E-01 8 90732E-02 1 76334E-01 -144345E-02 -1.83971E-01 -1.02373E-01 1 08140E-01 1 93920E-01 7 545456E-02 -112919 19.0 -1 57756E-01 7 24897E-02 1 83218E-01 3 57239E-03 -1 78767E-01 -1 16478E-01 9 29413E-02 1 94744E-01 9 15533E-02 9 83724 19.1 -1 65849E-01 5 52287E-02 1 83218E-01 2 14516E-02 -1 71986E-01 -1 29506E-01 7 70600E-02 1 940459E-01 1 05822E-01 8 32840 19.2 -1 72266E-01 3 76403E-02 1 83081E-01 3 90383E-02 -1 63690E-01 -1 41348E-01 6.06296E-02 1 91873E-01 1 19231E-01 -67528 19.3 -1.76951E-01 1 97175E-02 1 83081E-01 5.617690E-02 -1.53977E-01 -1 19109E-01 1 191745E-01 -1 19231E-01 -5 168331 19.4 -1.79867E-01 1 69560E-03 1 80392E-01 7 26927E-02 -1 42921E-01 -1 61098E-01 2 66652E-02 1 83090E-01 1.3124E-01 -5 168331 19.5 -1 80995E-01 -1 62501E-02 1 75995E-01 8 84532E-02 -1 30634E-01 -1 61098E-01 2 66652E-02 1 83090E-01 1.332450-1 -1 0590E-01 1.0 191745E-01 -1 0590E-01 1 17145E-01 -1 0590E-01 1.0 191745E-01 1.0 191745E-01 -1 0583E-01 1.0 191745E-01 1.0 191											-1 26794E-0
19.0 -1.57756E-01 7.24897E-02 1.80647E-01 3.57239E-03 -1.78767E-01 -1.16478E-01 9.29413E-02 1.94744E-01 9.15533E-02 -9.83724		1 300 401 01	1 4 10 7 5 5 4 1								-1 12919E-0
19.1 -165849E-01 5 52887E-02 1 83218E-01 2 14516E-02 -171986E-01 770606E-02 194059E-01 105822E-01 8-32504 19.2 -172266E-01 376403E-02 183081E-02 1-63696E-01 -1.41348E-01 6.06296E-02 191873E-01 11923E-01 -675228 19.3 -1.76951E-01 1 97175E-02 183081E-01 5.61709E-02 1.53977E-01 1-19180E-01 37746E-02 183081E-01 31744E-01 5-16833 19.4 -1.79867E-01 1 69560E-03 180392E-01 7 26927E-02 -1.42921E-01 -1.61098E-01 2.66522E-02 183090E-01 1.31212E-01 -3.4486 19.5 -1.8095E-01 1 69560E-03 180392E-01 7 26927E-02 -1.42921E-01 -1.61098E-01 2.6652E-02 183090E-01 1.3212E-01 -3.4486 19.5 -1.8093E-01 -3.39459E-02 169941E-01 103309E-01 -1.1723E-01 -1.75084E-01 -7.7694E-01 -7.7694E-01 1.53572E-01 -7.95577 19.6 -1.80332E-01 -3.39459E-02 169941E-01 103309E-01 -1.1723E-01 -1.75084E-01 -7.7694E-01 -7.78282E-03 1.66694E-01 1.62751E-01 -2.62120 19.7 -1.77894E-01 -5.12213E-02 162294E-01 171727E-01 -1.02838E-01 -7.7970E-01 2.49170E-02 159533E-01 17063E-01 17312E-01 1.37495 19.8 -1.73714E-01 -6.79105E-02 153135E-01 129783E-01 8.7578E-02 -1.82867E-01 -4.17118E-02 149160E-01 17312E-01 1.7312E-01 1.7912E-01 -1.78291E-01 1.78312E-01 1.77312E-01 1.77312E-01 1.78312E-01 1.78312E-01 1.78312E-01 1.7841E-01 -7.78291E-01 1.77312E-01 1.77312E-01 1.78312E-01 1.78312E-											-9 83724E-02
19.2 -1.72266E-01 3.76403E-02 1.84029E-01 3.90383E-02 -1.63696E-01 -1.41348E-01 6.06296E-02 1.91873E-01 1.9251E-01 6.76528 19.3 -1.76951E-01 1.97175E-02 1.83081E-01 5.61709E-02 -1.53977E-01 -1.51908E-01 4.37846E-02 1.83090E-01 1.31744E-01 -5.16833 19.4 -1.79867E-01 6.9560E-03 1.80192E-01 7.2627E-02 -1.42921E-01 -1.61098E-01 2.6652E-02 1.83090E-01 1.43212E-01 -3.54486 19.5 -1.80995E-01 -1.62501E-02 1.75995E-01 8.84532E-02 -1.30534E-01 -1.68844E-01 9.41335E-03 176567E-01 1.5372E-01 -1.90577 19.6 -1.80132E-01 -3.39459E-02 1.69941E-01 0.3030E-01 -1.17232E-01 -1.7898E-01 8.6894E-01 6.8694E-01 1.62731E-01 -2.62120 19.7 -1.77894E-01 -5.12213E-02 1.62294E-01 1.17127E-01 -1.02838E-01 -7.7970E-01 -2.40170E-02 1.59533E-01 1.76383E-01 1.74951 19.8 -1.73714E-01 -6.79105E-02 1.3135E-01 1.29783E-01 8.75878E-02 -1.82867E-01 -4.17118E-02 4.9160E-01 1.7312E-01 1.7312E-01 2.99428 19.9 -1.67841E-01 -8.38543E-02 1.42558E-01 1.41164E-01 -7.16214E-02 -1.84353E-01 -5.80741E-02 1.37660E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 1.84551E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 -4.17118E-02 1.37660E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 -4.5848E-01 1.37660E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 -4.5848E-01 1.37660E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 4.5848E-01 1.37660E-01 1.82591E-01 4.5848E-01 4.5											-8 32504E-02
19.3 -1.76951E-01 197175E-02 183081E-01 5.61709E-02 -1.53977E-01 -1.51908E-01 437846E-02 188206E-01 13174E-01 -5.16833 19.4 -1.79867E-01 169560E-03 180392E-01 726927E-02 -1.42921E-01 -1.61098E-01 2.6652E-02 183090E-01 1.43212E-01 -3.54486 19.5 -1.80958E-01 -1.62501E-02 175995E-01 8.84532E-02 -1.30634E-01 -1.61098E-01 2.6652E-02 183090E-01 1.53572E-01 -1.905771 19.6 -1.80332E-01 -3.39459E-02 169941E-01 103309E-01 -1.1723E-01 -1.75084E-01 -7.82825E-03 168694E-01 162751E-01 -2.62120 19.7 -1.77894E-01 -5.12213E-02 162994E-01 171727E-01 -1.02838E-01 -1.79770E-01 -2.49170E-02 159533E-01 17063E-01 170312E-01 1.791714E-01 -7.679165E-02 153135E-01 1.79053E-01 1.791714E-01 -7.679165E-01 1.791714E-01 -7.679165E-01 1.791716E-01 1.79176E-01 1.79176E-											-6.76528E-02
19.4 -1.79867E-01 1-69560E-03 1-80392E-01 7-26927E-02 -1-42921E-01 -1-61098E-01 2-6652E-02 1-83090E-01 1-3212E-01 3-54486											-5 16833E-02
19.5 -180995E-01 -162501E-02 175995E-01 8 84532E-02 -130634E-01 -168844E-01 9 41335E-03 176567E-01 153572E-01 -1905777 19.6 -180332E-01 -3 39495E-02 169941E-01 103309E-01 -117232E-01 -175084E-01 -7 82825E-03 168694E-01 162751E-01 -2 62120 19.7 -177894E-01 -5 12213E-02 162294E-01 17172E-01 -10283E-01 -179770E-01 -2 49170E-02 159533E-01 17683E-01 177312E-01 19.8 -173714E-01 -6 79105E-02 153135E-01 12783E-01 -8 75878E-02 -182867E-01 -417118E-02 149160E-01 177312E-01 299428 19.9 -167841E-01 -8 38543E-02 142558E-01 141164E-01 -7 16214E-02 -184353E-01 -5 80741E-02 137660E-01 182591E-01 4 58482											-3 54486E-02
19.6 -1.80332E-01 -3.39459E-02 1.69941E-01 1.03309E-01 -1.17232E-01 -7.894E-01 -7.82825E-03 1.68694E-01 1.62751E-01 -2.62120 1.977 -1.77894E-01 -5.12213E-02 6.2294E-01 1.7127E-01 -1.02838E-01 -7.78794E-01 -2.49170E-02 1.59533E-01 1.7063E-01 1.73714E-01 -3.7974E-01 -6.79105E-02 1.53135E-01 1.29783E-01 -8.7878E-02 -8.7878E-02 -1.7118E-02 1.49160E-01 1.77312E-01 2.9943E-01 -7.71214E-02 -7.7124E-01 -7.7124E-0											-1 90577E-02
19.7 -1.77894E-01 -5.12215E-02 162294E-01 1.7127E-01 -1.02838E-01 -1.79770E-01 -2.49170E-02 1.59533E-01 1.70633E-01 1.734951 -1.73714E-01 -6.79105E-02 1.59135E-01 1.29785E-01 -8.75878E-02 -1.82867E-01 -4.17118E-02 1.49160E-01 1.77312E-01 2.99428 -1.67841E-01 -8.38543E-02 1.42558E-01 1.41164E-01 -7.16214E-02 -1.84353E-01 -5.80741E-02 1.37660E-01 1.82591E-01 4.584821 -1.7860E-01 -1.7860E-01 1.82591E-01 -1.7860E-01 -1.7											-2 62120E-03
19.8 -1.73714E-01 -6.79105E-02 1.53135E-01 1.29783E-01 -8.75878E-02 -1.82867E-01 -4.17118E-02 1.49160E-01 1.77312E-01 2.994281 19.9 -1.67841E-01 -8.38543E-02 1.42558E-01 1.41164E-01 -7.16214E-02 -1.84353E-01 -5.80741E-02 1.37660E-01 1.82591E-01 4.58482											1 37495E-02
19.9 -1 67841E-01 -8 38543E-02 1 42558E-01 1 41164E-01 -7 16214E-02 -1 84353E-01 -5 80741E-02 1.37660E-01 1 82591E-01 4 58482											2 99428E-02
										1 82591E-01	4 58482E-02
											6.13563E-02
	(

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

Литература: Справочник..., 1979.

Модифицированная функция Бесселя 2-го рода $K_m(u)$ порядков 2÷11

Функция:
$$K_m(u) = \sec\left(\frac{1}{2}m\pi\right) \int_0^\infty \cos(u \sinh \tau) \cosh(m\tau) d\tau$$
.

Разложение в ряд:

$$K_{m}(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{u}{2}\right)^{-m} \sum_{n=0}^{m-1} \left[\frac{(m-n-1)!}{n!} \left(-\frac{u^{2}}{4}\right)^{n}\right] + (-1)^{m+1} \ln\left(\frac{u}{2}\right) I_{m}(u) + \\ + \frac{(-1)^{m}}{2} \left(\frac{u}{2}\right)^{m} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left[\psi(n+1) + \psi(m+n+1)\right] \frac{\left(u^{2}/4\right)^{n}}{n!(m+n)!}\right] \end{cases}.$$

Условные обозначения:

$$\psi(1) = -\gamma$$
; $\psi(i) = -\gamma + \sum_{i=1}^{i-1} j^{-1}$ – пси-функция;

 $\gamma = 0.5772156649 -$ постоянная Эйлера;

 $I_m(u)$ – функция Бесселя (Приложение 19).

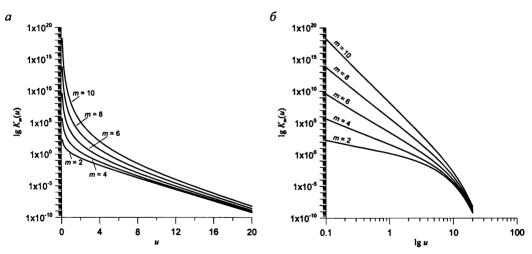


Рис. П22. Зависимость логарифма функции от аргумента (а) и от логарифма аргумента (б) для различных порядков функции.

Значения $K_m(u)$ для аргумента $u = 0 \div 20.0$ и для порядка $m = 2 \div 11$

	m														
_	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
0.0	8	80	8	8	00	00	oo	00	80	00					
0.1	1.99504E+02	7.99001E+03	4.79600E+05	3.83760E+07	3.83808E+09	4.60608E+11	6.44890E+13	1.03187E+16	1.85743E+18	3.71496E+20					
0.2	4.95124E+01	9.95025E+02	2.99002E+04	1.19700E+06	5.98801E+07	3.59401E+09	2.51640E+11	2.01348E+13	1.81239E+15	1.81259E+17					
0.3	2.17457E+01	2.92999E+02	5.88173E+03	1.57139E+05	5.24385E+06	2.09911E+08	9.80110E+09	5.22935E+11	3.13859E+13	2.09292E+15					
0.4	1.20363E+01	1.22547E+02	1.85025E+03	3.71275E+04	9.30037E+05	2.79382E+07	9.78769E+08	3.91787E+10	1.76402E+12	8.82402E+13					
	1.20363E+01	1.2234/E+02	1.85025E+03	3./12/3E+04	9.30037E+05	2.79382E+07	9.78769E+08	3.91787E+10	1./6402E+12	8.824021					

u	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.5	7.55018E+00						1.63684E+08	5.24372E+09	1.88938E+11	7.56275E+12
0.6	5.12031E+00		3.59502E+02	4.82880E+03			3.79186E+07	1.01279E+09		1.01506E+12
0.7	3.66133E+00	2.19722E+01	1.91994E+02	2.21619E+03		5 48248E+05	1.09968E+07	2.51904E+08		1.85639E+11
0.8	2.71980E+00		1.11176E+02			2.13960E+05		7.53836E+07	1 69989E+09	
0.9	2.07903E+00			6.18461E+02		9.31550E+04		2.59779E+07	5.21015E+08	
1.0	1.62484E+00 1.29244E+00			3.60961E+02 2.21268E+02	3.65384E+03 2.04124E+03	4.42070E+04 2 24893E+04	6.22552E+05 2.88269E+05	1.00050E+07 4 21549E+06	1 80713E+08 6 92691E+07	3.62427E+09 1.26365E+09
1.2	1.04283E+00		2.05963E+01	1.41219E+02		1.21154E+04		1.91271E+06		4 82465E+08
1.3	8.51398E-01			9.32181E+01		6.84759E+03	7.44750E+04	9.23463E+05	1 28609E+07	1.98783E+08
1.4	7.01992E-01	2.32653E+00				4.03117E+03	4.07746E+04	4.70027E+05		8.73839E+07
1.5	5.83656E-01	1.83380E+00				2.45770E+03		2.50354E+05		
1.6	4.88747E-01		5.97313E+00			1.54463E+03	1.37173E+04	1.38718E+05		
1.7	4.11805E-01 3.48846E-01	1.17832E+00 9.57836E-01	4.57057E+00 3.54163E+00			9.96965E+02 6.58770E+02	8.34832E+03 5 22008E+03	4.70594E+04	8 50848E+05 4.75814E+05	
1.9	2.96909E-01	7.84732E-01		1.24690E+01		4.44477E+02	3.34350E+03			2 91590E+06
2.0	2.53760E-01	6.47385E-01	2.19592E+00			3.05538E+02	2 18812E+03	1.78105E+04		1.64263E+06
2.1	2.17685E-01	5.37385E-01	1.75307E+00	7.21575E+00		2.13580E+02	1 45998E+03	1.13372E+04	9.86364E+04	9.50731E+05
2.2	1.87357E-01	4.48546E-01	1.41066E+00			1.51576E+02	9 91341E+02	7.36133E+03	6.12204E+04	
2.3	1.61733E-01	3 76258E-01	1 14328E+00			1 09060E+02	6.83910E+02	4 86669E+03		
2.4	1.39988E-01 1.21460E-01	3.17038E-01 2.68227E-01	9.32584E-01 7.65205E-01	3.42565E+00 2.71688E+00	1.52061E+01 1.16327E+01	7 94563E+01 5 85540E+01	4 78701E+02 3.39535E+02	3.27080E+03 2 23158E+03		
2.6	1.05617E-01	2.27771E-01	6.31243E-01		8.97762E+00		2 43775E+02	1.54376E+03	1.09313E+04	
2.7	9.20246E-02	1.94071E-01	5.23294E-01		6.98467E+00		1 76994E+02	1 08164E+03	7 38794E+03	5 58071E+04
2.8	8 03290E-02	1.65868E-01	4.35761E-01	1.41090E+00	5.47469E+00	2.48739E+01	1 29844E+02	7 66840E+02	5.05953E+03	3 69063E+04
2.9	7.02383E-02	1 42167E-01	3.64376E-01	1.14734E+00			961715E+01	5.49628E+02	3.50765E+03	
3.0	6 15105E-02	1.22170E-01 1 05240E-01	3.05851E-01	9.37774E-01	3 43176E+00 2.74184E+00	1 46648E+01		3.97959E+02	2.45962E+03	1 67954E+04
3.1	5.39444E-02 4 73718E-02	9.08577E-02	2.57634E-01 2.17730E-01		2.74184E+00 2.20267E+00	1.13837E+01 8.89521E+00		2.90877E+02 2 14491E+02	1 74312E+03 1 24763E+03	1 15368E+04 8 01220E+03
3.3	4.16512E-02	7.86032E-02	1.84566E-01	5.26036E-01		6.99373E+00		1.59474E+02	9.01305E+02	5.62193E+03
3.4	3.66633E-02	6 81323E-02	1.56897E-01	4.37301E-01		5.53051E+00		1.19487E+02	6 56794E+02	3.98298E+03
3.5	3.23071E-02	5.91618E-02	1.33727E-01	3.64824E-01		4.39711E+00	1.87645E+01	9.01778E+01	4 82536E+02	2.84753E+03
3.6	2.84968E-02		1 14260E-01	3.05370E-01	9.62511E-01	3 51374E+00		6.85228E+01	3.57241E+02	2 05320E+03
3.7	2.51593E-02 2.22321E-02	4.48273E-02 3.91079E-02	9.78523E-02 8.39814E-02	2.56400E-01 2.15911E-01	7.90825E-01 6.52168E-01	2.82124E+00 2.27539E+00		5.24030E+01 4 03182E+01	2.66399E+02 2.00016E+02	1 49240E+03 1.09304E+03
3.9	1.96614E-02	3.41649E-02	7.22228E-02	1.82314E-01	5.39695E-01	1 84291E+00		3 11979E+01	1.51146E+02	8 06304E+02
4.0	1.74014E-02		6.22288E-02	1.54343E-01		1.49860E+00		2.42713E+01	1 14914E+02	5.98842E+02
4.1	1.54123E-02	2.61727E-02	5.37139E-02	1.30980E-01	3.73178E-01	1.22321E+00	4.54999E+00	1.89793E+01	8 78735E+01	4 47631E+02
4.2	1.36599E-02	2 29477E-02	4.64423E-02	1.11409E-01	3.11702E-01	1.00199E+00		1.49131E+01	6 75648E+01	3.36650E+02
4.3	1.21146E-02	2.01416E-02	4.02191E-02 3.48822E-02	9.49678E-02	2 61074E-01	8.23548E-01		1.17720E+01	5 22205E+01	2.54658E+02
4.4	1.07506E-02 9.54568E-03	1.76965E-02 1.55631E-02	3.48822E-02	8.11187E-02 6.94236E-02	2.19243E-01 1.84571E-01	6.79054E-01 5 61614E-01	2.37987E+00 1.93181E+00	9.33312E+00	4.05608E+01 3.16530E+01	1.93701E+02 1.48110E+02
4.6	8.48044E-03	1.36993E-02	2.63491E-02	5.95239E-02	1.55749E-01	4.65826E-01	1.57348E+00	5 93880E+00	2 48123E+01	1.13818E+02
4.7	7 53799E-03	1.20691E-02	2.29453E-02	5.11250E-02	1.31722E-01	3.87436E-01	1.28579E+00	4.76458E+00	1.95331E+01	8.78843E+01
4.8	6.70357E-03	1.06415E-02	2.00054E-02	4.39839E-02	1.11638E-01	3.23080E-01	1.05396E+00	3.83626E+00	1.54399E+01	6 81694E+01
4.9	5 96431E-03	9.38999E-03	1.74623E-02	3.78998E-02	9.48088E-02	2.70085E-01	8.66479E-01	3.09941E+00		5 31078E+01
5.0	5.30894E-03 4.72760E-03	8.29177E-03 7.32710E-03	1.52591E-02 1.33477E-02	3.27063E-02 2.82647E-02	8.06716E-02 6.87687E-02	2.26318E-01 1.90073E-01	7.14362E-01 5.90539E-01	2.51228E+00 2.04274E+00	9.75856E+00 7.80022E+00	4.15465E+01 3.26319E+01
5.2	4.21162E-03	6.47897E-03	1 16873E-02	2.44595E-02	5.87249E-02	1.59978E-01		1 66594E+00	6.25614E+00	
5.3	3.75340E-03	5.73264E-03	1.02432E-02	2.11941E-02	5 02320E-02	1.34927E-01		1 36253E+00	5.03409E+00	2.03591E+01
5.4	3.34628E-03	5.07535E-03	8.98556E-03	1.83873E-02	4.30361E-02	1 14023E-01		1.11743E+00	4 06343E+00	1 61672E+01
5.5	2 98437E-03	4.49602E-03	7.88912E-03	1.59711E-02	3.69275E-02	9 65402E-02	2.82666E-01	9.18842E-01	3.28978E+00	1 28817E+01
5.6	2 66250E-03 2.37612E-03	3 98501E-03 3.53395E-03	6 93216E-03 6.09607E-03	1.38881E-02 1.20898E-02	3.17323E-02	8.18860E-02	2.36447E-01	7.57450E-01	2 67111E+00	
5.8	2.12120E-03	3.13552E-03	5.36485E-03	1.05353E-02	2.73063E-02 2 35292E-02	6.95768E-02 5.92164E-02	1.98197E-01 1.66465E-01	6.25918E-01 5.18431E-01	2 17478E+00 1.77539E+00	
5.9	1.89420E-03	2.78336E-03	4.72473E-03	9.18978E-03	2.03006E-02	5.04792E-02	1.40082E-01	4.30362E-01	1.77339E+00	5.35596E+00
6.0	1.69197E-03	2.47190E-03	4.16387E-03	8.02372E-03	1.75367E-02	4 30972E-02	1.18097E-01	3.58022E-01		4.33190E+00
6.1	1.51175E-03		3.67200E-03			3.68489E-02		2.98458E-01		3.51299E+00
6.2		1.95220E-03								
6.4	1.20779E-03 1.07997E-03	1.73596E-03 1.54429E-03	2 86109E-03 2.52774E-03	5.36909E-03 4.70396E-03	1.13835E-02 9.87767E-03	2.70519E-02 2.32246E-02	7.14987E-02 6 06814E-02	2.08636E-01 1.74928E-01	5.52667E-01	2.32800E+00 1.90201E+00
6.5	9 65899E-04	1.37429E-03	2.23448E-03	4.12442E-03	8.57974E-03	1.99639E-02	5.15790E-02	1.46928E-01	4.58456E-01	1.55756E+00
6.6	8.64075E-04	1.22346E-03	1.97631E-03	3.61899E-03	7.45963E-03	1.71819E-02	4.39062E-02	1.23621E-01	3.81055E-01	
6.7	7.73155E-04	1.08956E-03	1.74888E-03	3 17778E-03	6.49184E-03	1.48049E-02	3.74275E-02	1.04184E-01	3.17325E-01	1 05142E+00
6.8	6.91948E-04	9 70645E-04	1.54840E-03	2.79229E-03	5.65471E-03	1.27712E-02	3 19483E-02	8.79438E-02	2.64741E-01	8.66593E-01
7.0	6.19397E-04 5.54562E-04	8.64989E-04 7.71075E-04	1.37156E-03 1.21548E-03	2.45520E-03 2.16020E-03	4.92983E-03	1.10288E-02	2.73071E-02 2.33698E-02	7 43497E-02	2.21263E-01	7.15692E-01
7.1	4.96609E-04	6.87566E-04	1.21348E-03 1 07765E-03	1.90182E-03	4 30148E-03 3.75627E-03	9.53417E-03 8.25044E-03	2.33698E-02 2.00248E-02	6.29509E-02 5.33766E-02	1.85244E-01 1.55346E-01	5.92218E-01 4.90970E-01
7.2	4.44794E-04	6.13280E-04	9.55860E-04	1.67535E-03	3.28273E-03	7.14656E-03	1.71788E-02	4.53217E-02	1.30483E-01	4.90970E-01
7.3	3.98456E-04	5.47174E-04	8.48188E-04	1.47670E-03	2.87106E-03	6.19624E-03	1.47543E-02	3.85344E-02	1.09770E-01	3.39275E-01
7.4	3.57007E-04	4 88327E-04	7.52948E-04	1.30232E-03	2.51285E-03	5.37721E-03	1.26859E-02	3.28063E-02	9.24850E-02	2.82766E-01
7.5	3.19924E-04	4.35923E-04	6.68662E-04	1.14916E-03	2.20088E-03	4.67057E-03	1.09193E-02	2.79650E-02	7.80353E-02	2.36059E-01
7.6	2.86738E-04 2.57036E-04	3.89242E-04 3 47646E-04	5.94035E-04 5.27929E-04	1.01454E-03 8.96143E-04	1 92896E-03	4.06027E-03 3.53264E-03	9.40840E-03	2.38674E-02 2.03944E-02	6.59365E-02	1.97385E-01
7.7	2.37036E-04 2.30445E-04	3.10569E-04	4 69344E-04	7.91948E-04	1.69175E-03 1.48466E-03	3.53264E-03 3 07604E-03	8.11473E-03 7 00576E-03	1.74468E-02	5 57900E-02 4.72677E-02	1.65304E-01 1.38646E-01
	2.50 , 150-04	J.10007E-04	. 0,0 176-07		1.10-100E-03	2 0 100-03	. 005/01-05	.,,	4.12011E-02	1.5007015-01

				***************************************		*				
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7.9	2.06636E-04	2.77510E-04	4.17403E-04	7.00197E-04	1.30373E-03	2.68054E-03		1.49419E-02	4.00989E-02	1.16458E-01
8.0 8.1	1.85313E-04 1.66214E-04	2.48026E-04 2.21722E-04	3.71332E-04 3.30452E-04	6.19358E-04 5.48094E-04	1.14553E-03 1.00711E-03	2.33765E-03 2.04011E-03		1.28105E-02 1.09946E-02	3.40600E-02 2.89658E-02	9.79606E-02 8.25151E-02
8.2	1.49103E-04	1.98250E-04	2.94163E-04	4.85238E-04	8.85917E-04	1.78170E-03	3.92785E-03	9.44580E-03	2.46625E-02	6.95983E-02
8.3	1.33771E-04	1.77298E-04	2.61938E-04	4.29769E-04	7.79732E-04	1.55709E-03		8.12317E-03	2.10227E-02	5.87802E-02
8.4	1.20031E-04	1.58592E-04	2.33311E-04			1.36170E-03		6.99245E-03	1.79400E-02	4.97066E-02
8.5 8.6	1.07716E-04 9.66756E-05	1.41887E-04 1.26965E-04	2.07871E-04 1.85256E-04	3.37531E-04 2.99296E-04	6.04966E-04 5.33275E-04	1.19160E-03 1.04340E-03	2.56760E-03 2.23183E-03	6.02473E-03 5.19565E-03	1.53259E-02 1.31065E-02	4.20856E-02 3.56758E-02
8.7	8.67772E-05	1.13633E-04	1.65145E-04	2.65490E-04	4.70306E-04	9.14189E-04		4.48461E-03	1.12199E-02	3.02775E-02
8.8	7.79012E-05	1.01719E-04	1.47255E-04		4.14968E-04	8.01452E-04	1.69000E-03	3.87419E-03	9.61448E-03	2.57253E-02
8.9	6.99408E-05	9.10694E-05	1.31336E-04	2.09124E-04	3.66307E-04	7.03021E-04		3.34964E-03	8.24674E-03	2.18816E-02
9.0 9.1	6.28006E-05 5.63954E-05	8.15484E-05 7.30346E-05	1.17166E-04 1.04550E-04	1.85696E-04 1.64947E-04	3.23495E-04 2.85810E-04	6.17023E-04 5.41839E-04	1.28331E-03 1.11941E-03	2.89846E-03 2.51003E-03	7.08023E-03 6.08431E-03	1.86323E-02 1.58821E-02
9.2	5.06486E-05	6.54199E-05	9.33138E-05	1.46562E-04	2.52621E-04	4.76067E-04		2.17532E-03	5.23313E-03	1.35517E-02
9.3	4.54920E-05	5.86081E-05	8.33036E-05	1.30267E-04	2.23376E-04	4.18494E-04		1.88665E-03	4.50495E-03	1.15747E-02
9.4	4.08643E-05	5.25134E-05	7.43835E-05	1.15819E-04	1.97595E-04	3.68067E-04	7.45780E-04	1.63748E-03	3.88138E-03	9.89573E-03
9.5	3.67109E-05	4.70593E-05	6.64326E-05	1.03003E-04	1.74856E-04	3.23874E-04		1.42222E-03	3.34688E-03	8.46828E-03
9.6	3.29828E-05 2.96359E-05	4.21776E-05 3.78075E-05	5.93437E-05 5.30219E-05	9.16307E-05 8.15369E-05	1.54792E-04 1.37081E-04	2.85121E-04 2.51121E-04		1.23611E-03 1.07508E-03	2.88830E-03 2.49451E-03	7.25341E-03 6.21840E-03
9.8	2.66310E-05	3.38947E-05	4.73828E-05	7.25746E-05	1.21439E-04	2.21275E-04		9.35635E-04	2.15606E-03	5.33575E-03
9.9	2.39328E-05	3.03909E-05	4.23515E-05	6.46143E-05	1.07619E-04	1.95061E-04	3.83462E-04	8.14798E-04	1.86491E-03	4.58230E-03
10.0	2.15098E-05	2.72527E-05	3.78614E-05	5.75418E-05	9.54033E-05	1.72026E-04		7.10009E-04	1.61426E-03	3.93852E-03
10.1	1.93337E-05 1.73792E-05	2.44416E-05 2.19231E-05	3.38535E-05 3.02752E-05	5.12563E-05 4.56683E-05	8.46023E-05 7.50480E-05	1.51774E-04 1.33960E-04		6.19072E-04 5.40101E-04	1.39828E-03 1.21203E-03	3.38794E-03 2.91664E-03
10.2	1.73/92E-05 1.56235E-05	1.96665E-05	2.70797E-05	4.06992E-05	6.65935E-05	1.18284E-04		4.71477E-04	1.05131E-03	2.51285E-03
10.4	1.40462E-05	1.76442E-05	2.42255E-05	3.62792E-05	5.91094E-05	1.04482E-04	1.99759E-04	4.11803E-04	9.12495E-04	2.16660E-03
10.5	1.26291E-05	1.58316E-05	2.16757E-05	3.23464E-05	5.24818E-05	9.23257E-05		3.59880E-04	7.92520E-04	1.86944E-03
10.6	1.13558E-05 1.02117E-05	1.42068E-05 1.27501E-05	1.93974E-05 1.73612E-05	2.88463E-05 2.57304E-05	4.66109E-05 4.14083E-05	8.16133E-05 7.21697E-05		3.14673E-04 2.75289E-04	6.88753E-04 5.98939E-04	1.61421E-03 1.39480E-03
10.7	9.18342E-06	1.2/301E-03 1.14439E-05	1.73612E-03	2.37304E-03 2.29559E-05	3.67966E-05	6.38410E-05		2.73289E-04 2.40957E-04	5.98939E-04 5.21149E-04	1.20605E-03
10.9	8.25927E-06	1.02727E-05	1.39139E-05	2.04847E-05	3.27073E-05	5.64927E-05		2.11013E-04	4.53728E-04	1.04354E-03
11.0	7.42863E-06	9.22218E-06	1.24589E-05	1.82832E-05	2.90800E-05	5.00069E-05		1.84880E-04	3.95256E-04	9.03526E-04
11.1	6.68197E-06	8.27994E-06	1.11576E-05	1.63215E-05	2.58616E-05	4.42800E-05		1.62061E-04	3 44511E-04	7.82801E-04
11.2	6.01074E-06 5.40728E-06	7.43468E-06 6.67633E-06	9.99360E-06 8.95224E-06	1.45730E-05 1.30142E-05	2.30052E-05 2.04692E-05	3.92214E-05 3.47514E-05	7.20319E-05 6.35241E-05	1.42124E-04 1.24697E-04	3.00446E-04 2.62157E-04	6.78634E-04 5.88691E-04
11.4	4.86471E-06	5.99589E-06	8.02044E-06	1.16243E-05	1.82172E-05	3.08002E-05	5.60420E-05	1.09456E-04	2.28867E-04	5.10976E-04
11.5	4.37685E-06	5.38528E-06	7.18655E-06	1.03846E-05	1.62167E-05	2.73063E-05	4.94592E-05	9.61191E-05	1.99906E-04	4.43782E-04
11.6	3.93814E-06	4.83727E-06	6.44018E-06	9.27877E-06	1.44391E-05	2.42158E-05	4.36651E-05	8.44435E-05	1.74698E-04	3.85647E-04
11.7	3.54362E-06 3.18880E-06	4.34540E-06 3.90388E-06	5.77203E-06 5.17382E-06	8.29209E-06 7.41156E-06	1.28593E-05 1.14548E-05	2.14811E-05 1.90605E-05	3.85632E-05 3.40690E-05	7.42171E-05 6.52557E-05	1.52743E-04 1.33612E-04	3.35317E-04 2.91716E-04
11.9	2.86967E-06	3.50751E-06	4.63816E-06	6.62560E-06	1.02059E-05	1.69172E-05		5.73993E-05	1.16931E-04	2.53922E-04
12.0	2.58262E-06	3.15163E-06	4.15843E-06	5.92392E-06	9.09503E-06	1.50190E-05	2.66171E-05	5.05085E-05	1.02380E-04	2.21142E-04
12.1	2.32441E-06	2.83209E-06	3.72875E-06	5.29737E-06	8.10674E-06		2.35381E-05	4.44619E-05	8.96798E-05	1.92693E-04
12.2	2.09212E-06 1.88315E-06	2.54514E-06 2.28744E-06	3.34383E-06 2.99897E-06	4.73781E-06 4.23798E-06	7.22728E-06 6.44449E-06	1.18466E-05 1.05253E-05	2.08218E-05 1.84245E-05	3.91538E-05 3.44921E-05	7.85897E-05 6.89007E-05	1.67989E-04 1.46526E-04
12.4	1.69513E-06	2.05598E-06	2.68996E-06	3.79144E-06	5.74757E-06	9.35361E-06		3.03963E-05	6.04318E-05	1.27867E-04
12.5	1.52597E-06	1.84808E-06	2.41304E-06	3.39243E-06	5.12698E-06	8.31433E-06	1.44390E-05	2.67963E-05	5.30257E-05	1.11637E-04
12.6	1.37375E-06	1.66132E-06	2.16485E-06	3.03583E-06	4.57424E-06	7.39224E-06	1.27878E-05	2.36308E-05	4.65461E-05	9.75135E-05
12.7 12.8	1.23678E-06 1.11351E-06	1.49353E-06 1.34279E-06	1.94238E-06 1.74294E-06	2.71708E-06 2.43213E-06	4.08182E-06 3.64305E-06	6.57392E-06 5.84748E-06		2.08462E-05 1.83959E-05	4.08745E-05 3.59080E-05	8.52155E-05 7.45021E-05
12.9	1.00258E-06	1.20734E-06	1.56413E-06	2.17734E-06	3.25200E-06	5.20246E-06	8.89808E-06	1.62388E-05	3.15569E-05	6.51643E-05
13.0	9.02740E-07	1.08563E-06	1.40380E-06	1.94950E-06	2.90341E-06	4.62958E-06	7.88911E-06	1.43393E-05	2.77435E-05	5.70215E-05
13.1	8.12880E-07	9.76244E-07	1.26001E-06	1.74572E-06	2.59262E-06	4.12064E-06		1.26658E-05	2.43998E-05	4.99174E-05
13.2	7.31996E-07 6.59189E-07	8.77939E-07 7.89582E-07	1.13106E-06 1.01539E-06	1.56343E-06 1.40034E-06	2.31548E-06 2.06828E-06	3.66841E-06 3.26646E-06		1.11911E-05 9.89102E-06	2.14668E-05 1.88930E-05	4.37165E-05 3.83016E-05
13.4	5.93649E-07	7.10162E-07	9.11632E-07	1.25442E-06	1.84777E-06	2.90913E-06	4.88716E-06	8.74455E-06	1.66336E-05	3.35708E-05
13.5	5.34648E-07	6.38768E-07	8.18544E-07	1.12383E-06	1.65101E-06	2.59140E-06	4 33839E-06	7.73319E-06	1.46493E-05	2.94359E-05
13.6	4.81530E-07					2.30880E-06				2.58202E-05
13.7 13.8	4.33707E-07 3.90649E-07	5.16881E-07 4.64999E-07	6.60079E-07 5.92823E-07		1.31871E-06 1.17881E-06	2.05741E-06 1.83372E-06		6.05293E-06 5.35732E-06	1.13739E-05 1.00269E-05	2.26572E-05 1.98891E-05
13.9	3.51880E-07	4.18348E-07	5.32462E-07	7.24801E-07	1.05390E-06	1.63464E-06		4.74291E-06	8.84220E-06	1.74655E-05
14.0	3.16971E-07	3.76397E-07	4.78284E-07	6.49702E-07	9.42357E-07	1.45744E-06	2.39979E-06	4.20006E-06	7.79987E-06	1.53427E-05
14.1	2.85535E-07	3.38672E-07	4.29651E-07	5.82446E-07	8.42733E-07	1.29966E-06		3.72029E-06	6.88249E-06	1.34827E-05
14.2	2.57227E-07 2.31734E-07	3.04744E-07 2.74229E-07	3.85992E-07 3.46795E-07	5.22204E-07 4.68240E-07	7.53741E-07 6.74235E-07	1.15917E-06 1.03403E-06		3.29616E-06 2.92111E-06	6.07482E-06 5.36349E-06	1.18522E-05 1.04225E-05
14.4	2.08774E-07	2.46782E-07	3.11600E-07		6.03193E-07	9.22554E-07	1.50012E-06	2.58935E-06	4.73681E-06	9.16826E-06
14.5	1.88097E-07	2.22094E-07	2.79997E-07	3.76575E-07	5.39704E-07	8.23227E-07	1.33454E-06	2.29583E-06	4.18454E-06	8.06760E-06
14.6	1.69473E-07	1.99885E-07	2.51617E-07	3.37757E-07	4.82958E-07	7.34709E-07	1.18747E-06	2.03605E-06	3.69767E-06	7.10135E-06
14.7 14.8	1.52698E-07 1.37588E-07	1.79906E-07 1.61931E-07	2.26129E-07 2.03236E-07	3.02969E-07 2.71789E-07	4.32230E-07 3.86877E-07	6.55810E-07 5.85473E-07	1.05681E-06 9.40702E-07	1.80608E-06 1.60245E-06	3.26834E-06 2.88963E-06	6.25280E-06 5.50735E-06
14.9	1.23978E-07	1.45759E-07	1.82673E-07	2.43839E-07	3.46323E-07	5.22757E-07		1.42209E-06	2.55547E-06	4.85225E-06
15.0	1.11718E-07	1.31209E-07	1.64201E-07	2.18783E-07	3.10056E-07	4.66828E-07	7.45762E-07	1.26231E-06	2.26053E-06	4.27635E-06
15.1	1.00673E-07	1.18116E-07	1.47606E-07	1.96318E-07	2.77618E-07	4.16942E-07	6.64187E-07	1.12072E-06	2.00014E-06	3.76991E-06
15.2	9.07231E-08	1.06334E-07	1.32697E-07	1.76175E-07	2.48602E-07	3.72440E-07	5.91638E-07	9.95217E-07	1.77018E-06	3.32441E-06

	m										
<u>"</u>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
15.3	8.17592E-08	9.57323E-08	1.19301E-07	1.58112E-07	2.22642E-07	3.32733E-07	5.27104E-07	8.83954E-07	1.56705E-06	2.93239E-06	
15.4	7.36832E-08	8.61909E-08	1.07264E-07	1.41913E-07	1.99415E-07	2.97301E-07	4.69689E-07	7.85289E-07	1.38756E-06	2.58731E-06	
15.5	6.64070E-08	7.76039E-08	9.64472E-08	1.27383E-07	1.78630E-07	2.65677E-07	4.18596E-07	6.97776E-07	1.22892E-06	2.28348E-06	
15.6	5.98510E-08	6.98753E-08	8.67261E-08	1.14350E-07	1.60028E-07	2.37448E-07	3.73122E-07	6.20138E-07	1.08867E-06	2.01586E-06	
15.7	5.39439E-08	6.29189E-08	7.79894E-08	1.02659E-07	1.43377E-07	2.12246E-07	3.32641E-07	5.51244E-07	9.64 64 1E-07	1.78009E-0€	
15.8	4.86213E-08	5.66575E-08	7.01368E-08	9.21697E-08	1.28472E-07	1.89743E-07	2.96599E-07	4.90097E-07	8.54938E-07	1.57230E-06	
15.9	4.38250E-08	5.10211E-08	6.30783E-08	8.27587E-08	1.15128E-07	1.69648E-07	2.64503E-07	4.35814E-07	7.57877E-07	1.38912E-06	
16.0	3.95031E-08	4.59473E-08	5.67333E-08	7.43140E-08	1.03180E-07	1.51699E-07	2.35916E-07	3.87615E-07	6.71982E-07	1.22759E-06	
16.1	3.56083E-08	4.13797E-08	5.10293E-08	6.67359E-08	9.24802E-08	1.35665E-07	2.10450E-07	3.44808E-07	5.95949E-07	1.08512E-06	
16.2	3.20984E-08	3.72676E-08	4.59012E-08	5.99348E-08	8.28980E-08	1.21341E-07	1.87760E-07	3.06783E-07	5.28631E-07	9.59414E-01	
16.3	2.89353E-08	3 35653E-08	4.12906E-08	5.38307E-08	7.43156E-08	1.08542E-07	1.67541E-07	2.72999E-07	4.69013E-07	8.48476E-0	
16.4	2.60846E-08	3.02320E-08	3.71451E-08	4.83516E-08	6.66277E-08	9.71036E-08	1.49521E-07	2.42978E-07	4.16204E-07	7 50543E-0	
16.5	2.35153E-08	2.72307E-08	3.34174E-08	4.34331E-08	5.97405E-08	8.68807E-08	1.33457E-07	2.16294E-07	3.69415E-07	6 64069E-07	
16.6	2.11997E-08	2.45283E-08	3.00653E-08	3.90176E-08	5.35699E-08	7.77428E-08	1.19136E-07	1.92573E-07	3.27950E-07	5.87693E-07	
16.7	1.91126E-08	2.20948E-08	2.70508E-08	3.50533E-08	4.80408E-08	6.95736E-08	1.06366E-07	1.71481E-07	2.91196E-07	5.20219E-07	
16.8	1.72314E-08	1.99034E-08	2.43397E-08	3.14938E-08	4.30860E-08	6.22695E-08	9.49773E-08	1.52724E-07	2.58610E-07	4.60594E-07	
16.9	1.55357E-08	1.79301E-08	2.19014E-08	2.82976E-08	3.86455E-08	5.57382E-08	8.48192E-08	1.36040E-07	2.29714E-07	4.07892E-07	
17.0	1.40073E-08	1.61529E-08	1.97083E-08	2.54273E-08	3.46655E-08	4.98971E-08	7.57573E-08	1.21198E-07	2.04085E-07	3.61298E-07	
17.1	1.26295E-08	1.45523E-08	1.77356E-08	2.28497E-08	3.10979E-08	4.46728E-08	6.76721E-08	1.07992E-07	1.81348E-07	3.20094E-07	
17.2	1.13875E-08	1.31108E-08	1.59610E-08	2.05345E-08	2.78997E-08	3.99995E-08	6.04574E-08	9.62390E-08	1.61173E-07	2.83649E-07	
17.3	1.02679E-08	1.18125E-08	1.43647E-08	1.84551E-08	2.50324E-08	3.58186E-08	5.40186E-08	8.57780E-08	1.43267E-07	2.51405E-07	
17.4	9.25861E-09	1.06430E-08	1.29286E-08	1.65872E-08	2.24615E-08	3.20779E-08	4.82713E-08	7.64653E-08	1.27373E-07	2.22872E-07	
17.5	8.34871E-09	9.58968E-09	1.16366E-08	1.49093E-08	2.01562E-08	2.87306E-08	4.31407E-08	6.81736E-08	1.13262E-07	1.97616E-07	
17.6	7.52840E-09	8.64084E-09	1.04741E-08	1.34018E-08	1.80888E-08	2.57351E-08	3.85599E-08	6.07896E-08	1.00731E-07	1.75257E-07	
17.7	6.78885E-09	7.78613E-09	9.42821E-09	1.20475E-08	1.62347E-08	2.30540E-08	3.44695E-08	5.42129E-08	8.96013E-08	1.55457E-07	
17.8	6.12208E-09	7.01618E-09	8.48708E-09	1.08306E-08	1.45717E-08	2.06542E-08	3.08166E-08	4.83545E-08	7.97144E-08	1.37921E-07	
17.9	5.52091E-09	6.32255E-09	7.64021E-09	9.73717E-09	1.30800E-08	1.85059E-08	2.75538E-08	4.31350E-08	7.09298E-08	1.22386E-07	
18.0	4.97889E-09	5.69767E-09	6.87812E-09	8.75461E-09	1.17418E-08	1.65825E-08	2.46393E-08	3.84840E-08	6.31233E-08	1 08621E-07	
18.1	4.49018E-09	5.13470E-09	6.19229E-09	7.87162E-09	1.05412E-08	1.48603E-08	2.20354E-08	3.43391E-08	5.61848E-08	9.64217E-08	
18.2	4.04952E-09	4.62748E-09	5.57507E-09	7.07806E-09	9.46411E-09	1.33181E-08	1.97088E-08	3.06446E-08	5.00166E-08	8.56079E-08	
18.3	3.65219E-09	4.17049E-09	5.01956E-09	6.36483E-09	8.49761E-09	1.19370E-08	1.76298E-08	2.73510E-08	4.45324E-08	7 60203E-08	
18.4	3.29391E-09	3.75873E-09	4.51958E-09	5.72376E-09	7.63032E-09	1.07001E-08	1.57717E-08	2.44146E-08	3.96555E-08	6.75183E-08	
18.5	2.97083E-09	3.38772E-09	4.06955E-09	5.14753E-09	6.85200E-09	9.59206E-09	1.41109E-08	2.17960E-08	3.53178E-08	5.99775E-08	
18.6	2.67950E-09	3.05341E-09	3.66447E-09	4.62953E-09	6.15347E-09	8.59951E-09	1.26262E-08	1.94608E-08	3.14592E-08	5 32879E-08	
18.7	2.41678E-09	2.75217E-09	3.29983E-09	4.16387E-09	5.52650E-09	7.71028E-09	1.12989E-08	1.73778E-08	2.80262E-08	4.73523E-08	
18.8	2.17987E-09	2.48072E-09	2.97159E-09	3.74522E-09	4.96373E-09	6.91356E-09	1.01121E-08	1.55196E-08	2.49713E-08	4.20849E-08	
18.9	1.96622E-09	2.23609E-09	2.67609E-09	3.36883E-09	4.45854E-09	6.19965E-09	9.05087E-09	1.38618E-08	2.22525E-08	3.74094E-08	
19.0	1.77354E-09	2.01564E-09	2.41006E-09	3.03041E-09	4.00501E-09	5.55989E-09	8.10177E-09	1.23824E-08	1.98325E-08	3.32587E-08	
19.1	1.59978E-09	1.81698E-09	2.17055E-09	2.72611E-09	3.59783E-09	4.98653E-09	7.25288E-09	1.10622E-08	1.76780E-08	2.95733E-08	
19.2	1.44306E-09	1.63793E-09	1.95491E-09	2.45248E-09	3.23225E-09	4.47263E-09	6.49354E-09	9.88391E-09	1.57597E-08	2.63003E-08	
19.3	1.30172E-09	1.47656E-09	1.76076E-09	2.20641E-09	2.90398E-09	4.01199E-09	5.81423E-09	8.83208E-09	1.40514E-08	2.33931E-08	
19.4	1.17425E-09	1.33113E-09	1.58594E-09	1.98512E-09	2.60920E-09	3.59906E-09	5.20646E-09	7.89305E-09	1.25299E-08	2 08105E-08	
19.5	1.05928E-09	1.20005E-09	1.42852E-09	1.78611E-09	2.34448E-09	3.22886E-09	4.66263E-09	7.05461E-09	1.11746E-08	1.85157E-08	
19.6	9.55581E-10	1.08190E-09	1.28677E-09	1.60711E-09	2.10673E-09	2.89695E-09	4.17598E-09	6.30591E-09	9.96712E-09	1 64764E-08	
19.7	8.62050E-10	9.75407E-10	1.15913E-09	1 44612E-09	1.89320E-09	2.59934E-09	3.74044E-09	5.63726E-09	8.89124E-09	1.46639E-08	
19.8	7.77687E-10	8.79417E-10	1.04418E-09	1.30131E-09	1.70140E-09	2.33246E-09	3.35062E-09	5.04003E-09	7.93246E-09	1.30526E-08	
19.9	7.01593E-10	7.92892E-10	9.40655E-10	1.17105E-09	1.52912E-09	2.09313E-09	3.00167E-09	4.50653E-09	7.07793E-09	1.16200E-08	
20.0	6.32954E-10	7 14897F-10	8.47423E-10	1.05387E-09		1.87848E-09		4.02991E-09	6.31621E-09		

П р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Функция $L(u,\beta)$

Функция:
$$L(u,\beta) = \int_{0}^{u} K_{0}(\sqrt{\beta^{2} + \tau^{2}}) d\tau$$
; $L(u,\pm\beta) = -L(-u,\pm\beta)$.

Предельные значения функции: $L(u,0) = \int_0^u K_0(\tau) d\tau$, $L(0,\beta) = 0$,

где $K_0(\beta)$ – функция Бесселя (Приложение 2).

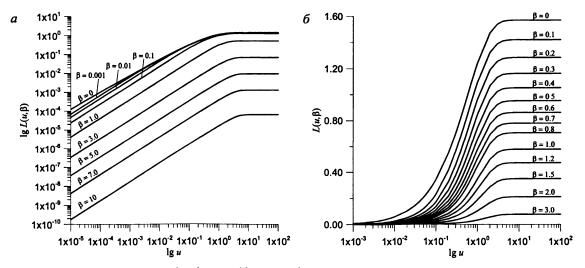


Рис. П23. Зависимость функции (а) и логарифма функции (б) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $L(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=10^{-5}\div\infty$; $\beta=0,\,\beta=10^{-3}\div10.0$.

Значения функции $L(u,\beta)$

_										17		(4,p)								
	•	0.001	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	●.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0
0.00001	1 2629e-4	7.0237e-5	4 7212e-5	2.4271e-5	1 7527e-5	1.3725e-5	1.1145e-5	9.2442e-6	7.7752e-6	6 6052e-6	5 6535e-6	4 8673e-6	4 2102e-6	3.1851e-6	2.1381e-6	1 1389c-6	3 4740c-7	1.1160e-7	3 6911c-8	
0.00002	2 3871e-4	1 4047e-4	9 4425e-5	4 8541e-5	3 5054e-5	2 7449e-5	2 2291e-5	1 8488e-5	1 5550e-5	1.3210e-5	1.1307e-5	9 7346e-6		6.3702c-6	4.2761e-6	2.2779c-6	6 9479c-7	2 2319e-7	7.3822e-8	
0.00003	3 4591e-4	2 1071e-4	1 4164c-4	7.2812e-5	5 2581e-5	4 1174c-5	3 3436e-5	2.7733e-5	2 3326e-5	1.9816e-5	1 6960e-5	1 4602e-5		9.5552e-6		3 4168c-6		3.3479c-7	1.1073e-7	
0.00004	4 4970e-4 5 5097e-4	2.8094e-4 3.5116e-4	1 8885e-4 2.3606e-4	9 7083e-5 1.2135e-4	7 0108e-5 8.7635e-5	5.4898e-5	4 4581e-5	3.6977e-5	3 1101e-5	2 6421e-5	2 2614e-5	1 9469e-5		1 2740e-5		4 5558e-6		4.4639c-7		
0.00006	6 5023e-4	4.2139e-4	2.8327e-4	1.4562e-4	8.7635e-5 1.0516e-4	6 8623e-5 8 2348e-5	5 5726e-5 6.6872e-5	4.6221e-5 5 5465e-5	3.8876e-5 4 6651e-5	3 3026e-5 3 9631e-5	2 8267e-5	2 4337e-5		1.5925e-5		5 6947e-6		5.5798e-7	1 8455e-7	
0.00007	7 4781c-4	4.9160e-4	3.3049e-4	1 6989c-4	1 2269c-4	9.6072e-5	7 8017e-5	6 4709e-5	5.4427e-5	4.6236e-5	3 3921e-5 3.9574e-5	2 9204e-5 3 4071e-5		1.9110e-5 2 2296e-5	1.2828e-5 1.4966e-5	6.8336e-6 7 9726e-6	2 0844c-6 2 4318c-6	6 6958e-7 7.8118e-7		1 0668e-9
0.00003	8 4395c-4	5.6181e-4	3.7770e-4	1.9417e-4	1.4022e-4	1.0980e-4	8.9162e-5	7 3954e-5	6 2202e-5	5 2842e-5	4 5228e-5	3 8938c-5		2.5481e-5		9 1115e-6		8.9277e-7	2.5838e-7 2.9529e-7	1.2446e-9 1.4224e-9
0.00002	9 3885e-4	6.3201e-4	4 2491e-4	2.1844c-4	1 5774c-4	1 2352e-4	1 0031e-4	8 3198e-5	6 9977e-5	5.9447e-5	5 0881e-5	4 3806e-5		2.8666e-5	1.9243e-5	1 0250e-5		1 0044c-6	3.3220e-7	1 6002e-9
0.0001	1 0326e-3	7.0220e-4	4.7212e-4	2 4271e-4	1.7527e-4	1.3725e-4	1 1145e-4	9 2442e-5	7.7752e-5	6 6052e-5	5 6535e-5	4.8673e-5		3 1851e-5		1 1389e-5		1 1160e-6		1 7780e-9
0.0002	1 9266e-3	1 4034e-3	9.4424e-4	4 8541c-4	3.5054e-4	2.7449c-4	2 2291e-4	1 8488c-4	1 5550e-4	1 3210e-4	1 1307c-4	9 7346e-5	8 4205e-5	6 3702e-5	4 2761e-5	2.2779c-5	6 9479c-6	2 2319e-6	7.3822e-7	3.5560e-9
0.0003	2 7683e-3	2 1027c-3	1 4163e-3	7.2812e-4	5 2581e-4	4 1174c-4	3.3436e-4	2 7733e-4	2 3326e-4	1 9816c-4	1 6960c-4	1 4602e-4	1 2631e-4	9.5552e-5		3 4168e-5		3 3479e-6		5 3340e-9
0.0004	3.5760e-3	2.7993e-3	1 8884c-3	9 7083c-4	7 0108c-4	5 4898c-4	4.4581e-4	3 6977e-4	3.1101e-4	2 6421e-4	2.2614c-4	1.9469c-4	1 6841e-4	1.2740c-4	8 5522e-5	4.5558e-5	1.3896e-5	4 4639e-6		7 1120e-9
0.0005	4 3584c-3	3.4924e-3	2.3604c-3	1 2135e-3	8.7635e-4	6.8623e-4	5.5726c-4	4 6221e-4	3 8876c-4	3 3026e-4	2 8267e-4	2 4337c-4	2 1051e-4	1 5925e-4	1.0690c-4	5 6947e-5	1 7370e-5	5.5798e-6	1 8455e-6	8 8900e-9
0.0006	5 1207e-3	4 1815e-3	2 8324e-3	1 4562e-3	1.0516e-3	8 2348c-4	6.6872c-4	5 5465e-4	4 6651e-4	3 9631e-4	3.3921c-4	2 9204c-4	2 5261c-4	1 9110e-4	1 2828c-4	6.8336e-5	2 0844e-5	6 6958e-6	2 2147e-6	1.0668e-8
0.0007	5 8663e-3	4.8663e-3	3.3043e-3	1 6989c-3	1.2269c-3	9.6072e-4	7 8017c-4	6 4709c-4	5.4427e-4	4 6236c-4	3 9574c-4	3.4071e-4		2.2296e-4	1.4966c-4	7.9726e-5	2 4318e-5	7 8118c-6	2 5838e-6	1 2446c-8
0.0008	6 5975e-3	5 5463e-3	3.7761e-3	1 9416c-3	1.4022e-3	1 0980e-3	8.9162e-4	7.3953e-4	6.2202e-4	5.2842e-4	4 5228e-4	3 8938c-4	3.3682e-4	2 5481e-4	1.7104c-4	9 1115e-5	2 7792e-5	8.9277e-6	2.9529e-6	1.4224c-8
0.0009	7.3161e-3	6.2215e-3	4.2479c-3	2.1844c-3	1.5774c-3	1.2352e-3	1.0031e-3	8 3198c-4	6.9977e-4	5 9447c-4	5.0881c-4	4.3806e-4	3 7892e-4	2 8666e-4	1.9242c-4	1 0250c-4	3 1266e-5	1 0044c-5	3 3220e-6	1 6002e-8
0.001	8 0237e-3	6.8917c-3	4 7196e-3	2 4271e-3	1.7527e-3	1.3725e-3	1.1145e-3	9 2442e-4	7.7752e-4	6 6052e-4	5.6535e-4	4 8673e-4	4 2102e-4	3 1851e-4		1.1389c-4	3 4740c-5	1.1160e-5		1 7780e-8
0.002	1.4661e-2	1.3331e-2	9.4293e-3	4 8540e-3		2 7449e-3	2.2291e-3	1 8488e-3	1 5550e-3	1 3210e-3	1 1307e-3	9.7346c-4	8 4205c-4	6 3702e-4		2 2779c-4	6 9479c-5	2 2319e-5		3.5560e-8
0.003	2.0775e-2 2 6550e-2	1.9368e-2 2.5103e-2	1.4120e-2 1.8783e-2	7 2808e-3 9 7072e-3	5 2580e-3	4 1173e-3	3.3436e-3	2.7732e-3	2.3326e-3	1 9816e-3	1 6960e-3	1 4602c-3	1 2631e-3	9 5552e-4		3 4168c-4	1 0422e-4	3.3479e-5	1.1073e-5	5 3340e-8
0.005	3.2071e-2	3 0600e-2	2.3412e-2	1.2133e-2	7 0106c-3 8 7630c-3	5 4897e-3 6 8621e-3	4 4581e-3 5 5725e-3	3 6976e-3 4 6220e-3	3 1101e-3	2 6421e-3 3.3026e-3	2.2614e-3	1 9469c-3	1 6841e-3		0 00085522	4 5557c-4	1 3896e-4	4.4639e-5	1 4764e-5	7 1120e-8
0.006	3.7392e-2	3.5904e-2	2.8001e-2	1.4559e-2	1.0515e-2	8 2344e-3	6 6870e-3	5.5464e-3	3.8876e-3 4 6651e-3	3.3020e-3 3 9631e-3	2.8267e-3 3 3920e-3	2.4336e-3 2.9204e-3			0 00106902	5 6947e-4 6 8336e-4	1.7370e-4 2 0844e-4	5 5798e-5 6 6958e-5		8 8900e-8 1.0668e-7
0.007	4.2545e-2	4.1045e-2	3 2546c-2	1.6984e-2	1 2268e-2	9 6066e-3	7 8014e-3	6 4707c-3	5 4425e-3	4 6236e-3	3 9574c-3	3.4071c-3			0 00128283	7 9725c-4	2 4318e-4	7 8118e-5		1.0008c-7
0.003	4.7554e-2	4 6046e-2	3.7044c-2	1 9408e-2	1 4020e-2	1 0979e-2	8 9158e-3	7 3951e-3	6.2200e-3	5 2840e-3	4.5227e-3	3.8938e-3	3.3681c-3		0 00171043	9 1115c-4	2.7791c-4	8 9277e-5		1.4224c-7
0.009	5 2439e-2	5.0923e-2	4 1493e-2	2 1832e-2	1 5771e-2	1 2351e-2	1.0030e-2	8 3194e-3	6.9974c-3	5 9445c-3	5 0880e-3	4 3805e-3			0 00192423	1.0250e-3	3 1265e-4	1 0044c-4		1 6002e-7
0.01	5.7212e-2	5 5691e-2	4 5893e-2	2 4254c-2	1 7523e-2	1 3723e-2	1 1144c-2	9 2436e-3	7.7749e-3	6 6049c-3	5 6533e-3	4.8672e-3	4 2101e-3		0.00213802	1.1389e-3	3.4739c-4	1 1160e-4	3 6911e-5	1 7780c-7
0.02	1 0056e-1	9.9017e-2	8.7262e-2	4 8412e-2	3 5022e-2	2 7436e-2	2 2283e-2	1 8484e-2	1.5548e-2	1.3208e-2	1 1306e-2	9.7335e-3	8 4197e-3		0.00427586	2 2778c-3	6 9477e-4	2.2319e-4	7 3821c-5	3.5560e-7
0.03	1.3869c-1	1 3713e-1	1 2462e-1	7 2380e-2	5 2474c-2	4 1128e-2	3 3411e-2	2 7718e-2	2.3316c-2	1.9809e-2	1 6956c-2	1 4598c-2	1 2628e-2	9 5536e-3	0.00641333	3 4165e-3	1 0421e-3	3 3478e-4	1 1073c-4	5.3339c-7
0.04	1.7342e-1	1.7186e-1	1 5895e-1	9 6079c-2	6 9857e-2	5 4790e-2	4.4523e-2	3 6942e-2	3 1078e-2	2.6405e-2	2 2602e-2	1 9461c-2	1.6835e-2	1 2736e-2	0 00855025	4 5550e-3	1.3894e-3	4 4635e-4	1 4764c-4	7 1118c-7
0.05	2.0563e-1	2 0407e-1	1 9092e-1	1 1944e-1	8 7147e-2	6 8413e-2	5 5613e-2	4 6152e-2	3.8831e-2	3.2995e-2	2 8245e-2	2 4320c-2	2 1039e-2	1.5918e-2	0 01068643	5.6932e-3	1 7367e-3	5 5792e-4	1 8454c-4	8 8896c-7
0.06	2.3584e-1	2 3427c-1	2.2097e-1	1 4241c-1	1 0433c-1	8.1985c-2	6.6677e-2	5 5346c-2	4 6573c-2	3 9577e-2	3 3882e-2	2 9175e-2	2 5240e-2		0 01282168	6 8311e-3	2.0839c-3	6 6947c-4	2 2144c-4	1 0667c-6
0.07	2.6438e-1	2.6282e-1	2 4939c-1	1 6495e-1	1 2137e-1	9 5500c-2	7 7708e-2	6 4521e-2	5 4303e-2	4.6151e-2		3 4026c-2			0 01495583	7.9686c-3	2 4310e-3	7.8100e-4		1 2445e-6
0.08	2 9150c-1	2.8994e-1	2.7643e-1	1 8702c-1	1 3827e-1	1 0895e-1	8.8702e-2	7 3673e-2	6 2018c-2	5.2714c-2	4 5136c-2	3 8871e-2			0 01708869	9 1055e-3	2 7780e-3	8.9251e-4	2 9522e-4	1 4222c-6
0.09	3 1738c-1 3 4216c-1	3 1582e-1 3 4060e-1	3.0224e-1 3 2697e-1	2 0863e-1 2.2974e-1	1.5501e-1 1.7157e-1	1.2232e-1 1.3561e-1	9 9655e-2 1 1056e-1	8 2800e-2	6 9715e-2	5.9266e-2	5.0751e-2	4 3709c-2			0.01922007	1 0242c-2		1.0040e-3		1.6000e-6
0.2	5.4712e-1	5 4555e-1	5 3167e-1	4 1547e-1	3.2556e-1	2.6251e-1	2.1616e-1	9 1897c-2 1 8069c-1	7.7394c-2 1 5272c-1	6.5804e-2 1 3016e-1	5 6356e-2 1.1167e-1	4.8541e-2 9.6305e-2	4 2003e-2 8 3415e-2	3.1791e-2 6.3224e-2		1 1378e-2 2 2686e-2	3 4717e-3	1.1154e-3 2.2278e-3	3 6898c-4	1.7777e-6
0.3	7 0196e-1	7.0040e-1	6 8644c-1	5 6314c-1	4.5698e-1	3.7604c-1	3 1341e-1	2 6398e-1		1.9182e-1	1.6500e-1	9.0303e-2 1.4258e-1			0.06332492	3 3857c-2	6 9301e-3 1.0362e-2	3.3339e-3	7.3714e-4 1 1037e-3	3.5535e-6 5.3256e-6
0.4	8 2559e-1	8.2402e-1	8 1004c-1	6.8319e-1	5 6791e-1	4.7534e-1	4 0084e-1	3 4039e-1		2 4985e-1		1.4238E-1 1.8680e-1			0.06332492	4 4827c-2	1.03626-2 1.3755e-2	4.4309e-3	1 103/e-3 1 4679e-3	7.0922e-6
0.5	9.2710e-1	9.2553e-1	9.1152e-1	7.8263e-1	6 6174c-1	5.6142e-1	4.7835e-1	4 0940e-1		3 0369e-1	2 6302e-1	2 2852c-1			0.10324102	5 5538e-2	1 7096c-2	5 5157e-3	1.8289e-3	8.8513e-6
0.6	1 0119e+0	1.0103e+0	9 9631e-1	8.6611c-1	7 4155e-1	6.3589e-1	5.4657c-1	47111c-1	4 0726c-1	3 5307c-1	3 0692c-1	2 6746c-1			0 12208915	6 5936c-2	2.0375e-2	6 5855e-3	2 1859e-3	1 0601c-5
0.7	1.0836c+0	1 0820e+0	1 0680e+0	9 3691c-1	8 0982e-1	7 0036c-1	6 0643e-1	5.2598e-1	4 5707e-1	3 9798c-1	3 4722e-1	3 0351e-1			0.14006502	7 5976c-2	2 3580c-2	7 6378e-3		1.2340e-5
0.8	1.1447c+0	1.1432e+0	1.1291e+0	9.9742e-1	8 6852e-1	7.5628e-1	6.5889e-1	5 7458c-1	5 0165e-1	4 3856e-1	3.8396e-1	3.3663e-1			0 15710101	8 5621e-2	2.6703e-2	8 6701e-3	2.8855e-3	1.4067e-5
0.9	1.1972c+0	1.1956e+0	1 1816c+0	1 0494c+0	9 1921c-1	8 0490e-1	7.0487e-1	6 1755e-1	5 4142e-1	4 7508e-1		3 6688c-1			0 17315359	9 4842c-2		9 6799e-3		1 5779e-5
1	1 2425c+0	1.2409c+0	1.2269e+0	1 0944c+0	9 6316e-1	8 4726c-1	7 4520e-1	6 5551e-1	5.7681e-1	5 0782c-1	4 4737e-1	3.9439c-1	3 4796e-1	2 7149e-1	0 18820104	1 0362e-1	3.2667e-2	1 0665e-2	3.5614c-3	1 7475e-5
2	1 4737e+0	1.4721e+0	1.4580c+0	1 3244e+0		1.0684c+0	9.5915e-1	8 6075c-1		6 9261e-1	6 2106e-1	5 5679c-1			0 28835902	1 6652e-1		1 8880e-2	6 45 14c-3	3 3236e-5
3	1.5399e+0	1 5384c+0	1.5243e+0	1 3905e+0	1 2554e+0	1 1332e+0	1.0228e+0	9.2302e-1	8 3284e-1	7 5136c-1	6 7775e-1	6 1127e-1			0 32814623	1 9485e-1		2 3954e-2	8 3971e-3	4.6097e-5
4	1.5606c+0	1 5591e+0	1.5450e+0	1 4112e+0		1 1536e+0	1.0430c+0	9 4288c-1		7.7044c-1	6.9637e-1	6.2939c-1			0.34259992	2 0603e-1		2 6614e-2	9 5222e-3	5 5645e-5
5	1.5674c+0	1 5658e+0	1 5518e+0	1.4179e+0		1.1603e+0	1.0496e+0	9 4941c-1	8.5877e-1	7 7678c-1	7 0259e-1	6 3548e-1			0 34771661	2 1021e-1		2.7860e-2	1 0101e-2	6 2143e-5
	1 5696c+0	1 5681e+0	1.5540e+0	1.4202e+0		1 1625e+0	1.0518e+0	9 5160e-1	8 6094c-1	7 7892e-1	7 0470e-1	6 3755e-1			0.34951569	2 1173e-1		2 8401e-2	1.0375e-2	6 6232e-5
- 7	1 5704c+0	1 5688e+0 1 5691e+0	1.5548e+0 1.5550e+0	1 4209e+0		1 1633e+0	1.0525e+0	9 5234c-1	8.6168e-1	7 7965c-1	7 0542e-1	6.3826e-1			0.35014792	2.1228e-1		2 8624e-2	1 0497e-2	6 8633c-5
- 8	1.5707e+0 1 5707e+0	1 5691e+0	1.5551e+0	1 4212e+0 1 4213e+0		1.1635e+0 1.1636e+0	1.0528e+0 1 0529e+0	9 5260e-1 9 5269e-1	8.6194e-1 8.6202e-1	7 7990e-1 7.7999e-1	7 0567e-1 7 0576e-1	6 3851e-1 6 3859e-1			0.35037046 0.35044898	2.1247e-1 2 1254e-1		2 8714e-2 2 8749e-2	1 0549c-2 1 0570e-2	6 9959e-5 7 0655e-5
10	1.5708e+0	1 5692e+0	1.5551e+0	1.4213e+0		1.1637e+0	1.0529e+0	9 5272e-1	8.6202c-1	7.7999e-1 7.8002e-1			5.7785e-1		0.35044898	2 1257e-1		2.8762c-2	1.0578e-2	7 1004e-5
	1.5708e+0	1.5692e+0				1.1637e+0							5.7786c-1		0.35049204					7.1314c-5
	. 57000.10			421.5010	1.2001010			J.J21-40-1	3 020 /6-1	7.0005-1	/ 03000-1	9.300-6-1	3.770UE-1	4.75116-1	0.55045204	2.12000-1	7.02030-2	2.07/00-2	1.030-0-2	,.13170-3

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7. <u>Литература:</u> Hantush, Papadopulos, 1962; Hantush, 1964c.

Функция $M(u,\beta)$

Функция:
$$M(u,\beta) = \int_{0}^{\infty} \frac{\exp(-\tau)}{\tau} \operatorname{erf}(\beta\sqrt{\tau}) d\tau$$
, $M(u,\beta) = -M(u,-\beta)$.

Предельные значения функции: M(u,0) = 0; $M(0,\beta) = 2 \operatorname{arcsinh} \beta = 2 \ln \left(\sqrt{1+\beta^2} + \beta \right)$.

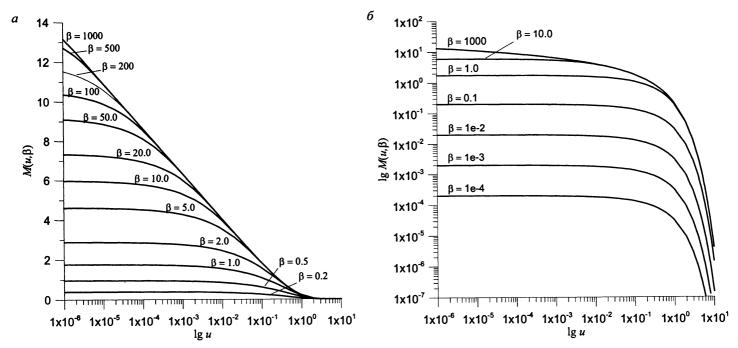


Рис. Π 24. Зависимость функции (a) и логарифма функции (b) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация [Hantush, 1961b]:

Диапазон	Зависимость
$u<\frac{0.05}{\beta^2}<0.01$	$M(u,\beta) = 2\left(\operatorname{arcsinh} \beta - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\beta\sqrt{u}\right)$
$u < \frac{0.5}{\beta^2}$	$M(u,\beta) = 2(\operatorname{arcsinh} \beta - \beta \operatorname{erf} \sqrt{u})$
$u > \frac{5}{\beta^2}$	$M(u,\beta)=W(u)$

Условные обозначения:

erf β – интеграл вероятностей (Приложение 4);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

Значения функции $M(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-6}\div 10.0$; $\beta=10^{-4}\div 3000.0$.

Значения функции $M(u, \beta)$ для аргумента $\beta = 0.0001 \div 2.6$

.\	0.0001	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
		4 2.00000e-3																				
1e-6	1.99774e	4 1.99774e-3	1.99771e-2	9 98455e-2	1.99442e-1	3.96929e-1	5.90669e-1	7.79168e-1	9 61295e-1	1.13630e+0	1.30375e+0	1.46353e+0	1.61570e+0	1.76049e+0	2.02924c+0	2.27280e-0	2.49436e+0	2.69682c+0	2.88276e+0	3.05436e+0	3.21346c+0	3.36162e+0
		4 1.99681e-3																				
3e-6	1.99609e	4 1.99609c-	1.99606e-2	9.97629e-2	1.99277e-1	3.96598e-1	5 90173e-1	7.78507e-1	9 60469e-1	1.13530e+0	1.30260e-0	1.46221e+0	1.61422e+0	1.75884c+0	2.02726e+0	2.27049e+0	2.49171e+0	2.69385e+0	2.87945e+0	3.05072e+0	3.20949e+0	3.35732e+0
4e-6	1.99549e	4 1.99549e-3	1.99545e-2	9.97327e-2	1.99217e-1	3.96478e-1	5.89992e-1	7.78265e-1	9.60167e-1	1.13494e+0	1.30217e+0	1.46173e+0	1.61367e+0	1.75823e+0	2.02653e+0	2.26965e+0	2 49075e+0	2.69276e+0	2.87824e+0	3 04939e+0	3.20804e+0	3.35575e+0
		4 1 99495e-3																				
	1.99447e	4 1.99447e-3	1.99444e-2	9.96820e-2	1.99115e-1	3.96275e-1	5.89688e-1	7.77859e-1	9.59660c-1	1.13433e+0	1 30146c+0	1.46091e+0	1.61276e+0	1.75722e+0	2 02531c+0	2.26823e+0	2.48912c+0	2.69093e+0	2.87622e+0	3.04716e+0	3 20561c+0	3.35311e+0
_7e-6	1.99403e	4 1.99403e-	1.99400e-2	9.96598e-2	1.99071e-1	3.96186e-1	5 89555e-1	7.77682e-1	9 59438e-1	1.13407e+0	1 30115e+0	1.46056e+0	1.61236e-0	1.75678e+0	2 02478e+0	2 26760e+0	2.48841c+0	2.69013e+0	2.87533e+0	3.04619e+0	3 20455e+0	3 35196e+0
_8e-6	1.99362e	4 1.99362e-3	1.99358e-2	9.96392e-2	1.99030e-1	3.96104e-1	5.89431e-1	7.77517e-1	9.59232e-1	1 13382e+0	1 30086e+0	1 46023e+0	1.61199e+0	1.75636e+0	2.02429e+0	2.26703e+0	2 48775e+0	2.68939e+0	2.87450e+0	3.04528c+0	3.20356e+0	3.35089e+0
9e-6	1.99323e	4 1.99323e-3	1.99320e-2	9.96199e-2	1.98991e-1	3.96026e-1	5 89315e-1	7.77363e-1	9.59039e-1	1.13359c+0	1 30059e+0	1 45992e+0	1.61164c+0	1.75598e+0	2.02382e+0	2 26649e+0	2.48713e+0	2.68870e+0	2.87373e-0	3.04443e+0	3.20263e+0	3.34988e+0
10-5	1.99286e	4 1.99286e-3	1.99283e-2	9.96016e-2	1.98955e-1	3.95953e-1	5.89205e-1	7.77216e-1	9.58855e-1	1.13337c+0	1 30034e-0	1 45963e+0	1.61131e+0	1.75561e+0	2 02338e+0	2.26597e+0	2 48655e+0	2 68804e+0	2.87300e+0	3.04362c+0	3.20175e+0	3.34893e+0
2e-5	1.98991e	4 1.98991e-	1.98987c-2	9.94538e-2	1.98659e-1	3.95362e-1	5 88318c-1	7.76034e-1	9.57377e-1	1.13159e+0	1 29827e+0	1.45726e+0	1.60865e+0	1.75265e+0	2.01984c+0	2.26183e-0	2.48182c+0	2 68272e+0	2.86709c+0	3 03712e+0	3 19465e+0	3.34125e+0
3e-5	1.98764e	4 1.98764e-3	1.98761e-2	9.93403e-2	1.98432e-1	3.94908e-1	5.87638e-1	7.75126e-1	9 56243e-1	1 13023e+0	1 29668e+0	1.45545e+0	1.60661e+0	1 75039e+0	2.01711c+0	2 25866e+0	2.47819e+0	2.67863c+0	2.86255c+0	3.03213e+0	3 18921e+0	3.33535e+0
40-5	1.98573e	4 1.98573e-2	1 98569e-2	9.92447e-2	1 98241e-1	3.94526e-1	5.87064c-1	7.74362e-1	9.55287e-1	1 12909e+0	1 29534e+0	1.45392e+0	1.60489e+0	1 74847c+0	2 01482e+0	2.25598c+0	2 47513e-0	2.67519e+0	2 85873e+0	3.02792e+0	3.18462e+0	3.33038e+0
	1.98404e	4 1.98404e-1	1.98401e-2	9.91605e-2	1 98072e-1	3.94189c-1	5.86559e-1	7.73688e-1	9.54445e-1	1 12808e+0	1.29416e+0	1.45257e+0	1.60337e+0	1.74679c+0	2 01280e+0	2 25362e+0	2 47244e-0	2 67216e+0	2.85536e+0	3 02422e+0	3.18058e+0	3.32600e+0
60-5	1.98252e	4 1.98252e-3	1.98249e-2	9.90844e-2	1.97920e-1	3.93884e-1	5.86102e-1	7 73078e-1	9 53683e-1	1.12716e+0	1 29310e+0	1.45135e+0	1.60200e+0	1.74527e+0	2 01097e+0	2.25149e+0	2 47000e-0	2.66942e+0	2 85231e+0	3.02087e+0	3.17692e+0	3.32204e+0
	1.98112e	4 1.98112e-	1.98109e-2	9.90143e-2	1.97780e-1	3 93604e-1	5 85682e-1	7.72518e-1	9.52983e-1	1.12632e+0	1 29212e+0	1 45023e+0	1 60074e+0	1 74387e-0	2 00929e+0	2.24953e+0	2 46776e-0	2 66690e+0	2.84951e+0	3.01778e+0	3.17356e+0	3.31840e+0
8e-5	1.97982e	4 1.97982e-3	1.97978e-2	9.89492e-2	1 97650e-1	3.93343e-1	5 85291c-1	7 71997e-1	9.52331e-1	1 12554c+0	1 29120e+0	1.44919e+0	1 59957e+0	1.74256e+0	2 00773e+0	2.24771e+0	2.46567e+0	2 66455e+0	2.84690e+0	3 01492e+0	3.17044e+0	3.31501e+0
9e-5	1 97859e	4 1.97859e-3	1.97856e-2	9.88879e-2	1.97527e-1	3 93098e-1	5.84923e-1	7.71507e-1	9 51719e-1	1.12480c+0	1 29035e+0	1 44821e+0	1.59847e+0	1 74134e+0	2 00626e+0	2 24599e+0	2 46371c+0	2 66235c+0	2.84445e+0	3 01222e+0	3.16750e+0	3.31183e+0
_le-4	1.97743e	4 1.97743e-3	1 97740e-2	9 88300e-2	1 97411e-1	3 92867e-1	5 84576e-1	7.71044e-1	9 51 140e-1	1 12411e+0	1 28954e+0	1 44728c+0	1 59742e+0	1 74018e-0	2 00487e+0	2.24437e+0	2 46186e+0	2 66026e+0	2 84214c+0	3 00968e+0	3 16472e-0	3.30882e+0
	1.96809e	4 1 96809e-3	1 96805e-2	19 83627e-2	1.96477e-1	3.90998e-1	5.81772e-1	7.67305e-1	9.46467e-1	1 11850e+0	1.28299e+0	1 43981e-0	1 58901e+0	1 73083e+0	1 99365e+0	2.23129e+0	2 44691e+0	2.64344e+0	2.82345e+0	2 98912e+0	3 14229e+0	3.28452e+0

M	0.0001	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
3e-4 1	.96092e-4	1.96092e-3	1.96088e-2	9.80042e-2	1.95760e-1	3.89563e-1	5.79621e-1	7.64437e-1	9.42882e-1	1.11420e+0	1.27797e+0	1.43407e+0	1.58256e+0	1.72366e+0	1.98505e+0	2.22125e+0	2.43544e+0	2.63054e+0	2.80911e+0	2.97335e+0	3.12509e+0	3.26589e+0
4e-4 1	.95487e-4	1.95487e-3	1.95484e-2	9.77019e-2	1 95155e-1	3.88354e-1	5.77807e-1	7.62019e-1	9 39859e-1	1.11057e+0	1.27374c+0	1.42923e+0	1.57712e+0	1 71762e+0	1.97779e+0	2 21279c+0	2.42577e+0	2.61966e+0	2.79703e+0	2.96006e+0	3.11059e+0	3.25019e+0
5e-4 1	.94955e-4	1.94955e-3	1.94951e-2	9.74357e-2	1.94623e-1	3.87289e-1	5.76210e-1	7.59889e-1	9.37197e-1	1 10738c+0	1.27002e+0	1.42497c+0	1.57233c+0	1.71230e-0	1.97141e+0	2 20534c+0	2 41725e-0	2.61008e+0	2.78638e+0	2.94835e+0	3 09782c+0	3.23635e+0
6e-4	.94473e-4	1.94473e-3	1.94470e-2	9.71950e-2	1.94141e-1	3 86327e-1	5.74766e-1	7.57964e-1	9.34790e-1	1.10449e+0	1 26665e+0	1 42112e+0	1.56800c+0	1.70748e+0	1 96563e-0	2.19860e+0	2 40955e+0	2.60142e+0	2.77676e+0	2.93777c+0	3 08628e+0	3.22385e+0
7e-4 1	.94031e-4	1.94031e-3	3 1.94027e-2	9.69737e-2	1.93699e-1	3 85441e-1	5 73438e-1	7.56193e-1	9.32577e-1	1 10183e-0	1 26355e+0	1.41758c+0	1 56401e+0	1.70306e+0	1 96032c+0	2 19240e+0	2.40247e+0	2.59346e+0	2.76792e-0	2.92804c+0	3 07567e+0	3.21236e+0
8e-4	.93619e-4	1 93619e-3	1.93615e-2	9.67677e-2	1 93287e-1	3 84618e-1	5 72202e-1	7 54546e-1	9 30517e-1	1 09936e+0	1 26067e+0	1.41429e+0	1 56031e+0	1.69894c+0	1.95538c-0	2.18664e+0	2 39589e+0	2 58605e+0	2.75969e+0	2.91899c+0	3.06580e+0	3.20167e+0
9e-4 1	.93232e-4	1.93232e-3	3 1.93228e-2	9.65743e-2	1 92900e-1	3.83844e-1	5.71042e-1	7.52998e-1	9.28583e-1	1.09704c+0	1.25796e+0	1.41119e+0	1.55682e+0	1.69507e+0	1.95074c+0	2.18123e+0	2.38970e+0	2.57909e+0	2.75196e-0	2.91049c+0	3.05653e+0	3.19163e+0
				9.63913e-2																		
2e-3 1	.89914c-4	1.89914c-3	1.89911e-2	9.49155e-2	1.89582c-1	3.77209e-1	5.61089e-1	7.39729e-1	9.11997e-1	1 07714e+0	1.23474e+0	1 38466e+0	1.52698e-0	1 66191e+0	191096c+0	2.13482e+0	2 33669c+0	2 51947e+0	2.68573e+0	2.83767c+0	2.97713c+0	3.10565e+0
3e-3	.87652e-4	1.87652e-3	3 1 87648e-2	9 37842e-2	1 87320e-1	3.72684e-1	5 54302e-1	7.30680e-1	9.00687e-1	1.06357e-0	1.21891e+0	1.36657e+0	1.50663e+0	1.63930e+0	1 88384e+0	2.10320e+0	2.30056e+0	2.47885e+0	2.64063c+0	2.78809c+0	2.92308e+0	3.04715e+0
				9.28314e-2																		
5e-3	.84069c-4	1.84069e-3	3 1.84066e-2	9.19928c-2	1.83737e-1	3.65519e-1	5 43555e-1	7 16352e-1	8.82779e-1	1.04208e+0	1.19385e+0	1.33793e+0	1 47442e+0	1 60352e+0	1 84093e+0	2.05317e+0	2.24343e+0	2.41464c+0	2.56935e+0	2.70977e+0	2.83774c+0	2.95482e+0
6e-3 1	.82554c-4	1.82554c-3	1.82551e-2	9.12355e-2	1.82222e-1	3.62489e-1	5.39012e-1	7.10295e-1	8.75209e-1	1.03300e+0	1.18325e+0	1 32583e+0	1.46081e+0	1 58840e+0	1 82280e-0	2.03204e+0	2.21931e+0	2.38753e+0	2.53928c+0	2.67674c+0	2.80177c+0	2.91592e+0
7e-3 1	1.81163e-4	1.81163e-3	3 1.81159e-2	9.05397e-2	1.80831e-1	3.59707e-1	5.34838e-1	7.04730e-1	8.68255e-1	1.02466e+0	1.17352e+0	1.31471e-0	1.44830e+0	1.57452e+0	1 80615e+0	2.01264e+0	2.19716e+0	2 36266e+0	2.51169e+0	2.64645c+0	2.76878e+0	2.88026e+0
				8.98927e-2																		
				8.92857e-2																		
1e-2	.77507e-4	1.77507e-3	1.77504e-2	8.87121e-2	1.77176e-1	3.52397e-1	5.23875e-1	6.90116e-1	8.49992e-1	1.00275e+0	1.14797e+0	1 28552e+0	1.41548e+0	1 53807e+0	1 76246e+0	1 96175e+0	2.13910e+0	2.29746e+0	2.43940c+0	2.56712e+0	2.68246e+0	2.78701c+0
				8.41065e-2																		
				8.06081e-2																		
4e-2	1.55459e-4	1.55459e-	3 1.55456e-2	7.76884e-2	1 55130e-1	3.08315e-1	4 57777e-1	6.02034e-1	7.39965e-1	8 70829e-1	9 94219e-1	1.11001e+0	1.21829e+0	1.31929e+0	1 50081e+0	1 65770e+0	1 79320e+0	1.91031e+0	2.01169e+0	2 09958e+0	2 17590e+0	2.24226e+0
5e-2	1.50366e-4	1.50366e-3	3 1.50363e-2	7.51417e-2	1.50037e-1	2 98134e-1	4 42517e-1	5.81708e-1	7.14593e-1	8 40431e-1	9.58824e-1	1.06965e+0	1 17300e+0	1.26910e+0	1 44098e+0	1 58842e+0	1.71472e-0	1.82289e+0	1.91560e+0	1.99514c+0	2.06342e+0	2.12209e+0
6e-2	1.45807e-4	1.45807e-3	3 1.45804e-2	7 28623e-2	1 45479e-1	2.89022e-1	4.28863e-1	5.63525e-1	6 91901e-1	8.13256e-1	9 27195e-1	1.03360e+0	1 13257e-0	1.22433e-0	1.38768c+0	1.52682e+0	1.64505e-0	1 74544c+0	1.83068e+0	1.90306e+0	1.96452e+0	2.01672e+0
7e-2	1.41656e-4	1.41656e-3	3 1.41653e-2	7.07870e-2	1 41329e-1	2.80728e-1	4.16435e-1	5.46980e-1	6.71260e-1	7 88545e-1	8.98445e-1	1.00085e+0	1.09585e+0	1.18371e+0	1.33938e+0	1.47108e+0	1 58214e+0	1 67565e+0	1.75432e+0	1.82047e+0	1.87605e+0	1.92271e+0
8e-2 1	137831e-4	1.37831e-3	3 1.37828e-2	6.88747e-2	1 37505e-1	2.73086e-1	4 04986e-1	5.31741e-1	6 52254e-1	7.65800e-1	8 71995e-l	9 70731e-1	1.06211e-0	1 14639e-0	1 29508e+0	1.42004c+0	1.52464e+0	1.61199c+0	1 68483e+0	1.74547c+0	1.79591e-0	1.83778e+0
9e-2 1	34275e-4	1.34275e-3	3 1.34271e-2	6.70965e-2	1.33949e-1	2.65981e-1	3 94343e-1	5.17579e-1	6.34596c-1	7.44676e-1	8 47439e-1	9 42785e-1	1 03082e+0	1 11181e+0	1 25408e-0	1 37288e+0	1.47160e+0	1.55339e+0	1.62099e+0	1.67675c-0	1 72264c+0	1.76033e+0
1e-1	30944e-4	1.30944e-3	3 1.30941e-2	6.54314e-2	1 30620e-1	2.59328e-1	3.84380e-1	5.04324e-1	6.18074e-1	7 24918e-1	8 24482e-1	9.16672c-1	1.00160e+0	1 07953e+0	1 21586e+0	1 32899e-0	1 42234e+0	1 49906e+0	1.56193e+0	1.61331e+0	1.65517e+0	1.68917e+0
2e-1	1.05418e-4	1.05418e-3	3 1.05415e-2	5.26698e-2	1.05106e-1	2.08375e-1	3 08136e-1	4 03010e-1	4.91981e-1	5.74406e-1	6 49975e-1	7.18653e-1	7.80613e-1	8 36167e-1	9.29718e-1	1.00294e+0	1 05948e+0	1.10265e+0	1 13525e+0	1.15962e+0	1.17766e+0	1.19087e+0
3e-1 8	3.77156e-5	8.77156e-	4 8 77126e-3	4.38205e-2	8 74183e-2	1.73087e-1	2 55421e-1	3.33124e-1	4.05261e-1	4.71263e-1	5.30888e-1	5.84166e-1	6.31320e-1	6 72712c-1	7.40014e-1	7.89906e-1	8 26117e-1	8 51899e-1	8 69924c-1	8 82304c-1	8.90656e-1	8.96191e-1
4e-1	7.42187e-5	7.42186e-4	4 7.42158e-3	3.70740e-2	7.39370e-2	1.46218e-1	2.15349e-1	2.80122e-1	3.39683e-1	3.93539e-1	4.41514e-1	4.83694e-1	5.20351e-1	5 51882e-1	6 01458e-1	6.36337e-1	6 60176e-1	6 76037e-1	6 86321e-1	6.92822e-1	6 96827e-1	6 99233e-1
5e-1 (5.34621e-5	6.34621e-4	4 6.34594e-3	3.16977e-2	6.31965e-2	1.24833e-1	1.83508e-1	2.38102e-1	2.87843e-1	3.32308e-1	3.71384e-1	4.05205e-1	4.34081c-1	4.58432e-1	4.95492e-1	5.20265e-1	5 36229e-1	5.46166c-1	5 52147e-1	5.55631e-1	5.57593e-1	5.58662e-1
6e-1	5.46643e-5	5.46643e-4	4 5.46618e-3	2.73008e-2	5.44147e-2	1.07365e-1	1.57542e-1	2 03914c-1	2.45785e-1	2.82799e-1	3.14898c-1	3.42256e-1	3 65212e-1	3.84198e-1	4.12185e-1	4.29974e-1	4 40790e-1	4.47094e-1	4 50620e-	4.52512e-1	4.53488e-1	4.53970e-1
7e-1 4	173447e-5	4.73447e-4	4 4 73424e-3	2.36430e-2	471109e-2	9 28513e-2	1.36003e-1	1.75617e-1	2.11072e-1	2.42072e-1	2 68606e-1	2.90883e-1	3.09256c-1	3 24164c-1	3 45459e-1	3 58338e-1	3 65730e-1	3.69766e-1	3.71864e-1	3 72903e-1	3.73393e-1	3.73613e-1
8e-1 4	4.11806e-5	4.11806e-4	4 4 11784c-3	2.05629e-2	4.09622e-2	8.06451e-2	1.17918e-1	1.51911c-1	1 82071c-1	2.08157e-1	2 30200e-1	2.48431e-1	2 63214e-1	2 74983e-1	2.91282e-1	3 00665e-1	3 05751e-1	3.08354e-1	3 09612e-	3.10187e-1	3.10435e-1	3.10536e-1
9e-1 3	3.59425e-5	3.59425e-	4 3.59404c-3	1.79457e-2	3.57388e-2	7.02861e-2	1.02595e-1	1.31869e-1	1.57620e-1	1.79655e-1	1.98039c-1	2 13019c-1	2.24964c-1	2.34297e-1	2.46831e-1	2 53701e-1	2.57220e-1	2.58907e-1	2 59666e-	2.59987e-1	2.60113e-1	2.60160e-1
1e+0 :	3.14598e-5	3.14598e-	4 3 14579e-3	1.57061e-2	3 12703e-2	6.14330e-2	8.95197e-2	1 14806c-1	1 36859e-1	1.55531e-1	1.70913e-1	1 83264e-1	1 92949e-1	2 00376e-1	2.10052e-1	2 15103e-1	2 17548c-1	2 18648e-1	2.19108e-	2.19288e-1	2.19352e-1	2.19374e-1
2e+0 9	9 10005e-6	9.10004e-	5 9.09918c-4	4.53916e-3	9.01372e-3	1 75284c-2	2 51330e-2	3 15650e-2	3.67279e-2	4 06698e-2	4.35393e-2	4 55352e-2	4 68639e-2	4 77119e-2	4 85371e-2	4 88042e-2	4.88784c-2	4 88961e-2	4 88998e-2	4.89004c-2	4.89005e-2	4 89005e-2
3e+0 2	2 86118e-6	2.86117e-	5 2.86080c-4	1.42595e-3	2.82443e-3	5.43883e-3	7 68093c-3	9 46542e-3	1 07864e-2	1.16981e-2	1 22862e-2	1 26414e-2	1.28428c-2	1 29501e-2	1 30294e-2	1 30454e-2	1 30480e-2	1 30483e-2	1.30484e-2	1 30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2
40+0	9.35547e-7	9.35545e-	6 9.35394c-5	4.65864c-4	9.20441e-4	1.75553e-3	2 44358e-3	2.95927e-3	3 31167e-3	3 53177e-3	3 65771e-3	3 72389e-3	3.75588e-3	3 77013e-3	3 77822e-3	3.77925e-3	3 77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3
5e+0 3	3.13080c-7	3.13080e-0	6 3 13019e-5	1.55770e-4	3 07003c-4	5.80057c-4	7.96268c-4	9 48948c-4	1.04532e-3	1 09983e-3	1 12752e-3	1 14019e-3	1 14542e-3	1 14736e-3	1 14822e-3	1 14829e-3	1 14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1.14830e-3
6e+0	1.06401e-7	1.06401c-	6 1.06376e-5	5.28945e-5	1.03991e-4	1 94675c-4	2.63700e-4	3.09641e-4	3 36439e-4	3 50172e-4	3 56371c-4	3 58841c-4	3.59712e-4	3 59984e-4	3 60077e-4	3.60082e-4	3 60082e-4	3 60082e-4	3 60082e-	3 60082e-4	3.60082e-4	3.60082e-4
7e+0	3.65621e-8	3.65620e-	7 3.65524e-6	1.81607e-5	3 56167e-5	6.60715e-5	8.83599e-5	1.02346e-4	1 09887e-4	1 13391e-4	1 14797e-4	1 15285e-4	1.15432e-4	1 15471e-4	1.15481c-4	1 15482e-4	1 15482e-4	1 15482e-4	1 15482e-	1 15482e-4	1.15482e-4	1 15482e-4
8e+0	1.26685e-8	1.26685e-	7 1.26647e-6	6 28732e-6	1 23005e-5	2.26148e-5	2.98739e-5	3 41695e-5	3 63116e-5	3 72142e-5	3 75362e-5	3 76338e-5	3 76589c-5	3 76644e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656c-5	3.76656e+	3 76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5
90+0	4 41810e-9	4 41808e-	8 4.41663e-7	2.19086c-6	4.27580e-6	7.79204e-6	1.01723e-5	1 15009e-5	1 21138e-5	1.23481e-5	1 24224e-5	1 24421e-5	1.24464c-5	1 24472c-5	1 24474e-5	1.24474e-5	1 24474c-5	1 24474e-5	1 24474e-	1.24474e-5	1 24474e-5	1 24474e-5
10.1	1 548840	1.54884c-	8 1.54828c-7	7.67407e-7	1.49409e-6	2 69918c-6	3.48391c-6	3 89718e-6	4 07360e-6	4 13480c-6	4.15209e-6	4 15608e-6	4 15684c-6	4 15695e-6	4 15697e-6	4 15697c-6	4 15697c-6	4 15697c-6	4 156970-4	4 156976-6	4.15697e-6	4 15697e-6

Значения функции $M(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 2.8 \div 7.0$

•	(2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0
						3.98567e-0																	
						3 97755e-0																	
						3.97418c-0																	
						3.97160e-0																	
						3.96942e+0																	
						3 96751e+0																	
						3.96577c+0																	
						3.96418e-0																	
						3.96269e+0																	
90	-6 3.	48750e-0	3.61658e+0	3 73806e+0	3 85274e+0	3 96130e+0	4 06433e+0	4 16234e-0	4 25579€+0	4 34505e+0	4 43049e+0	4 51239c+0	4 59103e-0	4 66665e+0	4 73946c+0	4 80967e+0	4 87744c-0	4 94294e+0	5 00630e+0	5.06766e-0	5.12713e+0	5.18483e-0	5.24085e+0

N	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0
1e-5	3.48648c+0	3.61548c+0	3.73689e+0	3.85149e+0	3.95998e+0	4.06294e+0	4.16088e+0	4.25425e+0	4.34344c+0	4.42880c+0	4.51063e+0	4.58920e+0	4.66474e+0	4.73749e+0	4 80762e+0	4 87532e+0	4.94074e+0	5 00403e+0	5.06532e+0	5.12472e+0	5.18234e+0	5.23829e+0
2e-5	3.47820 c+ 0	3 60662e+0	3.72743e+0	3.84145e+0	3.94934e+0	4.05171e+0	4.14906e-0	4.24184c+0	4.33044e+0	4.41521e-0	4 49644c+0	4.57442e+0	4 64937e+0	4.72153e+0	4.79107e+0	4.85818e+0	4.92301c+0	4.98571e+0	5.04640e+0	5.10521e+0	5.16224e+0	5.21760e+0
3e-5					3.94118e+0																	
4e-5					3.93429e+0																	
					3.92823e+0																	
					3.92275e+0																	
					3.91771e+0																	
					3.91302e+0																	5.14701c+0
					3.90861c+0																	
					3.90444e+0																	
					3.87082e+0 3.84503e+0																	
					3.82330e+0																	
					3.80417e+0																	
					3.78688e+0																	
					3.77099e+0																	
80-4	3.32790e+0	3.44560c+0	3.55571~0	3 659010+0	3.75621e+0	3.847870	3 934530-0	4.035636-0	4.00454cu0	4.168640-0	4.23000c+0	4.326510-0	4 370810-0	4.432320-0	4.4912200	4 5/1590-0	4.020376-0	4.653970-0	4.730130+0	4.779100+0	4.820400+0	4.8/1900+0
9e-4	3.31710e+0	3.43403c+0	3.54336e+0	3.64590c+0	3.74233e+0	3.83323e+0	3.91913e+0	4.00046e+0	4.077626+0	4.15095e+0	4.23726c-0	4.300310-0	4 35085c+0	4 411600-0	4.469740+0	4 525470+0	4 57892~0	4.63025040	4.704000-0	4.732200-0 4.737040-0	4.77274a+0	4.845486+0
					3.72921e+0																	
					3.62362e+0																	
					3.54303e+0																	
					3.47545e+0																	
					3.41623e+0																	
					3.36296e+0																	
7e-3	2.98219 c+ 0	3.07567e+0	3.16166e+0	3.24095e+0	3 31424c+0	3.38212e+0	3.44510e+0	3.50365e+0	3.55816e+0	3 60897e+0	3.65640c+0	3.70073e+0	3.74219e+0	3.78101e-0	3.81739e+0	3.85151e+0	3.88353e+0	3.91359e+0	3.94184e+0	3.96840e+0	3.99337e+0	4.01686c+0
8e-3	2.94666c+0	3.03771c+0	3.12129e+0	3.19820c+0	3.26912e+0	3.33466e+0	3.39534e+0	3.45161e+0	3.50386e+0	3.55245e+0	3.59769c+0	3.63985e+0	3.67919e+0	3.71591e+0	3.75023e+0	3.78232e+0	3.81234e+0	3 84045e+0	3.86678c+0	3.89144c+0	3.91457e+0	3.93625e+0
					3.22697e+0									3.65539e+0	3.68783e+0	3.71807e+0	3.74629e+0	3.77263e+0	3.79722e+0	3 82019e+0	3.84166e+0	3.86172e+0
1e-2	2.88206e+0	2.96874e+0	3.04798c+0	3 12061e+0	3.18730e+0	3.24867e+0	3.30523e+0	3.35743e+0	3 40569e-0	3 45034e-0	3.49171c+0	3.53006e+0	3.56566e+0	3.59871e+0	3.62943e+0	3.65799e-0	3.68456e+0	3.70929e+0	3.73231c+0	3.75374c+0	3.77371c+0	3.79231c+0
					2.87557e+0																	
3e-2	2.44979e+0	2.50882e+0	2.56104c+0	2.60728e+0	2.64824c+0	2.68457e+0	2.71678e+0	2.74535c+0	2.77069e-0	2.79316c+0	2 81309e+0	2.83074e+0	2.84637e+0	2 86021e+0	2 87245e+0	2 88326e+0	2.89280c+0	2.90122e+0	2.90863e+0	2.91516e+0	2.92089e+0	2.92593c+0
4e-2	2.30002e+0	2.35034e+0	2.39421e+0	2.43245e+0	2.46579e+0	2.49487e+0	2 52020e+0	2.54226e-0	2.56147e+0	2.57817e+0	2.59267e+0	2.60526e+0	2 61616e+0	2.62560e+0	2.63375e+0	2.64078c+0	2.64684c+0	2.65205e+0	2.65652e+0	2.66034c+0	2 66361c+0	2.66641e+0
5e-2	2.1/250e+0	2.21584e+0	2.25308e+0	2.28507e+0	2.31254e+0	2.33610e+0	2.35628e+0	2.37355e+0	2.38830e+0	2.40089e+0	2.41161e+0	2.42072e+0	2.42844c+0	2.43498e+0	2.44051e+0	2.44516e+0	2.44907c+0	2 45235e+0	2.45509e+0	2.45738c+0	2.45928c+0	2.46086e+0
9e-2	1.061026+0	2.098616+0	2.1304/6+0	2.13/436+0	2.18026e+0	2.199516+0	2.215/36+0	2.22938e+0	2.24082e+0	2.25041e+0	2.25841e+0	2.26507e+0	2.27060e+0	2.27519e+0	2.27897e+0	2.28209e+0	2.28464e+0	2 28673e+0	2.28844c+0	2.28982e+0	2.29094c+0	
					2.06397e+0																	2.14909e+0
8e-2	1.8/2486+0	1.901186+0	1.9248/6+0	1.944306+0	1.96037e+0	1.973466+0	1.984136+0	1.992816-0	1.999846+0	2.005516+0	2.01006e+0	2.01370e+0	2.01660e-0	2.01891e+0	2 02072e-0	2 02215e+0	2 02327e+0	2.02414e+0	2.02481e+0	2 02533e+0	2.02573e+0	2.02604e+0
10-1	1.791200+0	1.010426+0	1.83090e+0	1.771100.0	1 86712e+0 1.78250e+0	1.8//986+0	1.70960-0	1.8936/6+0	1.899226+0	1.90361640	1 90/0/c+0	1.909/8e-0	1.91190e+0	1 913546+0	1 91481e-0	1.91579e+0	1 91654c+0	1.91710e+0	1.91753e+0	1.91785e+0	1 91809e+0	1.91827e+0
20-1	1.71071c+0	1.730730-0	1.730800-0	1 215560-0	1.21791e+0	1.791530-0	1.770610-0	1.304316-0	1.000/00-0	1.012120-0	1 22222- 0	1.810/96+0	1.818340+0	1.819526+0	1.820416-0	1 821086+0	1.821586+0	1.821936+0	1.822220+0	1.822426+0	1.822576+0	1.822676+0
30-1	8 99792e-1	9.02091e-1	9.03532e-1	9.04418e-1	9.04952e-1	9.05267c-1	9.05450e-1	9.05554c-1	9.056116-1	9.05642c-1	9.05659e-1	0.05668a.1	0.056720.1	0.05675= 1	0.05676- 1	0.05676-1	0.05676-1	0.05677a 1	0.05677a 1	0.05677- 1	0.05677- 1	0.05677- 1
4e-1	7.00640e-1	7.01443e-1	7.01888e-1	7.02128e-1	7.02255e-1	7.02319c-1	7.02351e-1	7 02367c-1	7 02374c-1	7.02378e-1	7.03379e-1	7 02380e-1	7 02380-1	7.03390e 1	7.03370e-1	7.033706-1	7.03070c-1	7.033776-1	7.02280e-1	7.03390-1	7.033776-1	7.033776-1
5e-1	5.59225e-1	5.59512e-1	5.59653e-1	5.59720e-1	5.59750e-1	5.59764e-1	5.59770e-1	5.59772e-1										5.59774e-1				
					4.54375e-1					4 54379e-1	4 54379e-1	4 54380e-1	4 54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4 54380e-1	4.54380e.1	4 54380e.1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1
7e-1	3.73707e-1	3.73746e-1	3.73761e-1	3.73766e-1	3.73768e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3 73769e-1	3.73769e-1	3 73769c-1	3 73769c-1	3 73769e-1	3.73769e-1	3 73769e-1	3 73769e-1	3.73769c-1	3 73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3 73769c-1
8e-1	3.10575e-1	3.10589e-1	3.10594e-1	3.10596e-1	3.10596e-1	3.10597e-1	3.10597e-1	3.10597e-1	3.10597e-1	3 10597e-1	3.10597e-1	3.10597e-1						3.10597e-1				
					2.60184e-1																	
1e+0	2.19381e-1	2.19383e-1	2.19384c-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2 19384c-1	2.19384c-1	2.19384c-1	2.19384e-1						2.19384e-1				
2e+0	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4 89005e-2	4 89005e-2	4.89005e-2	4 89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2						4.89005e-2				
3e+0	1.30484c-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1 30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2						1.30484e-2				
4e+0	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3				3.77935e-3				
5e+0	1.14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1.14830c-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1 14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1 14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3						1.14830e-3				
6e+0	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082c-4	3.60082c-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3 60082e-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3 60082e-4	3 60082e-4				3.60082e-4				
7e+0	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1 15482e-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4
8e+0	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3.76656c-5	3 76656e-5	3 76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3 76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5
9e+0	1.24474c-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1 24474e-5	1 24474c-5	1 24474e-5	1.24474e-5	1.24474c-5	1.24474c-5	1 24474c-5	1.24474c-5	1.24474c-5	1.24474e-5	1 24474c-5	1.24474c-5	1 24474c-5	1.24474e-5	1.24474c-5	1.24474e-5
1e+1	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4 15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697c-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6							

Значения функции $M(u,oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta}=7.2\div28$

\sim	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	9.0	9.2	9.4	9.6	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	5.34403e+0	5.39832e+0	5.4511904	0 5.50271e+0	5.552940+0	5 60196e+0	5 64981e+0	5 696550+0	5 786890+0	5.8305800	5 873350-0	5 915220	5 096454+0	6 35957040	6 666960-0	6 9334200	7 168580-0	7 37901-0	7 569410.0	7 743270	7 002220-0	
			5.43404e+				5.63085e+0															
2e-6	5.32105e+0	5.37471e+0	5.42694e+0	5.47782e+0		5.57579e+0										6.88236e+0						
				0 5.47222e+0			5.61697e+0	5.66293e+0	5.75171e+0	5.79462e+0	5 83661c+0	5 87770e+0	5.95736c+0	6.31267e+0	6 61224e+0	6 87089c+0	7.09823e+0	7.30084e+0	7.48343e+0	7.64948e+0	7 80162e+0	7.94192c+0
				5.46751c+0			5.61189e+0															
	5.30770e+0						5.60742e+0															
			5.40918e+0			9100000	5.60337e+0															
	5.30104e+0 5.29808e+0					5.55300e+0		5.64520e+0	5.73315e+0	5.77565e+0	5.81723e+0	5.85791e+0	5.93674e+0	6.28793e+0	6.58338e+0	6.83791e+0	7.06113c+0	7.25963e+0	7.43810e+0	7.60003e+0	7.74807c+0	7.88426c+0
80-0			5.40268e+	0 5.45292e+0 0 5.44991e+0	5.50188c+0	5.549626+0	5.59619e+0 5.59294e+0	5 641630+0	5.729440+0	5.77186e+0	5 81335e-0	5.85395e+0	5.93262e+0	6 28298e+0	6 57761e+0	6.83132c+0	7.05372e+0	7.25139e+0	7.42904e+0	7.59015e+0	7.73737e+0	7.87274e+0
104	5.29265e+0						5.58986e+0															
2e-5	5.27138e+0			0 5.42400e+0		5.51921e+0	5.56504e+0	5.60976e+0	5.69607c+0	5.73775e+0	5 77850c+0	5.818360+0	5 89554~0	6.273936+0	6 525720+0	6 772030+0	6 98705c+0	7 17734c+0	7.41249C+0	7.501366+0	7.717626+0	7.7692400
3e-5	5.25505e+0	5.30687e+0	5.35727e+	0 5.40632e+0			5.54600e+0															
4e-5	5.24129e+0	5.29273c+0	5.34275e+	0 5.39141e+0	5.43879e+0	5.48496e+0	5.52995e+0	5.57384e+0	5.65848e+0	5 69932e+0	5.73924c+0	5.77826e+0	5.85378e+0	6.18841e-0	6.46731e+0	6 70532e+0	6.91204e+0	7 09406e+0	7.25608e+0	7.40160e+0	7.53324e+0	7.65309e+0
5e-5			5.32995e+		5.42533e+0	5.47116e+0	5.51582e+0	5.55937c+0	5.64334e+0	5.68384e+0	5.72342e+0	5.76211e+0	5.83696e+0	6.16823e+0	6 44379c+0	6.67847e+0	6.88186e+0	7.06057e+0	7.21929e+0	7.36151e+0	7.48988c+0	7.60647e+0
6e-5	5.21822e+0						5.50304e+0															
70-5				0 5.35551e+0			5.49129e+0															
				0 5.34536e+0			5.48036e+0															
	5.18997e+0						5.47010e+0															
	5.11452e+0			0 5.32681e+0 0 5.25412e+0			5.46039e+0															
3e-4				0 5.19847e+0			5.38215e+0 5.32227e+0															
	5.01985e+0						5.27190e+0															
				0 5.11049e+0		5 189770+0	5.22764e+0	5.26441000	5 33483000	5 368570-0	5.401300-0	5.483730+0	5.40469- 0	5.821436+0	5.040376+0	6.219426-0	6.30/080+0	6.492026+0	6.499010.0	6.56020-0	6.703480+0	6.829396+0
	4.94747e+0						5.18772e+0															
7e-4	4.91595e+0	4.95845e+(4.99954e+	0 5.03928e+0			5.15110e+0															
8e-4	4.88667e+0	4.92838e+0	4.96868c+0	0 5.00763e+0			5.11710e+0															
9e-4	4.85922e+0	4.90019e+0	4.93975e+0	0 4 97797c+0			5.08524e+0															
1e-3	4.83331c+0	4.87358e+0	4.91244c+	0 4.94997c+0	4.98623e+0	5.02128e+0	5.05518e+0	5.08799e+0	5.15051e+0	5.18032e+0	5.20922e+0	5.23725e+0	5.29082e+0	5.51682e+0	5 68918e+0	5.82299e+0	5.92810e+0	6.01131e+0	6.07750e+0	6.13030e+0	6.17246e+0	6.20613e+0
2e-3	4.62606e+0	4 66088e+0	4 69430e+	0 4.72642e+0	4.75729e+0	4.78698e+0	4.81555e+0	4.84304e+0	4.89503e+0	4.91962e+0	4.94331c+0	4.96617e+0	5.00949e+0	5 18607e+0	5.31235e+0	5.40368c+0	5.47007e+0	5.51838e+0	5.55346e+0	5.57883e+0	5.59706c+0	5.61007e+0
_3e-3	4.46988c+0	4.50073e+0	4.53022e+	0 4.55843e+0	4.58542e+0	4.61127e+0	4.63602e+0	4.65973e+0	4.70425e+0	4.72515e+0	4.74520e+0	4.76443e+0	4.80062e+0	4.94369c+0	5.04019e+0	5.10558c+0	5.14981e+0	5.17954c+0	5.19935e+0	5.21239c+0	5.22086e+0	5.22629e+0
40-3	4 34051e+0	4.36820e+(4.39456e+	0 4.41967e+0	4.44360e+0	4.46641e+0	4.48816e+0	4.50891c+0	4.54761e+0	4.56566e+0	4.58288c+0	4.59934e+0	4.63007e+0	4.74813e+0	4.82347e+0	4.87142c+0	4 90168c+0	4.92052e+0	4.93205e+0	4.93898c+0	4.94306c+0	4.94541c+0
				0 4.29984e+0																		
<u> </u>	4.1289/c+0	4.151/50+0	4.1732864	0 4.19363e+0	4.2128/6+0	4.2310/e+0	4.248296+0	4.26458e+0	4.29458e+0	4.30839e+0	4 32145e+0	4.33382e+0	4.35662e+0	4 43958c+0	4.48717c+0	4.51402e+0	4.52882e+0	4 53676e+0	4.54087e+0	4.54294c+0	4.54394e+0	4.54441e+0
				0 4.09783e+0 0 4.01036e+0																		
				0 3.92972e+0			4.05481e+0 3.97001e+0															
				0 3.85486e+0			3 89145e+0															
2e-2			3 29614e+				3.31749e+0															
3e-2	2.93034e+0	2.93420e+0	2.93758e+	0 2.94053e+0			2.94727e+0															
4e-2	2.66878c+0	2.67080e+0	2.67251e+	0 2.67396e+0			2.67708e+0															
5e-2				0 2.46485e+0			2.46632e+0														2.46790c+0	
6e-2				0 2.29399e+0			2.29469c+0															
_7e-2			2.15006e+				2 15059e+0															
8e-2			2 02657e+0				2.02684e+0															
				0 1.91862e+0			1.91870e+0															
				0 1.82287e+0 0 1.22265e+0			1.82291e+0														1.82292e+0	
				1 9.05677e-1		0.05677a.1	1.22265e+0 9 05677e-1	0.05677-1	0.056776.1	0.05677- 1	0.05677- 1	0.05677-1	0.05677-1	1 22265c+0	1.22265e+0							
				1 7 02380e-1														9 05677e-1 7 02380e-1				
			5.59774e-				5 59774e-1											5 59774e-1				
6e-1			4.54380e-				4.54380e-1											4 54380e-1				
				1 3.73769e-1			3.73769e-1											3 73769e-1				
				1 3.10597e-1											3.10597e-1		3 10597e-1				3.10597c-1	
				1 2.60184e-1											2 60184c-1			2.60184e-1				2.60184e-1
1e+0	2.19384c-1	2.19384e-1	2.19384e-	1 2.19384e-1	2.19384c-1	2.19384c-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2 19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2.19384c-1	2 19384e-1					2 19384e-1				
2e+6	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-	2 4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4 89005e-2	4 89005e-2	4 89005e-2	4 89005c-2	4 89005e-2	4 89005e-2	4.89005e-2	4 89005e-2	4 89005c-2	4 89005e-2						4 89005e-2
				2 1.30484e-2																		
4e+0	3.77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-	3 3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3	3 77935e-3	3 77935e-3	3 77935e-3	3 77935e-3	3.77935e-3				

.\	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	9.0	9.2	9.4	9.6	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
																						1.14830e-3
																						3.60082e-4
7e+(1.15482e-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4																
																						3.76656e-5
																						1.24474e-5
1e+1	4.15697e-6	4 15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4 15697e-6	4.15697e-6													

Значения функции $M(u,oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta}=30\div72$

\sim	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72
				8.55372c+0																		
10-6	8.12155e+0	8.24605c+0	8.36273e+0	8.47249e+0	8.57607e+0	8.67411c+0	8.76715e+0	8.85566e+0	8.94003e+0	9.02062e+0	9.09773e+0	9 17165c+0	9.24261e+0	9.31082e+0	9.37649e+0	9.43977e+0	9.50083e+0	9.55982e+0	9.61684c+0	9.67204c+0	9.72550e+0	9.77733e+0
				8.43886e+0																		
				8.41306e+0																		
				8.39133e+0																		
				8.37218e+0																		
				8.35489e+0																		
				8.33899e+0																		
				8.32419e+0																		
				8.31030e+0																		
				8.29717e+0																		
				8.19143e+0																		
				8.11064e+0																		
				8.04283e+0																		
				7.98334e+0																		
				7.92978e+0																		
				7 88074c+0																		
8e-5	7.58849e+0	7.67814e+0	7.76011e+0	7.83529e+0	7.90445e+0	7.96821e+0	8 02713e+0	8.08168e+0	8 13227e+0	8.17926e+0	8 22296e-0	8 26365e+0	8.30158e+0	8 33697e-0	8.37001e+0	8.40089c+0	8.42976c+0	8 45678e+0	8.48207c+0	8.50575c+0	8.52794c+0	8 54874c+0
<u>9e-5</u>	7.55268e+0	7.64007e+0	7.71981c+0	7.79278c+0	7 85976e+0	7.92137e+0	7.97817e+0	8.03062e+0	8.07915c+0	8 12411e+0	8 16581e+0	8.20454e+0	8 24054e+0	8.27404c+0	8.30522e+0	8.33428e+0	8 36137e-0	8.38663e+0	8.41021e+0	8.43222c+0	8.45278e+0	8.47198c+0
_1e-4	7.51890e+0	7.60418e+0	7.68183e+0	7.75274e+0	7.81768e+0	7.87729e+0	7.93211e-0	7.98263e+0	8.02925e+0	8.07233c+0	8 11219e+0	8.14911c+0	8 18333e+0	8.21509c+0	8.24457e+0	8.27197e+0	8.29743e+0	8 32111e+0	8 34313e+0	8.36363e+0	8.38271e+0	8.40048c+0
				7.43645e+0																		
_3e-4	7.05025e+0	7.10800e+0	7.15877e+0	7 20347c+0	7 24290e+0	7.27771e+0	7.30846e-0	7.33564e+0	7 35967e+0	7.38092c+0	7 39970e-0	7.41629e+0	7.43095e+0	7 44389e-0	7 45530e-0	7.46537e-0	7 47423e-0	7.48202e+0	7.48888e-0	7.49489c+0	7.50017e+0	7.50479e+0
				7.01462e+0																		
				6.85440c+0																		
				6 71473e+0																		
				6.59073e+0																		
				6.47915e+0																		
				6.37772e+0																		
				6 28477e+0																		
				5.63330e+0																		
3e-3	5.22971c+0	5.23183e+0	5.23312e+0	5.23389e+0	5 23434e+0	5.23460e+0	5.23475e+0	5 23483e+0	5.23488e+0	5 23490e+0	5.23491e+0	5.23492e+0	5 23492e+0	5.23492e+0	5.23492e+0	5 23492e+0	5 23492e+0	5.23493e+0	5.23493e+0	5.23493e-0	5 23493c+0	5.23493e+0
				4.94804e+0																		
				4.72605e+0																		
				4.54476e+0																		
				4.39162c+0																		
				4 25908e+0																		
				4.14229e+0																		
				4 03793e+0																		
				3.35471e+0																		
3e-2				2.95912e+0																		
4e-2				2.68126e+0																		
				2 46790e+0																		
				2.29531e+0																		
7e-2				2.15084e+0																		
8e-2				2.02694e+0																		
9e-2				1 91874e+0																		
16-1	1.822 92e+ 0	1 82292e+0	11 82292e+0	1 82292e-0	1 82292e+0	1.82292e+0	1 82292e+0	1 82292e+0	1.82292e+0	1 82292e-0	1 82292e+0	1 82292e+0	1 82292e-0	1 82292e+0	1 82292e+0	1.82292e-0	1 82292e+0	1 82292e-0	1 82292e-0	1.82292e-0	1.82292e+0	1.82292e+0

N	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72
2e-1	1.22265	+0 1.22265e+	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1 22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e-0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0
3e-1	9.05677	e-1 9.05677e-	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9 05677e-1	9 05677e-1	9.05677e-1	9 05677e-1	9 05677e-1	9.05677e-1						
4e-1	7.02380	e-1 7.02380e-	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380e-1	7.02380c-1
5e-1	5.59774	e-1 5.59774e-	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1	5.59774e-1
6e-1	4.54380	e-1 4.54380e-	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380c-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4 54380e-1	4 54380e-1	4.54380e-1	4.54380c-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54380c-1	4.54380e-1	4.54380e-1
7e-1	3.73769	e-1 3.73769e-	3.73769c-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769c-1	3.73769e-1	3.73769e-1
		e-1 3.10597e-																				
9e-1	2.60184	e-1 2.60184e-	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2 60184e-1	2.60184e-1	2 60184c-1	2 60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1
		e-1 2.19384e-																				
		e-2 4.89005e-:																				
		e-2 1.30484e-																				
		e-3 3.77935e-:																				
		e-3 1.14830e-																				
		e-4 3.60082e-																				
		e-4 1.15482e-																				
		e-5 3.76656e- e-5 1.24474e-																				
		e-6 4.15697e-																				
16+1	4.1369/	e-oj 4.1369/e-	of 4.1369/6-0	1 4.1309/e-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-6	1 4.1309/e-6	4.1309/6-6	4.1309/6-6	4.1309/e-6	4.1309/e-6	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4 1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0	4.1309/6-0

Значения функции $M(u, \beta)$ для аргумента $\beta = 74 \div 3000$

.\	74	76	78	80	82	84	88	90	92	94	96	98	100	105	110	120	150	200	500	1000	1500	3000
- 0	9.99452e+0	1.00478e+1	1.00998e+1	1.01504e+1	1.01998e+1	1.02480e+1	1.03410e+1	1 03860e+1	1.04299e+1	1.04729e+1	1 05150e+1	1 05563e+1	1.05967e+1	1.06943c+1	1.07873e+1	1.09613e+1	1.14076e+1	1.19829e+1	1.38155e+1	1.52018e+1	1.60127e+1	1.73990e+1
1e-6	9.82762c+0	9.87644c+0	9.92389e+0	9.97001e+0	1.00149e+1	1.00586e+1	1.01426c+1	1.01830e+1	1.02225e+1	1.02610e+1	1.02986e+1	1.03354e+1	1.03713e+1	1.04576e+1	1 05394e+1	1.06909e+1	1.10699e+1	1.15336e+1	1.27171e+1	1.31573€+1	1.32282e+1	1.32383c+1
2e-6	9 75863e+0	9.80560e+0	9.85119e+0	9.89547e+0	9.93849e+0	9 98033e+0	1.00607e+1	1.00993e+1	1 01369e+1	1.01735e+1	1 02093e+1	1.02442e+1	1.02782e+1	1 03600c+1	1.04372e+1	1.05795e+1	1.09312e+1	1.13502e+1	1.23010e+1	1.25304c+1	1.25447e+1	1.25451e+1
3e-6	9.70579c+0	9 75135e+0	9 795520-0	9.83839c+0	9.88000c+0	9 92043e+0	9.99794c+0	1.00351e+1	1.00713e+1	1.01066e+1	1.01409e+1	1.01744e+1	1.02071e+1	1 02853e+1	1.03590e+1	1.04945e+1	1.08256c+1	1.12114c+1	1.20045e+1	1 213630+1	1.21397e+1	1.21397e+1
4e-6	9 66133e+0	9.70570c+0	9.74869c+0	9.79037e+0	9.83080e+0	9.87005c+0	9.94520e+0	9.98121e+0	1.00162e+1	1.00503e+1	1.00835e+1	1.01158e+1	1.01473e+1	1.02226c+1	1 02935e+1	1.04231e+1	1.07372e+1	1.10958e+1	1.17710e+1	1.18511c+1	1.18520e+1	1.18520e+1
												1.00644e+1										
												1.00180e+1										
												9.97546e+0										
												9.93601c+0										
												9.89907c+0										
												9.86424c+0										
												9.58762e+0										
												9.38180e+0										
												9.21338e+0										
												9 06923e-0										
												8.94253e+0										
												8.82917e+0										
												8 72644c+0										
												8.63243e-0										
												8.54573e+0										
												7.92351e-0										
												7.53076e-0										
												7.24613e+0										
												7.02387e+0										
												6 84187e+0										
												6 68788e+0										
												6 55447e+0										
												6 43680e-0										
												6 33154e-0										
												5.63939e+0										
												5.23493e+0										
												4.94824e+0										
												4 72610e+0										
6e-3	4.54477c+0	4 54477c+0	4.54477c+0	4 54477e+0	4.54477c+0	4.54477e+0	4 54477e-0	4 54477e+0	4 54477e+0	4 54477e-0	4 54477e+0	4.54477e-0	4 54477e+0	4 54477e+0	4.54477e+0	4 54477c+0	4 54477e+0	4 54477e+0	4.54477c+0	4.54477c+0	4.54477c+0	4.54477e+0
7e-3	4 39162e+0	4.39162e+0	4 39162e+0	4 39162e-0	4 39162e+0	4.39162e+0	4 39162e+0	4 39162e+0	4 39162e+0	4 39162e+0	4 39162c+0	4 39162e+0	4.39162e+0	4 39162e+0	4 39162e+0	4.39162e+0	4.39162e+0	4.39162e+0				
8e-3	4 25908e+0	4 25908e+0	4.25908e+0	4 25908e-0	4 25908e-0	4.25908e-0	4 25908e+0	4 25908e+0	4 25908e-0	4 25908e-0	4 25908e+0	4 25908e-0	4 25908c+0	4 25908c-0	4 25908c+0	4 25908e+0	4 25908c+0	4 25908e+0	4 25908e+0	4 25908e+0	4 25908e+0	4.25908e+0
9e-3	4 14229e+0	4 14229e-0	4 14229c+0	4.14229e-0	4 14229e+0	4 14229e+0	4 14229c-0	4 14229e-0	4 14229e-0	4 14229e+0	4 14229e+0	4.14229e-0	4 14229c+0	4 14229e+0	4 14229e+0	4 14229c+0	4 14229e+0	4.14229e+0	4 14229e+0	4 14229e-0	4 14229e+0	4.14229e+0

N	74	76	78	80	82	84	88	90	92	94	96	98	100	105	110	120	150	200	500	1000	1500	3000
						4 03793e+0																
						3 35471e+0																
						2.95912e+0																
						2.68126e+0																
						2.46790c+0																
						2.29531e+0																
						2.15084e+0																
						2.02694e+0																
						1.91874e+0																
						1.82292e+0																
						1 22265e+0																
						9.05677e-1																
						7.02380e-1																
						5.59774e-1																
						4.54380e-1																
						3.73769e-1																
						3.10597e-1 2 60184e-1																
2010	4 80005a 2	4 80005- 2	4 80005- 2	4 90005- 2	4 90005- 2	2.19384e-1 4.89005e-2	4 90005- 2	4 90005- 2	4 90005- 2	4 90006- 2	4 80005- 2	4 80005 - 2	4 80005 - 2	4.00006 - 2	4.00006 . 3	2.19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2 19384e-1	2.19384e-1	2.19384e-1	2 19384c-1
3040	1.304840-2	1.30484-2	1.30484e-2	1.30484e.2	1.30484-2	1.30484e-2	1 20494- 2	1.30484- 2	1.30494- 2	1.30494- 2	1.20494- 2	1 20484 - 2	1 20404- 2	1.30494- 2	1.30484 - 3	4.89005e-2	4.89003e-2	4.89003e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2
40.0	1.7035e-3	3 770350-3	3 77035e-3	1.30484e-2	3 77035e-3	3.77935e-3	2 77025- 2	2 77025- 2	2 77025- 2	2 77025- 2	2 77025- 2	2 27025- 2	2.77025-2	2.77025- 2	2.77025 - 2	1.30484e-2	2.37026-2	2.22026- 2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2
50+0	1 14830e-3	1 14830c-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1.14830e-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1 14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1 149300-3	1.149300.3	1.14930e-3	3.//933C-3	3.779300-3	3 //933¢-3	3.//933C-3	3.//933e-3	3.//933e-3	3.//933e-3
						3.60082e-4																
70+0	15482c-4	1 15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.15482e-4	1.154826-4	1.15482e-4	1.15492e-4	1.15482-4	1.154820.4	1 154820 4	1 154920 4	1 15492- 4	1.15492-4	1.15402-4	1 16492- 4	3.00082C-4	3.00082e-4	1.15492- 4	3.000826-4
80-0	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3 76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3.76656e-5	3 766560.5	3.76656e-5	3 76656- 5	2 76656- 5	2 76656- 5	1.134826-4	1.134826-4	2.76666. 6	2.74656-5	2.76656- 6
9e+0	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474c-5	1 24474e-5	1.24474e-5	1.74474e-5	1.24474e-5	1.74474e-5	1.74474e-5	1 244740-5	1.74474e-5	1.74474e-5	1.244740-5	1.24474e-5	1.24474= 5	1 24474- 5	1 24474- 5	1.24474-5	1.244740.5	1.24474= 5	1.744740.5
10+1	1.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4 15697c-6	4 15697c-6	4 15697e-6	4 15697c-6	4 15697e-6	4 15697e-6	4 15697e-6	4 15697e-6	4 15697e-6	4 15607e-6	4 15607-6	4 156070-6	4 15607-6	4 15607-6	4 15607a.6	4 15607- 6

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

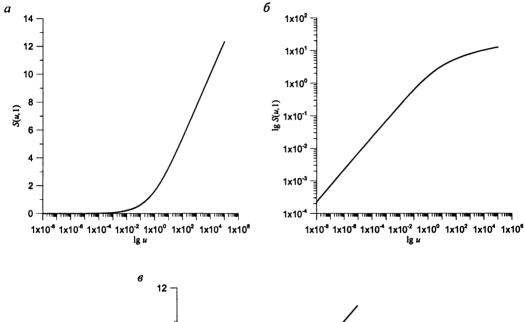
<u>Литература:</u> Hantush, 1961b, 1964c; Zlotnik, Ledder, 1996.

приложение 25

Функция влияния скважины $S(u,\beta)$, учитывающая емкость скважины

Функция:
$$S(u,\beta) = \frac{4}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{J_{1}(\tau)Y_{0}(\beta\tau) - Y_{1}(\tau)J_{0}(\beta\tau)}{J_{1}^{2}(\tau) + Y_{1}^{2}(\tau)} \frac{1 - \exp(-u\tau^{2})}{\tau^{2}} d\tau$$
,

где $J_0(\beta)$, $J_1(\beta)$, $Y_0(\beta)$, $Y_1(\beta)$ — функции Бесселя (Приложение 2).



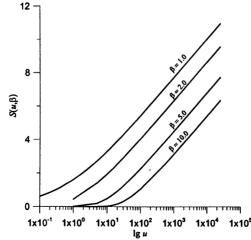


Рис. П25. Зависимость функции (a) и логарифма функции (б) от логарифма первого аргумента при значении $\beta=1$ и функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента (в).

Аппроксимация:

Диапазон	Зависимость
<i>u</i> > 20	$S(u,\beta) \approx W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right)$ [Hantush, 1964c]; $W(u)$ – см. Приложение 26
$u > 150$ и $\beta = 1$	$S(u,1) \approx \ln(u) + 0.81$ [подобрана автором]
$u < 0.01$ и $\beta = 1$	$S(u,1) \approx \exp[0.497 \ln(u) + 0.774]$ [подобрана автором]

Значения функции $S(u,\beta)$ для аргумента $u=10^{-8}\div 10^{5}$ и $\beta=1$

S(u,1)	и	S(u,1)	и	S(u,1)	и	S(u,1)	и	S(u,1)	и
7.36611	700	5 02844	65	3.30179	10	1.47733	0.8	0.00023	1.0E-08
7.49898	800	5.09991	70	3.38453	11	1.54344	0.9	0.00071	1.0E-07
7.61624	900	5.16657	75	3.46070	12	1.60429	1.0	0.00226	1.0E-06
7.72118	1000	5.22904	80	3.53129	13	1.66073	1.1	0.00504	5.0E-06
8.12533	1500	5.28782	85	3.59706	14	1.71341	1.2	0.00713	1.0E-05
8.41233	2000	5.34331	90	3.65865	15	1.76284	1.3	0.01591	5.0E-05
8.63505	2500	5.39587	95	3.71656	16	1.80943	1.4	0.02247	1.0E-04
8.81708	3000	5.44579	100	3.77121	17	1.85350	1.5	0.04997	5.0E-04
8.97102	3500	5.53869	110	3.82295	18	1.89534	1.6	0.07038	1.0E-03
9.10439	4000	5.62366	120	3.87208	19	1.93517	1.7	0.11041	2.5E-03
9.22205	4500	5.70194	130	3.91885	20	1.97320	1.8	0.15477	5.0E-03
9.32730	5000	5.77452	140	4.00618	22	2.00959	1.9	0.18829	7.5E-03
9.50947	6000	5.84217	150	4.08634	24	2.04448	2.0	0.21621	0.01
9.66351	7000	5.90552	160	4.16044	26	2.20041	2.5	0.30061	0.02
9.79695	8000	5.96508	170	4.22934	28	2.33267	3.0	0.36352	0.03
9.91466	9000	6.02128	180	4.29372	30	2.44776	3.5	0.41535	0.04
10.01997	10000	6.07448	190	4.35415	32	2.54980	4.0	0.46013	0.05
10.42526	15000	6.12499	200	4.41108	34	2.64154	4.5	0.49995	0.06
10.71286	20000	6.21893	220	4.46491	36	2.72493	5.0	0.53600	0.07
10.93595	25000	6.30478	240	4.51594	38	2.80141	5.5	0.56910	0.08
11.11823	30000	6.38382	260	4.56447	40	2.87207	6.0	0.59979	0.09
11.40587	40000	6.45706	280	4.61073	42	2.93776	6.5	0.62847	0.1
11.62898	50000	6.52530	300	4.65491	44	2.99915	7.0	0.84849	0.2
11.81129	60000	6.67790	350	4.69721	46	3.05678	7.5	1.00484	0.3
11.96542	70000	6.81024	400	4.73777	48	3.11110	8.0	1.12923	0.4
12.09894	80000	6.92708	450	4.77674	50	3.16247	8.5	1.23372	0.5
12.21672	90000	7.03167	500	4.86793	55	3.21121	9.0	1.32440	0.6
12.32207	100000	7.21282	600	4.95143	60	3.25757	9.5	1.40484	0.7

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

Значения функции $S(u,\beta)$ для аргумента $u=0.1\div 25000$ и $\beta=1,\,2,\,5,\,10$

β	1	2	5	10	J B	1	2	5	10
0.1	0.616				6.0	2.865			
0.2	0.842				8.0	3.104			
0.3	1.005				10	3.305	1.948	0.488	0.0302
0.4	1.131				12	3.456	2.098	0.591	0.0528
0.5	1.244				15	3.657	2.287	0.729	0.0905
0.6	1.344				20	3.921	2.551	0.925	0.162
0.7	1.420				25	4.122	2.752	1.088	0.236
0.8					30			1.230	0.309
1.0	1.608	0.440	0.0126	0.000	50	4.775	3.405	1.658	0.578
1.2	1.722				100	5.441	4.059	2.274	1.058
1.5	1.860				500	7.037	5.642	3.820	2.476
2.0	2.048				1000	7.716	6.333	4.511	3.142
2.5	2.199				5000	9.324	7.942	6.107	4.725
3.0	2.337				10000	10.015	8.633	6.798	5.416
4.0	2.551				25000	10.933	9.550	7.716	6.333
5.0	2.727	1.407	0.192	0.0012				I	

Примечание. Значения функции взяты из [Hantush, 1964с].

<u>Литература:</u> Карслоу, Егер, 1964; Hantush, 1964с.

Функция влияния скважины W(u)

Функция:
$$W(u) = \int_{u}^{\infty} \frac{\exp(-\tau)}{\tau} d\tau$$
; $W(u) = -E_i(-u) = E_1(u)$.

Разложение в ряд:
$$W(u) = -\gamma - \ln u - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u^n}{nn!}$$
.

Условные обозначения:

 $E_i(-u)$ — интегральная показательная функция; $\gamma = 0.5772156649$ — постоянная Эйлера.

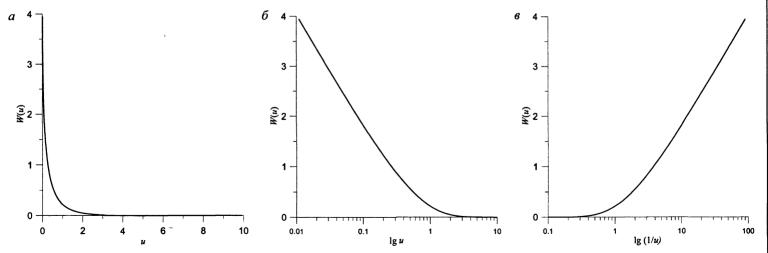


Рис. П26. Зависимости функции от аргумента (a), от логарифма аргумента (б) и от логарифма величины, обратной аргументу (в).

Аппроксимация [Справочник..., 1979]:

Диапазон	Зависимость
<i>u</i> < 0.05	$W(u) \approx \ln \frac{0.562}{u}$ – для практических расчетов
<i>u</i> ≤ 1	$W(u) = -\ln u - \gamma + 0.99999193u - 0.24991055u^2 + 0.05519968u^3 - 0.00976004u^4 + 0.00107857u^5$
$u \ge 1$	$W(u) = \frac{e^{-x}}{x} \left(\frac{u^4 + 8.5733287401u^3 + 18.059016973u^2 + 8.6347608925u + 0.2677737343}{u^4 + 9.5733223454u^3 + 25.6329561486u^2 + 21.0996530827u + 3.9584969228} \right)$

Значения функции влияния скважины W(u) для аргумента $u=10^{-15} \div 9.9$

N	N×10 ⁻¹⁵	N×10 ⁻¹⁴	N×10 ⁻¹³	N×10 ⁻¹²	N×10 ⁻¹¹	N×10 ⁻¹⁰	N×10 ⁻⁹	N×10-8	N×10 ⁻⁷	N×10-6	N×10 ⁻⁵	N×10 ⁻⁴	N×10 ⁻³	N×10 ⁻²	N×10 ⁻¹	N×1
1.0	33.961561	31.658976	29.356391	27.053805	24 751220	22.448635	20.146050	17.843465	15.540880	13.238296	10.935720	8.633225	6.331539	4.037930	1.822924	2.19384E-01
1.1	33.866251	31.563665	29.261080	26.958495	24.655910	22.353325	20.050740	17.748155	15.445570	13.142986	10.840411	8.537925	6.236329	3.943614	1.737107	1.85991E-01
1.2	33.779239	31.476654	29.174069	26.871484	24.568899	22.266314	19 963729	17 661144	15.358559	13.055975	10 753400	8.450923	6.149418	3.857597	1.659542	1.58408E-01
1.3	33.699196	31.396611	29.094026	26.791441	24 488856	22.186271	19.883686	17.581101	15.278516	12.975932	10.673359	8.370890	6.069475	3.778548	1.588899	1.35451E-01
1.4	33.625088	31.322503	29.019918	26.717333	24.414748	22.112163	19 809578	17.506993	15.204408	12.901824	10.599252	8.296792	5.995467	3.705433	1.524146	1.16219E-01
1.5	33.556096	31.253511	28.950925	26.648340	24.345755	22.043170	19 740585	17.438000	15.135415	12.832831	10.530260	8.227810	5.926574	3.637433	1.464462	1.00020E-01
1.6	33.491557	31.188972	28.886387	26.583802	24 281217	21.978632	19.676047	17.373461	15.070877	12.768293	10 465722	8.163281	5.862135	3.573887	1.409187	8.63083E-02
1.7	33.430932	31.128347	28.825762	26.523177	24 220592	21.918007	19 615422	17.312837	15.010252	12.707668	10.405099	8.102666	5.801611	3.514254	1.357781	7.46546E-02
1.8	33.373774	31.071189	28.768604	26 466019	24.163434	21 860849	19 558264	17 255678	14.953094	12.650510	10.347941	8 045518	5.744552	3 458087	1.309796	6.47131E-02
1.9	33.319707	31.017122	28.714537	26.411952	24.109366	21 806781	19 504196	17.201611	14 899026	12.596443	10.293875	7.991461	5.690585	3.405011	1.264858	5.62044E-02
2.0	33.268414	30.965828	28.663243	26 360658	24.058073	21.755488	19 452903	17.150318	14.847733	12 545150	10.242583	7.940178	5.639391	3.354708	1.222651	4.89005E-02
2.1	33.219623	30.917038	28.614453	26.311868	24.009283	21.706698	19 404113	17.101528	14.798943	12 496360	10.193793	7.891397	5.590701	3.306907	1.182902	4.26143E-02
2.2	33.173103	30.870518	28.567933	26 265348	23 962763	21.660178	19.357593	17.055008	14.752423	12.449840	10.147274	7.844887	5.544281	3.261377	1.145380	3.71911E-02
2.3	33.128652	30.826067	28 523481	26.220896	23.918311	21.615726	19.313141	17.010556	14.707971	12 405388	10.102824	7.800446	5.499929	3 217914	1.109883	3.25023E-02
2.4	33.086092	30.783507	28.480922	26.178337	23.875752	21 573167	19.270581	16 967996	14.665411	12.362829	10.060265	7.757896	5.457469	3.176343	1.076235	2.84403E-02
2.5	33.045270	30.742685	28.440100	26.137515	23.834930	21.532345	19.229759	16.927174	14.624590	12.322007	10.019444	7.717084	5.416747	3 136508	1.044283	2.49149E-02
2.6	33.006049	30.703464	28.400879	26.098294	23.795709	21.493124	19.190539	16 887954	14.585369	12.282786	9 980224	7.677873	5.377626	3.098275	1.013889	2.18502E-02
2.7	32.968309	30.665724	28.363139	26.060554	23.757969	21.455383	19.152798	16.850213	14.547628	12.245046	9.942485	7 640143	5.339986	3 061522	0.984933	1.91819E-02
2.8	32.931941	30.629356	28.326771	26.024186	23.721601	21.419016	19.116431	16.813846	14.511261	12.208678	9.906118	7 603785	5.303718	3.026140	0.957308	1.68553E-02
2.9	32.896850	30.594265	28.291680	25.989095	23.686510	21.383925	19.081339	16.778754	14.476170	12.173587	9 871028	7.568704	5.268727	2.992035	0.930918	1.48240E-02
3.0	32.862948	30.560363	28.257778	25.955193	23.652608	21 350023	19.047438	16.744853	14.442268	12.139686	9.837128	7.534812	5.234925	2.959119	0.905677	1.30484E-02
3.1	32 830159	30.527574	28.224988	25.922403	23.619818	21.317233	19 014648	16.712063	14.409478	12.106896	9.804339	7.502033	5.202235	2.927314	0.881506	1.14944E-02
3.2	32 798410	30.495825	28.193240	25.890655	23.588070	21.285484	18 982899	16 680314	14.377730	12 075147	9.772591	7.470294	5.170586	2.896550	0.858335	1.01330E-02
3.3	32.767638	30.465053	28.162468	25.859883	23.557298	21.254713	18.952128	16.649543	14.346958	12 044376	9.741820	7.439532	5.139914	2.866762	0.836101	8.93904E-03
3.4	32.737785	30.435200	28.132615	25.830030	23.527445	21.224860	18 922275	16 619690	14 317105	12.014523	9.711968	7.409689	5.110161	2.837892	0.814746	7.89097E-03
3.5	32.708798	30.406213	28.103628	25 801042	23.498457	21.195872	18 893287	16 590702	14.288117	11.985535	9.682982	7.380712	5.081274	2.809888	0.794215	6.97014E-03
3.6	32.680627	30.378042	28.075457	25.772872	23.470287	21 167701	18.865116	16.562531	14.259947	11.957365	9.654812	7.352551	5.053203	2.782699	0.774462	6.16041E-03
3.7	32.653228	30.350643	28.048058	25.745473	23.442888	21.140302	18.837717	16.535132	14.232548	11.929966	9.627414	7 325162	5.025903	2.756282	0.755441	5.44783E-03
3.8	32.626560	30.323975	28.021389	25.718804	23 416219	21.113634	18.811049	16.508464	14.205879	11.903298	9.600747	7.298504	4.999335	2 730595	0.737112	4.82025E-03

N "	N×10 ⁻¹⁵	N×10 ⁻¹⁴	N×10 ⁻¹³	N×10 ⁻¹²	N×10 ⁻¹¹	N×10 ⁻¹⁰	N×10 ⁻⁹	N×10-8	N×10 ⁻⁷	N×10-6	N×10 ⁻⁵	N×10 ⁻⁴	N×10 ⁻³	N×10 ⁻²	N×10 ⁻¹	<i>N</i> ×1
3.9	32.600584	30.297999	27.995414	25.692829	23 390244	21.087659	18.785074	16.482489	14.179904	11.877322	9.574772	7.272538	4.973459	2.705601	0.719437	4.26715E-03
4.0	32.575266	30.272681	27.970096	25.667511	23.364926	21.062341	18.759756	16.457171	14.154586	11.852005	9.549455	7.247230	4.948241	2.681264	0.702380	3.77935E-03
4.1	32.550574	30.247989	27.945404	25.642818	23.340233	21.037648	18.735063	16.432478	14.129893	11.827312	9.524764	7.222548	4.923648	2.657551	0.685910	3.34888E-03
4.2	32.526476	30.223891	27.921306	25.618721	23.316136	21.013551	18.710966	16.408381	14.105796	11.803215	9.500667	7.198460	4.899651	2.634433	0.669997	2.96876E-03
4.3	32.502946	30.200361	27.897776	25.595190	23.292605	20.990020	18.687435	16.384850	14.082265	11.779684	9.477138	7.174940	4.876220	2.611882	0.654613	2.63291E-03
4.4	32.479956	30.177371	27.874786	25 572201	23.269616	20.967031	18.664446	16.361861	14.059276	11.756695	9.454149	7.151960	4.853330	2.589871	0.639733	2.33601E-03
4.5	32.457483	30.154898	27.852313	25.549728	23.247143	20.944558	18.641973	16.339388	14.036803	11.734222	9.431677	7.129497	4.830957	2.568376	0.625331	2.07340E-03
4.6	32.435504	30.132919	27.830334	25.527749	23.225164	20.922579	18.619994	16.317409	14.014824	11.712243	9.409699	7.107528	4.809078	2.547375	0.611387	1.84101E-03
4.7	32.413998	30.111413	27.808828	25.506243	23.203658	20.901073	18.598488	16.295903	13.993318	11.690737	9.388194	7.086032	4.787672	2.526845	0.597877	1.63525E-03
4.8	32.392945	30.090360	27.787775	25.485190	23.182604	20.880019	18.577434	16.274849	13.972265	11.669684	9.367142	7.064989	4.766718	2.506769	0.584784	1.45299E-03
4.9	32.372326	30.069740	27.767155	25.464570	23.161985	20.859400	18.556815	16.254230	13.951645	11.649065	9.346524	7.044379	4.746198	2.487126	0.572089	1.29148E-03
5.0	32.352123	30.049538	27.746953	25.444368	23.141782	20.839197	18.536612	16.234027	13.931443	11.628862	9.326322	7.024187	4.726095	2.467898	0.559774	1.14830E-03
5.1	32.332320	30.029735	27.727150	25.424565	23.121980	20.819395	18.516810	16.214225	13.911640	11.609059	9.306520	7.004394	4.706393	2.449071	0.547822	1.02130E-03
5.2	32.312902	30 010317	27.707732	25.405147	23.102562	20.799977	18.497392	16.194807	13.892222	11.589641	9.287103	6.984986	4.687074	2.430628	0.536220	9.08622E-04
5.3	32.293854	29.991269	27.688684	25.386099	23.083514	20.780928	18.478343	16.175758	13.873174	11.570593	9.268056	6.965948	4.668126	2.412554	0.524952	8.08608E-04
5.4	32.275162 32.256813	29.972577 29.954228	27.669992 27.651642	25.367407 25.349057	23.064821	20.762236	18.459651 18.441302	16.157066 16.138717	13.854482	11.551901 11.533552	9.249365 9.231017	6.947266	4.649533	2.394835	0.514004	7.19804E-04
5.6	32.238794	29.934228	27.633624	25.331039	23.046472	20.725869	18.423284	16.120699	13.836132	11.535534	9.231017	6.928927 6.910918	4.631284	2.377459 2.360414	0.503364	6.40926E-04 5.70840E-04
5.7	32.221095	29.918509	27.615924	25.313339	23.028434	20.723869	18.405584	16.102999	13.800414	11.497834	9.195301	6.893228	4.613365 4.595765	2.343686	0.493020	5.08546E-04
5.8	32.203703	29.901118	27.598533	25.295948	22.993362	20.690777	18.388192	16.085607	13.783023	11.480443	9.177910	6.875847	4.578473	2.327266	0.473173	4.53161E-04
5.9	32.186608	29.884023	27.581438	25.278853	22.976268	20.673683	18.371098	16.068513	13.765928	11.463348	9.160816	6.858762	4.561479	2.311143	0.463650	4.03904E-04
6.0		29.867216	27.564631	25.262046	22.959461	20.656876	18.354291	16.051706	13.749121	11.446541	9.144010	6.841965	4.544771	2.295307	0.454380	3.60082E-04
6.1	32.153272	29.850687	27.548102	25.245517	22.942932	20.640346	18.337761	16.035176	13.732592	11.430012	9.127482	6.825446	4.528342	2.279748	0.445353	3.21087E-04
6.2	32.137011	29.834426	27.531841	25.229256	22.926671	20.624086	18.321501	16.018916	13.716331	11.413752	9.111223	6.809195	4.512181	2.264457	0.436562	2.86376E-04
6.3	32.121011	29.818426	27.515841	25.213256	22.910671	20.608086	18.305501	16.002916	13.700331	11.397752	9.095223	6.793205	4.496280	2.249426	0.427997	2.55471E-04
6.4	32.105263	29.802678	27.500093	25.197507	22.894922	20.592337	18.289752	15.987167	13.684583	11.382003	9.079476	6.777467	4.480631	2.234647	0.419652	2.27948E-04
6.5	32.089759	29.787173	27.484588	25.182003	22.879418	20.576833	18.274248	15.971663	13.669078	11.366499	9.063973	6.761972	4.465227	2.220111	0.411517	2.03430E-04
6.6	32.074491	29.771906	27.469321	25.166736	22.864151	20.561566	18.258981	15.956396	13.653811	11.351232	9.048706	6.746715	4.450059	2.205812	0.403586	1.81584E-04
6.7	32.059453	29.756868	27.454283	25.151698	22.849113	20.546528	18.243943	15.941358	13.638773	11.336194	9.033669	6.731687	4.435121	2.191741	0.395853	1.62114E-04
6.8	32.044638	29.742053	27.439468	25.136883	22.834298	20.531713	18.229128	15.926543	13.623958	11.321379	9.018855	6.716882	4.420405	2.177893	0.388309	1.44758E-04
6.9	32.030039	29.727454	27.424869	25.122284	22.819699	20 517114	18.214529	15.911944	13.609359	11.306780	9.004257	6.702293	4.405906	2.164261	0.380950	1 29283E-04
7.0	32.015651	29.713065	27 410480	25.107895	22.805310	20 502725	18.200140	15.897555	13.594971	11.292392	8.989870	6.687914	4.391617	2.150838	0.373769	1.15482E-04
7.1	32.001466	29.698881	27.396296	25.093711	22.791126	20.488540	18.185955	15.883370	13.580786	11.278207	8.975686	6.673740	4.377532	2.137619	0.366760	1.03171E-04
7.2	31.987480	29.684895	27.382310	25 079724	22 777139	20 474554	18.171969	15 869384	13.566800	11.264221	8.961701	6.659764	4 363646	2.124598	0.359918	9.21881E-05
7.3	31.973686	29.671101	27.368516	25 065931	22.763346	20.460761	18.158176	15.855591	13.553006	11.250428	8.947908	6 645980	4.349952	2.111769	0.353237	8.23872E-05
7.4	31.960081	29.657496	27.354911	25.052325	22.749740	20.447155	18.144570	15.841985	13 539401	11.236822	8.934304	6.632385	4.336446	2.099128	0.346713	7.36397E-05
7.5	31.946658	29.644073	27.341488 27.328242	25.038902	22.736317	20.433732	18.131147	15.828562	13.525978	11.223399	8.920882	6.618972	4.323123	2 086668	0.340341	6 58309E-05
7.6	31.933412 31.920340	29.630827 29.617755	27.328242	25.025657 25.012585	22 723072 22.710000	20 420487	18 117902 18 104830	15.815317 15.802245	13 512733	11.210154	8 907638 8.894566	6.605736	4.309977 4.297004	2.074386 2.062277	0.334115	5 88588E-05
7.7	31.920340	29.604852	27.302267	24 999682	22.697097	20.394512	18.091926	15.789341	13.486757	11 184179	8.881664	6.579781	4.284201	2.050336	0.328032 0.322088	5.26326E-05 4.70717E-05
7.9	31.894698	29 592113	27.289528	24.986943	22.684358	20.381773	18 079187	15.776602	13.474018	11.171440	8.868926	6.567052	4.271561	2.038559	0.316277	4.21040E-05
8.0	31.882119	29.579534	27.276949	24.974364	22 671779	20.369194	18.066609	15.764024	13.461439	11.158861	8.856348	6.554483	4.259082	2.026941	0.310277	3.76656E-05
8.1	31.869697	29.567112	27.264526	24.961941	22.659356	20.356771	18.054186	15.751601	13.449017	11 146439	8.843927	6.542070	4.246759	2.015479	0.305043	3.36995E-05
8.2	31.857427	29.554841	27.252256	24.949671	22.647086	20.33471	18.041916	15.739331	13.436747	11.134169	8.831658	6.529810	4.234589	2.004170	0.299611	3.01549E-05
8.3	31.845305	29.542720	27 240135	24 937550	22 634965	20.332380	18.029795	15.727210	13.424625	11.122048	8.819537	6 517699	4.222567	1.993008	0.294299	2.69864E-05
8.4	31.833329	29.530744	27.228159	24.925574	22.622989	20.320404	18.017818	15.715233	13 412649	11.110072	8 807562	6.505733	4 210690	1.981991	0.289103	2.41538E-05
8.5	31.821495	29.518909	27.216324	24.913739	22.611154	20 308569	18.005984	15.703399	13.400815	11.098237	8.795729	6.493908	4.198955	1 971116	0.284019	2.16211E-05
8.6	31.809799	29.507213	27.204628	24.902043	22 599458	20.296873	17.994288	15 691703	13.389119	11.086541	8.784034	6.482222	4.187359	1.960378	0.279045	1.93562E-05
8.7	31.798238	29.495653	27.193068	24.890482	22.587897	20 285312	17.982727	15.680142	13.377558	11.074981	8.772474	6.470671	4.175898	1.949775	0.274177	1.73306E-05
8.8	31.786809	29.484224	27.181639	24.879054	22 576469	20.273884	17.971298	15 668713	13 366129	11.063552	8 761046	6 459253	4 164569	1.939304	0.269413	1.55187E-05
8.9	31.775509	29.472924	27.170339	24.867754	22.565169	20.262584	17.959999	15.657414	13 354830	11.052253	8.749748	6.447963	4.153369	1.928962	0.264749	1.38977E-05

N	N×10 ⁻¹⁵	N×10 ⁻¹⁴	N×10 ⁻¹³	N×10 ⁻¹²	N×10 ⁻¹¹	N×10 ⁻¹⁰	N×10 ⁻⁹	N×10⁴	N×10 ⁻⁷	<i>N</i> ×10 ⁻⁶	N×10 ⁻⁵	N×10 ⁻⁴	N×10 ⁻³	N×10 ⁻²	N×10 ⁻¹	N×1
9.0	31.764336	29.461751	27.159166	24.856581	22.553996	20.251411	17.948826	15.646241	13.343656	11.041079	8.738575	6.436800	4.142295	1.918745	0 260184	1.24474E-05
9.1	31.753286	29.450701	27.148116	24.845531	22.542946	20.240361	17.937776	15.635191	13.332606	11.030030	8.727526	6.425760	4.131345	1.908651	0.255714	1.11495E-05
9.2	31.742357	29.439772	27.137187	24.834602	22.532017	20.229432	17.926847	15.624262	13.321677	11.019101	8.716598	6.414841	4.120515	1.898678	0.251336	9.99000E-06
9.3	31.731546	29.428961	27.126376	24.823791	22.521206	20.218621	17.916036	15.613451	13 310867	11.008290	8.705788	6 404040	4.109804	1.888822	0.247050	8.95000E-06
9.4	31.720851	29.418266	27.115681	24.813096	22.510511	20 207926	17.905340	15.602755	13.300171	10 997595	8.695094	6 393355	4 099208	1.879081	0.242851	8.02000E-06
9.5	31.710269	29.407684	27.105099	24.802514	22.499929	20.197343	17.894758	15.592173	13.289589	10.987013	8.684513	6.382783	4.088725	1.869453	0.238738	7 18000E-06
9.6	31.699798	29.397213	27.094627	24.792042	22.489457	20.186872	17.884287	15.581702	13.279118	10.976541	8.674043	6.372321	4.078354	1.859936	0.234708	6.44000E-06
9.7	31.689435	29.386850	27.084265	24.781680	22.479094	20 176509	17.873924	15.571339	13 268755	10.966179	8 663681	6.361969	4.068090	1.850526	0.230760	5.77000E-06
9.8	31.679178	29.376593	27.074008	24.771423	22.468838	20.166253	17.863668	15.561083	13.258499	10.955922	8.653425	6.351722	4.057933	1.841222	0.226891	5.17000E-06
9.9	31.669026	29.366441	27.063856	24.761271	22.458686	20.156101	17.853515	15.550930	13.248346	10.945770	8 643274	6.341580	4.047880	1.832022	0.223100	4.64000E-06

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> Wenzel, 1942; Карслоу, Егер, 1964; Янке и др., 1964; Справочник..., 1979; Barry et al., 2000.

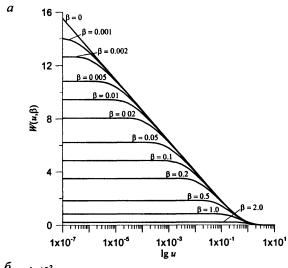
приложение 27

Функция влияния скважины с учетом перетекания $W(u, \beta)$

Функция:
$$W(u,\beta) = \int_{u}^{\infty} \frac{1}{\tau} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) d\tau$$
, $W(u,\beta) = 2K_0(\beta) - W\left(\frac{\beta^2}{4u},\beta\right)$.

Предельные значения функции: W(u,0) = W(u), $W(0,\beta) = 2K_0(\beta)$.

Разложение в ряд: $W(u,\beta) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{\beta^2}{4u}\right)^n \frac{E_{n+1}(u)}{n!}$.



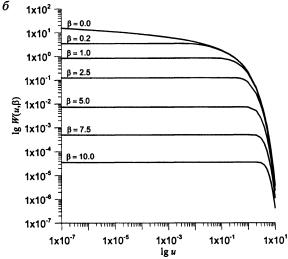


Рис. П27. Зависимость функции (a) и логарифма функции (b) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация [Hantush, Jacob, 1955b]:

Диапазон	Зависимость
$u \le 1.0,$ $\beta \le 2.0$	$W(u,\beta) = \begin{pmatrix} 2K_0(\beta) - I_0(\beta)W \left(\frac{\beta^2}{4u}\right) + \\ + \exp\left(-\frac{\beta^2}{4u}\right) \left(\gamma + \ln u + W(u) - u + 4u\frac{I_0(\beta) - 1}{\beta^2}\right) - \\ - u^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{m=1}^{n} \frac{(-1)^{n+m}(n-m+1)!}{(n+2)!^2 u^{m-n}} \left(\frac{\beta^2}{4}\right)^m\right]$
$u \le 1.0,$ $\beta \le 0.2$	$W(u,\beta) = 2K_0(\beta) - I_0(\beta)W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right) + \exp\left(-\frac{\beta^2}{4u}\right)\left(\gamma + \ln u + W(u) + \frac{u\beta^2}{16}\left(1 - \frac{u}{9}\right)\right)$
$u \le 0.1,$ $\beta \le 0.2$	$W(u,\beta) = 2K_0(\beta) - I_0(\beta)W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right) + \exp\left(-\frac{\beta^2}{4u}\right)\left(\frac{u\beta^2}{16}\left(1 - \frac{u}{9}\right) + u - \frac{u^2}{2\cdot 2!} + \frac{u^3}{3\cdot 3!}\right),$ $2\cdot 2! = 2\cdot 42396548 \; ; \; 3\cdot 3! = 8\cdot 85534336$
$u \ge 1.0,$ $\beta \le 2.0$	$W(u,\beta) = \begin{pmatrix} I_0(\beta)W(u) - e^{-u} \left(\gamma + \ln\frac{\beta^2}{4u} + W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right) - \frac{\beta^2}{4u} + \frac{I_0(\beta) - 1}{u}\right) + \\ + \frac{e^{-u}}{u^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{\beta^2}{4}\right)^n \sum_{m=1}^n \frac{(-1)^{n+m} (n-m+1)!}{(n+2)!^2 u^{n-m}} \right] \end{pmatrix}$
$u \ge 1.0,$ $\beta \le 0.2$	$W(u,\beta) = I_0(\beta)W(u) - \frac{e^{-u}\beta^2}{4u} \left(1 - \frac{1}{36u} + \frac{\beta^2}{16} - \frac{\beta^2}{16u}\right)$
β < 0.01	W(u,eta)pprox W(u) — для практических целей

Для практических целей используются следующие приближения [Hantush, 1964c]:

Диапазон	Зависимость
$u > 2\beta$	$W(u,\beta) \approx W(u)$
$u > 5\beta^2, \beta < 0.1$	$W(u,\beta) \approx W(u)$
$u < 0.05\beta^2, u < 1.0$	$W(u,\beta) \approx 2K_0(\beta) - I_0(\beta)W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right)$

С высокой степенью точности выражения, включающие бесконечные ряды, можно упростить [Walton, 1984]:

Диапазон	Зависимость
$u \le 1.0,$ $\beta \le 2.0$	$W(u,\beta) = \begin{cases} 2K_0(\beta) - I_0(\beta)W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right) + \\ + \exp\left(\frac{\beta^2}{4u}\right)\left(\gamma + \ln(u) + W(u) - u + 4u\frac{I_0(\beta) - 1}{\beta^2}\right) - \\ - u\sum_{n=1}^{6} \left[\sum_{m=1}^{n} \frac{(-1)^{n+m}(n-m+1)!}{(n+2)!^2 u^{m-n}} \left(\frac{\beta^2}{4}\right)^m\right] \end{cases}$
$u > 1.0,$ $\beta \le 2.0$	$W(u,\beta) = \begin{pmatrix} I_0(\beta)W(u) - e^{-u} \left(\gamma + \ln \frac{\beta^2}{4u} + W \left(\frac{\beta^2}{4u} \right) - \frac{\beta^2}{4u} + \frac{I_0(\beta) - 1}{u} \right) + \\ + e^{-u} \sum_{n=1}^{6} \left[\left(\frac{\beta^2}{4} \right)^n \sum_{m=1}^{n} \frac{(-1)^{n+m} (n-m+1)!}{(n+2)!^2 u^{n-m}} \right]$

Условные обозначения:

$$E_n(u) = \int_{1}^{\infty} \frac{\exp(-u\tau)}{\tau^n} d\tau - \text{интегральная показательная функция;}$$

 $\gamma = 0.5772156649$ — постоянная Эйлера;

$$I_0(\beta)$$
, $K_0(\beta)$ — функции Бесселя (Приложение 2);

W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26);

Значения функции $W(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-7}\div 10.0$; $\beta=0, \beta=10^{-4}\div 10.0$.

Значения функции $W(u,\beta)$ для аргумента $\beta = 0 \div 0.008$

β " β	0	0.0001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
0	8	1.86525e+1	1.40474e+1	1.26611e+1	1.18502e+1	1.12748e+1	1.08286e+1	1 04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
1e-7	1.55409e+1	1.55160c+1	1.40225e+1	1.26611e+1	1.18502e+1	1.12748e+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
2e-7	1 48477e+1	1.48353e+1	1 39010e+1	1.26599e+1	1.18502e+1	1.12748e+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1 01557e+1	9.88868e+0
3e-7	1.44423c+1	1 44340e+1	1.37548e+1	1.26525e+1	1.18501c+1	1.12748e+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9 88868e+0
4e-7	1.41546e+1	1.41483e+1	1.36151e+1	1.26362e+1	1.18496e+1	1.12748e+1	1.08286e+1	1 04640e+1	1 01557e+1	9.88868e+0
5e-7	1.39314e+1	1.39264e+1	1.34876e+1	1 26122e+1	1.18481e+1	1.12748c+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
6e-7	1.37491e+1	1.37450e+1	1.33721e+1	1.25828e+1	1.18451e+1	1.12747e+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
7e-7	1.35950e+1	1.35914e+1	1.32673e+1	1.25498e+1	1.18402c+1	1.12743e+1	1.08286e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9 88868e+0
8e-7	1.34614e+1	1.34583e+1	1.31718e+1	1.25147e+1	1.18336e+1	1 12737e+1	1.08285e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
9e-7	1.33437e+1	1.33409c+1	1.30840e+1	1.24784e+1	1.18253e+1	1.12726e+1	1.08285e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
1e-6	1.32383e+1	1.32358e+1	1.30031e+1	1.24417e+1	1.18154c+1	1.12711e+1	1.08283e+1	1.04640e+1	1.01557e+1	9.88868e+0
2e-6	1.25451e+1	1.25439e+1	1.24240e+1	1.21013c+1	1.16716e+1	1.12259e+1	1 08174e+1	1.04619e+1	1.01554e+1	9.88864e+0
3e-6	1.21397c+1	1.21389e+1	1 20581c+1	1.18322e+1	1.15098e+1	1.11462e+1	1.07850e+1	1.04509e+1	1 01523e+1	9.88790e+0
4e-6	1 18520e+1	1.18514e+1	1.17905e+1	1.16168e+1	1.13597e+1	1.10555e+1	1.07374e+1	1.04292e+1	1 01436e+1	9.88490e+0
5e-6	1.16289e+1	1.16284e+1	1.15795e+1	1.14384e+1	1.12249e+1	1 09642e+1	1.06822e+1	1.03993e+1	1 01291e+1	9.87855e+0

, B	0	0.0001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
6e-6	1.14465e+1	1.14461e+1	1.14053e+1	1.12866e+1	1.11040e+1	1.08764e+1	1 06239e+1	1.03639c+1	1 01095e+1	9.86865e+0
7e-6	1.12924e+1	1.12920e+1	1.12570e+1	1.11545e+1	1.09951e+1	1.07933e+1	1.05651e+1	1.03255e+1	1.00862e+1	9.85555c+0
8e-6	1.11589e+1	1.11585e+1	1.11279e+1	1.10377e+1	1.08962e+1	1.07151e+1	1.05072e+1	1.02854c+1	1.00602e+1	9.83978e+0
9e-6	1.10411e+1	1.10408e+1	1.10135e+1	1.09330c+1	1.08059e+1	1.06416e+1	1.04508e+1	1 02446e+1	1.00324e+1	9.82189c+0
1e-5	1.09357e+1	1.09355e+1	1.09109e+1	1.08382e+1	1.07228c+1	1.05725e+1	1.03963c+1	1 02038c+1	1 00034c+1	9.80237c+0
2e-5	1.02426e+1	1.02425e+1	1 02301e+1	1 01932e+1	1.01332e+1	1.00522c+1	9 95297c+0	9.83864e+0		9.57809e+0
3e-5	9.83713e+0	9.83704c+0	9.82881e+0	9.80408e+0	9.76353e+0	9.70815e+0	9.63923e+0	9.55830e+0		9 36742c+0
4e-5	9.54946e+0	9.54939e+0	9.54322e+0	9.52462e+0	9.49401e+0	9.45194c+0	9.39917e+0	9.33660e+0		9.18632e+0
5e-5	9.32632e+0	9.32627e+0		9.30643e+0	9.28185e+0	9.24794c+0	9 20519c+0	9.15420c+0	9.09567c+0	9 03037c+0
6e-5	9.14401e+0	9.14397e+0		9.12742e+0	9.10688e+0	9.07848c+0	9 04256e+0	8.99954c+0		8.89428c+0
7e-5	8.98987e+0	8 98983e+0		8.97564c+0	8.95801e+0	8.93357e+0	8.90260e+0	8.86540c+0		8 77388c+0
8e-5	8.85635c+0	8.85632e+0	8.85323e+0	8.84390e+0	8.82844e+0	8.80701e+0	8.77978e+0	8 74702c+0	8.70901e+0	8 66608c+0
9e-5	8.73858e+0	8.73855e+0	8.73580e+0	8.72750e+0	8.71375e+0	8.69466c+0	8.67038e+0	8.64111e+0		8 56855c+0
1e-4	8.63322e+0	8 63320e+0		8.62326e+0	8.61087e+0	8.59366e+0	8.57175e+0	8 54530e+0	8.51449e+0	8 47956c+0
2e-4	7 94018c+0	7.94017e+0	7.93893c+0	7.93519e+0	7.92898e+0	7.92031e+0	7.90923c+0	7.89576e+0		7.86189c+0
3e-4	7.53481e+0	7.53480e+0	7.53398c+0	7.53149c+0	7.52735e+0	7.52156c+0	7.51414e+0	7.50511e+0	7 49450e+0	7.48232e+0
4e-4	7.24723e+0	7.24722e+0	7.24661c+0	7 24474e+0	7.24163e+0	7.23729e+0	7.23172e+0	7.22493e+0	7.21694e+0	7 20776c+0
5e-4	7.02419e+0	7.02418e+0	7.02369e+0	7.02220e+0	7.01971e+0	7.01623e+0	7.01178c+0	7.00634c+0	6.99993e+0	6 99257c+0
6e-4	6.84197c+0	6.84196e+0	6.84155e+0	6.84031e+0	6.83824e+0	6.83534e+0	6.83162e+0	6.82709c+0	6.82175e+0	6.81560c+0
7e-4	6.68791e+0	6.68791e+0	6.68756e+0	6.68649e+0	6.68472c+0	6.68224c+0	6.67905c+0	6.67517c+0	6 67058e+0	6.66531e+0
8e-4	6 55448e+0	6.55448e+0	6.55417e+0	6.55324e+0	6.55169c+0	6.54952e+0	6.54673c+0	6 54333e+0	6.53932e+0	6.53470e+0
9e-4	6 43680c+0	6.43680c+0	6.43652e+0	6 43570c+0	6.43432e+0	6 43239c+0	6 42991e+0	6.42689e+0	6 42333e+0	6 41922c+0
1e-3	6 33154e+0	6.33154c+0	6.33129e+0	6.33055e+0	6.32931e+0	6.32757c+0	6.32534c+0	6 32263c+0	6.31942e+0	6 31572c+0
2e-3	5 63939c+0	5.63939c+0	5.63927e+0	5.63890e+0	5 63828c+0	5 63742e+0	5 63631c+0	5.63496c+0	5.63336e+0	5 63151e+0
3e-3	5.23493e+0	5.23492c+0	5.23484c+0	5 23460c+0	5.23419c+0	5.23362e+0	5 23288c+0	5.23198e+0	5.23092e+0	5.22970e+0
4e-3	4.94824e+0 4.72610e+0	4.94824e+0	4.94818e+0 4.72605e+0	4.94800e+0 4.72590e+0	4.94769c+0	4.94727c+0	4.94672c+0	4.94605c+0	4.94525e+0	4 94434c+0
5e-3	4.72610c+0 4.54477c+0	4.72609e+0 4.54477e+0	4.72603e+0 4.54473e+0	4.72390c+0 4.54461c+0	4.72566c+0 4.54441c+0	4.72532e+0 4.54413e+0	4.72488e+0	4.72435e+0	4.72372c+0	4.72299c+0 4 54219c+0
6e-3 7e-3	4.34477e+0	4.34477e+0 4.39162e+0	4.344/36+0 4.39158e+0	4.344616+0 4.39148e+0	4.39131e+0	4.34413e+0 4.39107e+0	4.54376c+0 4 39076e+0	4.54332e+0 4.39038e+0	4.54280c+0 4.38993c+0	4 34219e+0 4 38942e+0
8e-3	4.39102c+0	4 25908c+0	4.391386+0 4.25905e+0	4.25896c+0	4.39131e+0	4.39107e+0	4.25833e+0	4.25800c+0	4.389930+0 4.25762e+0	4 25717c+0
9e-3	4 14229e+0	4.14229c+0	4.14227e+0	4.14219c+0	4.14206e+0	4.238886+0 4.14187e+0	4.14163e+0	4.23800c+0 4.14134c+0	4.23702e+0 4.14100e+0	4.14060c+0
1e-2	4.03793e+0	4.03793c+0	4.03791c+0	4.03783c+0	4.03772e+0	4.03755e+0	4.14103e+0	4.03708c+0	4.03677e+0	4.14000e+0
2e-2	3.35471e+0	3.35471e+0	3.35470e+0	3.35466e+0	3.35461e+0	3.35453e+0	3.35442c+0	3 35430e+0	3.35415e+0	3 35398c+0
3e-2	2 95912c+0	2.95912e+0	2.95911e+0	2.95909e+0	2.95905e+0	2.95900c+0	2 95894e+0	2.95885c+0	2.95876e+0	2 95865e+0
4e-2	2 68126e+0	2.68126e+0	2 68126e+0	2 68124c+0	2 68122e+0	2 68118c+0	2 68113e+0	2.68107e+0	2 68100e+0	2 68092c+0
5e-2	2 46790e+0	2.46790e+0	2.46789e+0	2.46788e+0	2.46786e+0	2.46783c+0	2.46780e+0	2.46775e+0	2.46770c+0	2.46763e+0
6e-2	2.29531e+0	2.29531e+0	2.29530e+0	2.29529e+0	2.29528e+0	2 29525e+0	2.29522e+0	2.29519e+0	2.29514e+0	2 29509e+0
7e-2	2 15084e+0	2 15084e+0	2.15084e+0	2.15083e+0	2.15081e+0	2 15079e+0	2.15077e+0	2.15074e+0	2.15070e+0	2.15066c+0
8e-2	2 02694e+0	2 02694e+0	2.02694e+0	2.02693c+0	2.02692e+0	2.02690c+0	2.02688e+0	2.02686e+0	2.02682e+0	2 02679e+0
9e-2	1.91874e+0	1.91874c+0	1.91874c+0	1.91874c+0	1 91873e+0	1 91871c+0	1.91869c+0	1 91867e+0	1.91864c+0	1.91861c+0
1e-1	1 82292e+0	1.82292e+0	1.82292e+0	1.82292e+0	1.82291e+0	1.82290e+0	1 82288e+0	1 82286c+0	1 82284e+0	1 82281c+0
2e-1	1 22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22265e+0	1.22264e+0	1 22264e+0	1 22263e+0	1 22262e+0	1.22262e+0	1.22260c+0
3e-1	9.05677e-1	9.05677e-1	9.05676c-1	9 05675e-1	9.05673e-1	9 05670e-1	9 05667e-1	9 05663e-1	9 05657e-1	9 05652e-1
4e-1	7 02380e-1	7 02380e-1	7.02380e-1	7.02379e-1	7.02378e-1	7 02376e-1	7 02374c-1	7.02371e-1	7.02368e-1	7.02365c-1
5e-1	5.59774e-1	5 59774c-1	5.59773e-1	5.59773c-1	5.59772e-1	5.59771c-1	5.59770e-1	5.59768e-1	5 59766c-1	5.59763c-1
6e-1	4.54380e-1	4.54380e-1	4.54379c-1	4 54379e-1	4 54378c-1	4.54378c-1	4 54377e-1	4.54375e-1	4 54374c-1	4.54372e-1
7e-1	3.73769e-1	3.73769e-1	3.73769c-1	3.73769e-1	3.73768e-1	3 73768c-1	3 73767e-1	3 73766e-1	0.373764732	3.73763c-1
8e-1	3 10597e-1	3.10597e-1	3.10597e-1	3.10596e-1	3.10596e-1	3.10596e-1	3 10595e-1	3.10594e-1	0.310593503	3 10593e-1
9e-1	2 60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2.60184e-1	2 60184e-1	2 60183e-1	2 60183e-1	2.60182e-1	0.260181593	2 60181e-1
1e+0	2 19384e-1	2.19384e-1	2 19384e-1	2.19384c-1	2.19384c-1	2.19383c-1	2 19383e-1	2.19383e-1	2 19382e-1	2 19382e-1
2e+0	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005e-2	4.89005c-2	4.89005e-2	4.89004e-2	4 89004c-2	4.89003e-2	4.89003e-2	4.89002c-2
3e+0	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484e-2	1.30484c-2	1.30484e-2	1 30484e-2	1.30484e-2	1.30483e-2	1 30483e-2	1 30483c-2
4e+0	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935c-3	3.77935e-3	3.77935e-3	3.77935c-3	3.77934e-3	3 77934e-3
5e+0	1.14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1.14830e-3	1 14829e-3	1 14829c-3	1.14829e-3	1.14829e-3	1.14829e-3
6e+0	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082c-4	3.60082c-4	3 60082c-4	3.60082e-4	3.60082e-4	3.60082c-4	0 000360082	3.60082e-4
7e+0	1.15482e-4	0 000115482	1.15481c-4							
8e+0	3.76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3 76656e-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3.76656c-5	3.76656e-5	3 76656e-5	3 76656e-5
9e+0	1.24474e-5	1.24474e-5	1.24474e-5	1 24474e-5	1.24474e-5	1.24473e-5	1 24473e-5	1 24473c-5	1 24473e-5	1 24473c-5
1e+1	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15697c-6	4.15697e-6	4.15697e-6	4.15696e-6	4.15696e-6

Значения функции $W(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.009 \div 0.05$

B	0.009	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05
0	9.65316e+0	9.44249e+0	8.63187e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
1e-6	9.65316e+0	9.44249e+0	8.63187e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
2e-6	9.65316e+0	9.44249e+0	8 63187e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706c+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
3e-6	9.65301e+0	9 44246e+0	8.63187e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706c+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
4e-6	9.65209e+0	9.44222e+0	8.63187e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7 24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
5e-6	9.64960e+0	9.44134e+0	8 63187e+0	8.05691e+0	7.61112c+0	7.24706c+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
6e-6	9.64502e+0	9.43940e+0	8.63186e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6 67308c+0	6.43832e+0	6.22847e+0
7e-6	9.63820c+0	9.43611e+0	8.63184e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
8e-6	9 62925e+0	9.43135e+0	8.63176e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0

<i>*</i>	0.009	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05
9e-6	9.61840e+0	9.42514e+0	8.63160e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
1e-5	9.60592e+0	9.41757e+0	8.63132e+0	8.05691e+0	7.61112e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
2e-5	9.43832e+0	9.29608e+0	8.61529e+0	8.05577e+0	7.61108e+0	7.24706e+0	6.93941e+0	6 67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
3e-5	9.26111e+0	9.14994e+0	8.57366e+0	8.04834e+0	7.61022e+0	7.24699e+0	6.93941e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847e+0
4e-5	9.10091e+0	9.01025e+0	8.51675e+0	8.03200e+0	7.60689e+0	7.24650e+0	6.93936e+0	6.67308e+0	6.43832e+0	6.22847c+0
5e-5	8.95911e+0	8.88273e+0	8.45327e+0	8.00802e+0	7.59999e+0	7.24499e+0	6.93910e+0	6.67305e+0	6.43832e+0	6.22847c+0
6e-5	8.83318e+0	8.76727e+0	8.38799e+0	7.97858e+0	7.58939e+0	7.24194e+0	6.93840e+0	6.67291e+0	6.43830e+0	6.22847e+0
7e-5	8.72043e+0	8.66249e+0	8.32329e+0	7.94561e+0	7.57552e+0	7.23711e+0	6.93701e+0	6.67258e+0	6.43823e+0	6.22845e+0
8e-5	8.61858e+0	8.56690e+0	8.26033e+0	7.91051e+0	7.55894e+0	7.23047e+0	6.93476e+0	6.67193e+0	6.43807e+0	6.22842e+0
9e-5	8.52582e+0	8.47920e+0	8.19964e+0	7.87426e+0	7.54025e+0	7.22215e+0	6.93155e+0	6.67087e+0	6.43776e+0	6.22835c+0
1e-4	8.44073e+0	8.39826e+0	8.14142e+0	7.83755e+0	7.51994e+0	7.21230e+0	6.92736e+0	6.66930e+0	6.43725e+0	6.22820e+0
2e-4	7.84161e+0	7.81920e+0	7.67802e+0	7.49721e+0	7.28981e+0	7.06848e+0	6.84394e+0	6.62419e+0	6.41441e+0	6.21733e+0
3e-4	7.46861e+0	7.45340e+0	7.35622e+0	7.22816e+0	7.07595e+0	6.90678e+0	6.72758e+0	6.54445e+0	6.36232e+0	6.18488e+0
4e-4	7.19741e+0	7.18590e+0	7.11186e+0	7.01284e+0	6.89293e+0	6.75670e+0	6.60882e+0	6.45376e+0	6.29548e+0	6.13731e+0
5e-4	6.98426e+0	6.97500e+0	6.91522e+0	6.83455e+0	6.73573e+0	6.62191e+0	6.49642e+0	6.36259e+0	6.22355e+0	6.08211e+0
6e-4	6.80866e+0	6.80092e+0	6.75081e+0	6.68277e+0	6.59877e+0	6.50111e+0	6.39227e+0	6.27482e+0	6.15125e+0	6.02388e+0
7e-4	6.65935e+0	6.65271e+0	6.60957e+0	6.55076e+0	6.47775e+0	6.39227e+0	6.29626e+0	6.19174e+0	6.08072e+0	5.96515e+0
8e-4	6.52948e+0	6.52366e+0	6.48581e+0	6.43403e+0	6.36947e+0	6.29350e+0	6.20766e+0	6.11357e+0	6.01290e+0	5.90728e+0
9e-4	6.41458e+0	6.40940e+0	6.37568e+0	6.32944e+0	6.27159e+0	6.20324e+0	6.12564e+0	6.04013e+0	5.94810e+0	5.85094e+0
1e-3	6.31154e+0	6.30688c+0	6.27648e+0	6.23471c+0	6.18232e+0	6.12021e+0	6.04943e+0	5.97109e+0	5.88638e+0	5.79648e+0
2e-3	5.62943e+0	5.62710e+0	5.61184e+0	5.59067e+0	5.56380e+0	5.53146e+0	5.49394e+0	5.45158e+0	5.40472e+0	5.35376e+0
3e-3	5.22831e+0	5.22676e+0	5.21661e+0	5.20249e+0	5.18448e+0	5.16270e+0	5.13728e+0	5.10838e+0	5.07615e+0	5.04079e+0
4e-3	4.94331e+0	4.94215e+0	4.93456e+0	4.92399e+0	4.91048e+0	4.89410e+0	4.87493e+0	4.85305e+0	4.82855e+0	4.80156e+0
5e-3	4.72217e+0	4.72124e+0	4.71520e+0	4.70677e+0	4.69598e+0	4.68288e+0	4.66751e+0	4.64994e+0	4.63022e+0	4.60844e+0
6e-3	4.54151e+0	4.54075e+0	4.53573e+0	4.52873e+0	4.51976e+0	4.50886e+0	4.49606e+0	4.48140e+0	4.46493e+0	4.44669e+0
7e-3	4.38884e+0	4.38818e+0	4.38390e+0	4.37792e+0	4.37026e+0	4.36094e+0	4.34998e+0	4.33742e+0	4.32329e+0	4.30763e+0
8e-3	4.25666e+0	4.25609e+0	4.25236e+0	4.24715e+0	4.24047e+0	4.23233e+0	4.22277e+0	4.21179e+0	4.19943e+0	4.18572e+0
9e-3	4.14015e+0	4.13965e+0	4.13634e+0	4.13173e+0	4.12581e+0	4.11860e+0	4.11012e+0	4.10039e+0	4.08941e+0	4.07723e+0
1e-2	4.03601e+0	4.03556e+0	4.03260e+0	4.02846e+0	4.02315e+0	4.01669e+0	4.00907e+0	4.00033e+0	3.99047e+0	3.97952e+0
2e-2	3.35378e+0	3.35357e+0	3.35214e+0	3.35015e+0	3.34759e+0	3.34447e+0	3.34078e+0	3.33654e+0	3.33175e+0	3.32641e+0
3e-2	2.95852e+0	2.95838e+0	2.95747e+0	2.95618e+0	2.95453e+0	2.95252e+0	2.95014e+0	2.94740e+0	2.94431e+0	2 94085e+0
4e-2	2.68083e+0	2.68073e+0	2.68006e+0	2.67913e+0	2.67793e+0	2.67647e+0	2.67474e+0	2 67275e+0	2.67050e+0	2.66798e+0
5e-2	2.46756e+0	2.46748e+0	2.46697e+0	2.46624e+0	2.46531e+0	2.46418e+0	2.46284e+0	2.46129e+0	2.45954e+0	2.45759e+0
6e-2	2.29504e+0	2.29497e+0	2.29455e+0	2.29397e+0	2.29321e+0	2.29229e+0	2.29121e+0	2.28996e+0	2.28854e+0	2.28696e+0
7e-2	2.15061e+0	2 15056e+0	2.15021e+0	2 14972e+0	2.14909e+0	2 14833e+0	2.14742e+0	2.14638e+0	2.14520e+0	2.14387e+0
8e-2 9e-2	2.02675e+0 1.91858e+0	2.02670e+0 1.91854e+0	2.02641e+0	2.02599e+0	2.02546e+0	2.02480e+0	2.02403e+0	2.02314e+0	2.02213e+0	2.02101e+0
1e-1	1.82278e+0	1.82274e+0	1.91828e+0 1.82252e+0	1.91792e+0 1.82220e+0	1.91746e+0 1.82180e+0	1.91689e+0 1.82130e+0	1.91622e+0 1.82071e+0	1.91545e+0 1.82004e+0	1 91458e+0 1.81927e+0	1.91361e+0
2e-1	1.22259e+0	1.82274e+0	1.82232e+0	1.82220e+0	1.82180e+0	1.82130e+0	1.820/1e+0	1.82004e+0	1.81927e+0	1.81842e+0 1.22086e+0
3e-1	9.05645e-1	9.05638e-1	9 05589e-1	9.05520e-1	9.05432e-1	9.05325e-1	9.05198e-1	9.05051e-1	9.04885e-1	9.04700e-1
4e-1	7.02360e-1	7.02356e-1	7.02325e-1	7.02283e-1	7.02228e-1	7.02161e-1	7.02082e-1	7.01991e-1	7.01888e-1	7.01772e-1
5e-1	5.59760e-1	5.59757e-1	5.59737e-1	5.59708e-1	5.59672e-1	5.59627e-1	5.59574e-1	5.59512e-1	5.59443e-1	5.59365e-1
6e-1	4.54370e-1	4.54368c-1	4.54354e-1	4.54333e-1	4.54308e-1	4.54276e-1	4.54239e-1	4.54195e-1	4.54147e-1	4.54092e-1
7e-1	3.73762e-1	3.73760e-1	3.73750e-1	3.73735e-1	3.73716e-1	3.73693e-1	3.73666e-1	3.73635e-1	3.73599e-1	3.73559e-1
8e-1	3.10591e-1	3.10590e-1	3.10582e-1	3.10571e-1	3.10557e-1	3.10540e-1	3.10520e-1	3.10496e-1	3.10470e-1	3.10440e-1
9e-1	2.60180e-1	2.60179e-1	2.60173e-1	2.60165e-1	2.60154e-1	2.60141e-1	2.60125e-1	2 60107e-1	2.60087e-1	2.60064e-1
1e+0	2.19381e-1	2.19380e-1	2.19376e-1	2.19369e-1	2.19361e-1	2.19351e-1	2 19338e-1	2.19325e-1	2.19309e-1	2.19291e-1
2e+0	4.89001e-2	4.89000e-2	4.88995e-2	4.88986e-2	4.88976e-2	4.88963e-2	4.88948e-2	4.88930e-2	4 88910e-2	4.88888e-2
3e+0	1.30483e-2	1.30483e-2	1.30482e-2	1.30480e-2	1.30478e-2	1.30476e-2	1.30473e-2	1.30470e-2	1.30466e-2	1.30462e-2
4e+0	3.77934e-3	3.77933e-3	3.77931e-3	3.77927e-3	3.77923e-3	3.77917e-3	3.77911e-3	3.77903e-3	3.77895e-3	3.77885e-3
5e+0	1.14829e-3	1.14829e-3	1.14828e-3	1.14828e-3	1.14826e-3	1.14825e-3	1.14823e-3	1.14822e-3	1.14819e-3	1.14817e-3
6e+0	3.60081e-4	3.60081e-4	3.60079e-4	3.60077e-4	3.60074e-4	3.60071e-4	3.60066e-4	3.60061e-4	3.60056e-4	3.60049e-4
7e+0	1.15481e-4	1.15481e-4	1.15481e-4	1.15480e-4	1.15479e-4	1.15478e-4	1.15477e-4	1.15476e-4	1.15474e-4	1.15472e-4
8e+0	3.76655e-5	3.76655e-5	3.76654e-5	3.76652e-5	3.76650e-5	3.76647e-5	3.76643e-5	3.76639e-5	3.76635e-5	3.76630e-5
9e+0	1.24473e-5	1.24473e-5	1.24473e-5	1.24472e-5	1.24472e-5	1.24471e-5	1.24470e-5	1.24468e-5	1.24467e-5	1 24466e-5
1e+1				4.15693e-6	4.15691e-6	4.15688e-6	4.15685e-6	4.15682e-6	4.15678e-6	4.15673e-6

Значения функции $W(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.055 \div 0.1$

B	0.055	0.06	0.065	0.07	0.075	0.08	0.085	0.09	0.095	0.1
0	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
1e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
2e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964c+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5 17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
3e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
4e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673c+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
5e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414c+0
6e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
7e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
8e-5	6.03878e+0	5.86576e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
9e-5	6.03876e+0	5.86575e+0	5.70673e+0	5.55964e+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
1e-4	6.03872e+0	5.86575e+0	5.70673e+0	5.55964c+0	5.42283e+0	5.29498e+0	5.17501e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0
2e-4	6.03385e+0	5.86369e+0	5.70591e+0	5.55932e+0	5.42271e+0	5.29494e+0	5.17500e+0	5.06203e+0	4.95529e+0	4.85414e+0

		,			,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,					
<i>"</i>	0.055	0.06	0.065	0.07	0.075	0.08	0.085	0.09	0.095	0.1
3e-4	6.01455e+0	5.85271e+0	5.69994e+0	5.55622e+0	5.42117e+0	5.29420e+0	5.17466e+0	5.06188e+0	4.95522e+0	4.85411e+0
4e-4	5.98185e+0	5.83101e+0	5.68602e+0	5.54759e+0	5.41599e+0	5.29120e+0	5.17298e+0	5.06097e+0	4.95474e+0	4.85387e+0
5e-4	5.94064e+0	5.80107e+0	5.66486e+0	5.53303e+0	5.40625e+0	5.28485e+0	5.16895e+0	5.05848e+0	4.95325e+0	4.85299e+0
6e-4	5.89480e+0	5.76578e+0	5.63830e+0	5.51349e+0	5.39219e+0	5.27496e+0	5.16214e+0	5.05390e+0	4.95023e+0	4.85105e+0
7e-4	5.84683e+0	5.72734e+0	5.60808e+0	5.49018c+0	5.37455e+0	5.26187e+0	5.15261e+0	5.04708e+0	4.94545e+0	4.84776e+0
8e-4	5.79826e+0	5.68726e+0	5,57554e+0	5.46420e+0	5.35415e+0	5.24611c+0	5.14064e+0	5.03814e+0	4.93888e+0	4.84301e+0
9e-4	5.74999e+0	5.64651e+0	5.54164e+0	5.43641e+0	5.33170e+0	5.22823e+0	5.12661e+0	5.02730e+0	4.93062e+0	4.83681e+0
1e-3	5.70257e+0	5.60575e+0	5.50707e+0	5.40747e+0	5.30778e+0	5.20873e+0	5.11092e+0	5.01483e+0	4.92084e+0	4.82924e+0
2e-3	5.29910e+0	5.24114e+0	5.18032e+0	5.11704e+0	5.05173e+0	4.98478e+0	4.91658e+0	4.84748e+0	4.77783e+0	4.70793e+0
3e-3	5.00250e+0	4.96149e+0	4.91797e+0	4.87217e+0	4.82432e+0	4.77464e+0	4.72336e+0	4.67071e+0	4.61690e+0	4.56216e+0
4e-3	4.77218e+0	4.74055e+0	4.70679e+0	4.67104e+0	4.63345e+0	4.59415e+0	4.55331e+0	4.51106e+0	4.46756e+0	4.42295e+0
5e-3	4.58465e+0	4.55896e+0	4.53144c+0	4.50219e+0	4.47131e+0	4.43890e+0	4.40505e+0	4.36989e+0	4.33350e+0	4.29599e+0
6e-3	4.42674e+0	4.40514e+0	4.38195e+0	4.35724e+0	4.33108e+0	4.30355e+0	4.27471e+0	4.24464e+0	4.21344e+0	4.18116e+0
7e-3	4.29047e+0	4.27186e+0	4.25185e+0	4.23048e+0	4.20782e+0	4.18392c+0	4.15883e+0	4.13262e+0	4.10533e+0	4.07705e+0
8e-3	4.17068e+0	4.15435e+0	4.13677e+0	4.11797e+0	4.09801e+0	4.07691e+0	4.05473e+0	4.03152e+0	4.00731e+0	3.98217e+0
9e-3	4.06385e+0	4.04932e+0	4.03366e+0	4.01689e+0	3.99906e+0	3.98020e+0	3.96035e+0	3.93953e+0	3.91780e+0	3.89520e+0
1e-2	3.96749e+0	3.95441e+0	3.94029e+0	3.92518e+0	3.90908e+0	3.89204e+0	3.87408e+0	3.85524e+0	3.83554e+0	3.81502e+0
2e-2	3.32052e+0	3.31410e+0	3.30715e+0	3.29967e+0	3.29168e+0	3.28317e+0	3.27417e+0	3.26467e+0	3.25468e+0	3.24422e+0
3e-2	2.93704e+0	2.93288e+0	2.92837e+0	2.92351e+0	2.91830e+0	2.91276e+0	2.90688e+0	2.90067e+0	2.89412e+0	2.88725e+0
4e-2	2.66521e+0	2.66218e+0	2.65889e+0	2.65534e+0	2.65154e+0	2.64749e+0	2.64319e+0	2.63864e+0	2.63385e+0	2.62881e+0
5e-2	2.45543e+0	2.45307e+0	2.45051e+0	2.44775e+0	2.44479c+0	2.44164e+0	2.43829e+0	2.43474e+0	2.43100e+0	2.42707e+0
6e-2	2.28521e+0	2.28330e+0	2.28122e+0	2.27898e+0	2.27658e+0	2.27402e+0	2.27130e+0	2.26842e+0	2.26538e+0	2.26219e+0
7e-2	2.14242 c+ 0	2.14082e+0	2.13909e+0	2.13722e+0	2.13522e+0	2.13308e+0	2.13081e+0	2.12840e+0	2.12586e+0	2.12319e+0
8e-2	2 01977e+0	2.01841e+0	2 01693e+0	2.01534e+0	2.01363e+0	2.01181e+0	2.00987e+0	2.00782e+0	2.00565e+0	2.00337e+0
9e-2	1.91253e+0	1.91135e+0	1.91007e+0	1.90869e+0	1.90721e+0	1.90563e+0	1.90395c+0	1.90217e+0	1.90029e+0	1.89832e+0
1e-1	1.81747e+0	1.81644e+0	1.81532e+0	1.81410e+0	1.81280e+0	1.81142e+0	1.80994e+0	1.80838e+0	1.80673e+0	1.80499e+0
2e-1	1.22048e+0	1.22007e+0	1.21962e+0	1.21914c+0	1.21862e+0	1.21807e+0	1 21748e+0	1.21685e+0	1.21620e+0	1 21550e+0
3e-1	9.04495e-1	9.04271e-1	9.04027e-1	9.03764e-1	9.03481e-1	9.03179c-1	9.02858c-1	9.02517e-1	9.02157e-1	9.01778c-1
4e-1	7.01644e-1	7.01505e-1	7.01353e-1	7.01189e-1	7.01013e-1	7.00825c-1	7.00624c-1	7.00412e-1	7.00188e-1	6.99952e-1
5e-1	5.59280e-1	5.59186e-1	5.59084e-1	5.58974e-1	5.58856e-1	5.58729e-1	5.58595c-1	5.58453e-1	5.58302e-1	5.58143e-1
6e-1	4.54032e-1	4.53965e-1	4.53894e-1	4.53816e-1	4.53733e-1	4.53644e-1	4.53549e-1	4.53448e-1	4.53342e-1	4.53230e-1
7e-1	3.73515e-1	3.73467e-1	3.73415e-1	3.73358e-1	3.73297e-1	3.73232e-1	3.73163e-1	3.73090e-1	3.73012e-1	3.72931e-1
8e-1	3.10407e-1	3.10371e-1	3.10332e-1	3.10289e-1	3.10244c-1	3.10195e-1	3.10143e-1	3.10089e-1	3.10031e-1	3.09970e-1
9e-1	2.60039e-1	2.60012e-1	2.59982e-1	2.59949e-1	2.59915e-1	2.59878e-1	2.59838e-1	2.59796e-1	2.59752e-1	2.59706e-1
1e+0	2.19272e-1	2.19250e-1	2.19227e-1	2.19202e-1	2.19175e-1	2.19146e-1	2.19116e-1	2.19083c-1	2.19049e-1	2.19013e-1
2e+0	4.88863e-2	4.88836e-2	4.88807e-2	4.88775e-2	4.88741e-2	4.88705e-2	4.88666e-2	4.88625e-2	4.88582e-2	4.88536e-2
3e+0	1.30457e-2	1.30452e-2	1.30446e-2	1.30440e-2	1.30434c-2	1.30427e-2	1.30420e-2	1.30412c-2	1.30404e-2	1.30395e-2
4e+0	3.77875e-3	3.77863e-3	3.77851e-3	3.77837e-3	3.77823e-3	3.77807e-3	3.77791e-3	3.77773e-3	3.77755e-3	3.77735e-3
5e+0	1.14814e-3	1.14812e-3	1.14809e-3	1.14805e-3	1.14802e-3	1.14798e-3	1.14794c-3	1.14789e-3	1.14785e-3	1.14780e-3
6e+0	3.60042e-4	3.60035e-4	3.60026e-4	3.60017e-4	3.60008e-4	3.59998e-4	3.59987e-4	3.59975e-4	3.59963e-4	3.59950e-4
7e+0	1.15471e-4	1.15468e-4	1.15466e-4	1.15464e-4	1.15461c-4	1.15458e-4	1.15455e-4	1.15452e-4	1.15448e-4	1.15445e-4
8e+0	3.76624e-5	3.76618e-5	3.76611e-5	3.76604e-5	3.76596e-5	3.76588e-5	3.76579e-5	3.76570e-5	3.76560e-5	3.76550e-5
9e+0	1.24464e-5	1.24462e-5	1.24460e-5	1.24458e-5	1.24456e-5	1.24453e-5	1.24451e-5	1.24448e-5	1.24445e-5	1.24442e-5
1e+1	4.15668e-6	4.15662e-6	4.15656e-6	4.15650e-6	4.15643e-6	4.15636e-6	4.15628e-6	4.15619e-6	4.15610e-6	4.15601e-6

Значения функции $W(u, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.15 \div 0.6$

<										
" P	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
0	4.06006e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504e+0
1e-4	4.06006e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314c+0	1.55504e+0
2e-4	4.06006e+0	3.50541e+0	3.08301c+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583c+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
3e-4	4.06006e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504e+0
4e-4	4.06006e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504e+0
5e-4	4.06005e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
6e-4	4.06005e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504c+0
7e-4	4.06002e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504e+0
8e-4	4.05994c+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
9e-4	4.05979e+0	3.50541e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
1e-3	4.05950e+0	3.50540e+0	3.08301e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884c+0	1.69314e+0	1.55504e+0
2e-3	4.04350e+0	3.50426e+0	3.08297e+0	2.74492e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
3e-3	4.00198c+0	3.49685e+0	3.08212e+0	2.74485e+0	2.46541e+0	2.22906e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
4e-3	3.94526e+0	3.48057e+0	3.07879e+0	2.74437e+0	2.46536e+0	2.22905e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
5e-3	3.88207e+0	3.45669e+0	3.07192e+0	2.74286e+0	2.46510e+0	2.22902e+0	2.02583e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
6e-3	3.81714e+0	3.42742e+0	3.06139e+0	2.73982e+0	2.46440e+0	2.22889e+0	2.02581e+0	1.84884e+0	1.69314e+0	1.55504e+0
7e-3	3.75285e+0	3.39466e+0	3.04760e+0	2.73502e+0	2.46302e+0	2.22856e+0	2.02574e+0	1.84882e+0	1.69313e+0	1.55504e+0
8e-3	3.69036e+0	3.35982e+0	3.03114e+0	2.72844e+0	2.46079e+0	2.22792e+0	2.02558e+0	1.84879e+0	1.69313e+0	1.55504e+0
9e-3	3.63018e+0	3.32388e+0	3 01261e+0	2.72018e+0	2.45761e+0	2.22686e+0	2.02528e+0	1.84872e+0	1.69311e+0	1.55504e+0
1e-2	3.57251e+0	3.28750e+0	2.99249e+0	2.71043e+0	2.45346e+0	2.22531e+0	2.02477e+0	1.84857e+0	1.69308e+0	1.55503e+0
2e-2	3.11578e+0	2.95212e+0	2.76577e+0	2.56877e+0	2.37131e+0	2.18090e+0	2.00230e+0	1.83788e+0	1.68829e+0	1.55301e+0
3e-2	2.80176e+0	2.68960e+0	2.55711e+0	2.41102e+0	2.25781e+0	2.10312e+0	1.95150e+0	1.80624e+0	1.66947e+0	1.54231e+0
4e-2	2.56567e+0	2.48158e+0	2.38030e+0	2.26604e+0	2.14309e+0	2.01553e+0	1.88694e+0	1.76029e+0	1.63789e+0	1.52135e+0
5e-2	2.37757e+0	2.31103e+0	2.22993e+0	2.13711e+0	2.03558e+0	1.92833e+0	1.81814e+0	1.70750e+0	1.59848e+0	1.49272e+0

\\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\										
"	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
6e-2	2.22185e+0	2.16728e+0	2.10021e+0	2.02270e+0	1.93695e+0	1.84521e+0	1.74967e+0	1.65236e+0	1.55507e+0	1.45931e+0
7e-2	2.08940e+0	2.04348e+0	1.98672e+0	1.92064e+0	1.84691e+0	1.76730e+0	1.68354e+0	1.59730e+0	1 51009e+0	1.42327e+0
8e-2	1.97448e+0	1.93509e+0	1.88618e+0	1.82893e+0	1.76464e+0	1.69472e+0	1 62057e+0	1.54356e+0	1.46500e+0	1.38605e+0
9e-2	1.87323e+0	1.83893e+0	1.79619e+0	1.74595e+0	1.68924e+0	1.62721e+0	1.56100e+0	1.49177e+0	1.42063e+0	1.34859e+0
1e-1	1.78293e+0	1.75270e+0	1.71493e+0	1.67037e+0	1.61987e+0	1.56436e+0	1.50481e+0	1.44220e+0	1.37746e+0	1.31149e+0
2e-1	1.20664e+0	1.19438c+0	1.17885e+0	1.16022e+0	1.13871e+0	1.11453e+0	1.08794e+0	1.05920e+0	1.02860e+0	9.96412e-1
3e-1	8.96933e-1	8.90205e-1	8.81645e-1	8.71322e-1	8.59313e-1	8.45711e-1	8.30617e-1	8.14142e-1	7.96402e-1	7.77522e-1
4e-1	6.96930e-1	6.92726e-1	6.87365e-1	6.80880e-1	6.73309e-1	6.64699e-1	6.55099e-1	6.44565e-1	6.33158e-1	6.20941e-1
5e-1	5.56113e-1	5.53285e-1	5.49673e-1	5.45297e-1	5.40176e-1	5.34337e-1	5.27809e-1	5.20622e-1	5.12811e-1	5.04413e-1
6e-1	4.51799e-1	4.49803e-1	4.47252e-1	4.44156c-1	4.40529e-1	4.36386e-1	4.31744e-1	4.26623e-1	4.21043e-1	4.15028e-1
7e-1	3.71886e-1	3.70429e-1	3.68566e-1	3.66302e-1	3.63647e-1	3.60611e-1	3.57204e-1	3.53439e-1	3.49329e-1	3.44890e-1
8e-1	3.09188c-1	3.08097e-1	3.06701e-1	3.05004e-1	3.03012e-1	3.00732e-1	2.98171e-1	2.95337e-1	2.92239e-1	2.88888e-1
9e-1	2.59109e-1	2.58276e-1	2.57210e-1	2.55913e-1	2.54390e-1	2.52644e-1	2.50682e-1	2.48509e-1	2.46131e-1	2.43556e-1
1e+0	2.18550e-1	2.17904e-1	2.17077e-1	2.16070e-1	2.14887e-1	2.13531e-1	2.12005e-1	2.10314e-1	2.08462e-1	2.06453e-1
2e+0	4.87951e-2	4.87132e-2	4.86082e-2	4.84802e-2	4.83293e-2	4.81558e-2	4.79600e-2	4.77422e-2	4.75026e-2	4.72416e-2
3e+0	1.30284e-2	1.30130e-2	1.29931e-2	1.29688e-2	1.29402e-2	1.29073e-2	1.28701e-2	1.28286e-2	1.27829e-2	1.27331e-2
4e+0	3.77486e-3	3.77137e-3	3.76688e-3	3.76141e-3	3.75495e-3	3.74751e-3	3.73910e-3	3.72972e-3	3.71938e-3	3.70809e-3
5e+0	1.14718e-3	1.14630e-3	1.14519e-3	1.14382e-3	1.14221e-3	1.14035e-3	1.13825e-3	1.13591e-3	1.13332e-3	1.13050e-3
6e+0	3.59784e-4	3.59552e-4	3.59255e-4	3.58891e-4	3.58462e-4	3.57967e-4	3.57407e-4	3.56783e-4	3.56094e-4	3.55340e-4
7e+0	1.15399e-4	1.15334e-4	1.15251e-4	1.15150e-4	1.15030e-4	1.14892e-4	1.14736e-4	1.14561c-4	1.14369e-4	1.14159e-4
8e+0	3.76416e-5	3.76230e-5	3.75990e-5	3.75697e-5	3.75352e-5	3.74953e-5	3.74502e-5	3.73999e-5	3.73443e-5	3.72835e-5
9e+0	1.24402e-5	1.24347e-5	1.24276e-5	1.24189e-5	1.24087e-5	1.23969e-5	1.23835e-5	1.23686e-5	1.23521e-5	1.23340e-5
1e+1	4.15481e-6	4.15314e-6	4.15099e-6	4.14836e-6	4.14526e-6	4.14168e-6	4.13762e-6	4.13310e-6	4.12810e-6	4.12264e-6

Значения функции $W(u,\beta)$ для аргумента $\beta=0.65\div 1.5$

					,, ,		-			
u B	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.25	1.5
0	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611c-1
1e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
2e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
3e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893 c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
4e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
5e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
6e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1 13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
7e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
8e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
9e-3	1.43175e+0	1.32104e+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893c-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
1e-2	1.43174e+0	1.32104c+0	1.22116e+0	1.13069e+0	1.04845e+0	9.73461e-1	9.04893e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
2e-2	1.43093e+0	1.32073e+0	1.22106e+0	1.13066e+0	1.04844e+0	9.73457e-1	9.04892e-1	8.42049e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
3e-2	1.42512e+0	1.31771e+0	1.21955e+0	1.12994e+0	1.04811e+0	9.73311e-1	9.04831e-1	8.42024e-1	5.95206e-1	4.27611e-1
4e-2	1.41168c+0	1.30937e+0	1.21455e+0	1.12704e+0	1.04649e+0	9.72430e-1	9.04367e-1	8.41788e-1	5.95201e-1	4.27611e-1
5e-2	1.39144e+0	1.29546e+0	1.20524e+0	1.12097e+0	1.04263e+0	9.70051e-1	9.02936e-1	8.40949e-1	5.95162e-1	4.27610e-1
6e-2	1.36630e+0	1.27696e+0	1.19192e+0	1.11160e+0	1.03619e+0	9.65715e-1	9.00083e-1	8.39112e-1	5.95016e-1	4.27603e-1
7e-2	1.33797e+0	1.25510e+0	1.17539e+0	1.09933e+0	1.02725e+0	9.59326e-1	8.95602e-1	8.36029e-1	5.94657e-1	4 27577e-1
8e-2	1.30775e+0	1.23098e+0	1.15645c+0	1.08470e+0	1.01614c+0	9.51023e-1	8.89501e-1	8.31618e-1	5.93976e-1	4.27507e-1
9e-2	1.27659e+0	1.20544e+0	1.13581c+0	1.06827e+0	1.00325e+0	9.41058e-1	8.81908e-1	8.25917e-1	5.92883e-1	4.27361e-1
1e-1	1.24512e+0	1.17909e+0	1.11405c+0	1.05052e+0	9.88965e-1	9.29712e-1	8.73013e-1	8.19035e-1	5.91314e-1	4.27103e-1
2e-1	9.62932e-1	9.28441e-1	8.93216e-1	8.57524e-1	8.21616e-1	7.85726e-1	7.50070e-1	7.14842e-1	5.50395e-1	4.13495e-1
3e-1	7.57630e-1	7.36857e-1	7.15334e-1	6.93193e-1	6.70563e-1	6.47572e-1	6.24340e-1	6.00986e-1	4.85987e-1	3.81201e-1
4e-1	6.07981e-1	5.94348e-1	5.80112e-1	5.65347e-1	5.50125e-1	5.34518e-1	5.18598e-1	5.02437e-1	4.20305e-1	3.41137e-1
5e-1	4.95466e-1	4.86011e-1	4.76090e-1	4.65746e-1	4.55023e-1	4.43965e-1	4.32618e-1	4.21024e-1	3.60876e-1	3.00664e-1
6e-1	4.08601e-1	4.01787e-1	3.94614e-1	3.87107e-1	3.79296e-1	3.71209e-1	3.62875e-1	3.54322e-1	3.09295e-1	2.62981e-1
7e-1	3.40137e-1	3.35087e-1	3.29756e-1	3.24163e-1	3.18327e-1	3.12267e-1	3.06002e-1	2.99552e-1	2.65221e-1	2 29182e-1
8e-1	2.85294e-1	2.81469e-1	2.77423e-1	2.73170e-1	2.68723e-1	2.64094e-1	2.59297e-1	2.54345e-1	2 27767e-1	1.99420e-1
9e-1	2.40790e-1	2.37842e-1	2.34720e-1	2.31432e-1	2.27988e-1	2.24397e-1	2.20669e-1	2.16813e-1	1.95973e-1	1.73460e-1
1e+0	2.04294e-1	2.01991e-1	1.99548e-1	1.96972e-1	1.94270e-1	1.91448e-1	1.88514e-1	1.85475e-1	1.68956e-1	1.50924e-1
2e+0	4.69596e-2	4.66571e-2	4.63344e-2	4.59921e-2	4.56306e-2	4.52504e-2	4.48521e-2	4.44362e-2	4.21145e-2	3.94483e-2
3e+0	1.26792e-2	1.26212e-2	1.25592e-2	1.24933e-2	1.24236e-2	1.23500e-2	1.22727e-2	1.21918e-2	1.17357e-2	1.12019e-2
4e+0	3.69585e-3	3.68269e-3	3.66860e-3	3.65361e-3	3.63771e-3	3.62093e-3	3.60327e-3	3.58476e-3	3.47982e-3	3.35582e-3
5e+0	1.12744e-3	1.12414e-3	1.12061e-3	1.11685e-3	1.11286e-3	1.10865e-3	1.10421e-3	1.09955e-3	1.07306e-3	1.04157e-3
6e+0	3.54524e-4	3.53644e-4	3.52701e-4	3.51696e-4	3.50629e-4	3.49502e-4	3.48314e-4	3.47066e-4	3.39954e-4	3.31462e-4
7e+0	1.13930e-4	1.13685e-4	1.13421e-4	1.13140e-4	1.12842e-4	1.12526e-4	1.12194e-4	1.11844e-4	1.09849e-4	1.07459e-4
8e+0	3.72176e-5	3.71465e-5	3.70703e-5	3.69891e-5	3.69028e-5	3.68114e-5	3.67151e-5	3.66139e-5	3.60354e-5	3.53408e-5
9e+0	1.23145e-5	1.22934e-5	1.22708e-5	1.22466e-5	1.22210e-5	1.21939e-5	1.21652e-5	1.21352e-5	1.19630e-5	1.17560e-5
1e+1	4.11671e-6	4.11031e-6	4.10346e-6	4.09614e-6	4.08836e-6	4.08013e-6	4.07145e-6	4.06231e-6	4.01003e-6	3.94704e-6

Значения функции $W(u,\beta)$ для аргумента $\beta=1.75\div4.0$

B	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4.0
0	3.10760e-1	2.27788e-1	1.68086c-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2.23194e-2
1e-2	3.10760e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3 91978e-2	2 95485e-2	2.23194e-2
2e-2	3.10760e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978e-2	2 95485e-2	2 23194e-2
3e-2	3.10760e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5 21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2.23194e-2
4e-2	3.10760e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098c-2	6.94790c-2	5.21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2.23194e-2
5e-2	3.10760e-1	2 27788e-1	1.68086c-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2.23194e-2
6e-2	3 10759e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978c-2	2.95485e-2	2.23194e-2
7e-2	3.10758e-1	2.27788e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5 21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2 23194e-2
8e-2	3.10753e-1	2.27787e-1	1.68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978c-2	2.95485e-2	2 23194e-2
9e-2	3.10740e-1	2.27787c-1	1 68086c-1	1 24695e-1	9 29098e-2	6.94790e-2	5 21175e-2	3 91978e-2	2 95485e-2	2 23194c-2
1e-1	3.10709c-1	2.27784e-1	1 68086e-1	1.24695e-1	9.29098e-2	6.94790e-2	5.21175e-2	3.91978e-2	2.95485e-2	2.23194e-2
2e-1	3.06823e-1	2.26822e-1	1.67879e-1	1.24656e-1	9 29035e-2	6 94781e-2	5.21174e-2	3 91978c-2	2.95485e-2	2 23194e-2
3e-1	2 92423e-1	2.21092e-1	1.65837e-1	1.24002e-1	9.27145e-2	6.94288c-2	5.21057e-2	3.91953e-2	2.95480c-2	2.23193e-2
4e-1	2.70038e-1	2.09623e-1	1 60442e-1	1.21670e-1	9.17864e-2	6 90884c-2	5.19905e-2	3 91593e-2	2.95376e-2	2.23165e-2
5e-1	2.44314e-1	1.94358e-1	1.51981e-1	1.17287e-1	8.96637e-2	6.81266c-2	5.15826c-2	3.89972e-2	2.94772e-2	2 22954e-2
6e-1	2.18303e-1	1.77391e-1	1 41520e-1	1.11189e-1	8.63023e-2	6 63739e-2	5.07179e-2	3 85934e-2	2.92987e-2	2.22207e-2
7e-1	1.93599e-1	1 60182e-1	1.30092e-1	1.03954e-1	8.19352c-2	6.38601e-2	4.93378e-2	3.78706e-2	2.89376e-2	2.20485c-2
8e-1	1.70916e-1	1.43598e-1	1 18462e-1	9 61296e-2	7 68848e-2	6.07323e-2	4.74791e-2	3.68106e-2	2.83574e-2	2.17437e-2
9e-1	1.50486e-1	1.28100e-1	1.07129e-1	8.81419c-2	7.14571e-2	5.71767e-2	4.52335e-2	3.54432c-2	2.75545e-2	2 12891e-2
1e+0	1.32296e-1	1.13894c-1	9.63930e-2	8.02904e-2	6.59007e-2	5.33714e-2	4.27114e-2	3.38255e-2	2.65502e-2	2 06856e-2
2e+0	3 65238e-2	3.34298e-2	3 02531e-2	2.70749e-2	2.39670c-2	2.09902e-2	1.81922e-2	1.56082e-2	1.32604c-2	1.11597e-2
3e+0	1.06032e-2	9.95316e-3	9.26585e-3	8.55529e-3	7.83499e-3	7.11749e-3	641411e-3	5.73464e-3	5.08720e-3	4.47820e-3
4e+0	3 21506e-3	3.06011e-3	2.89369e-3	2.71860e-3	2.53762c-3	2.35347e-3	2.16875e-3	1.98583e-3	1.80686c-3	1.63372e-3
5e+0	1 00555e-3	9.65559c-4	9.22185e-4	8.76043e-4	8.27766c-4	7.77984e-4	7 27314e-4	6.76346e-4	6 25635e-4	5.75688e-4
6e+0	3.21702c-4	3.10801e-4	2.98898e-4	2.86140e-4	2.72678e-4	2.58668e-4	2 44265e-4	2.29620c-4	2.14877e-4	2 00176e-4
7e+0	1.04702c-4	1.01610c-4	9.82168e-5	9 45595c-5	9.06769e-5	8.66089e-5	8.23959e-5	7.80778e-5	7 36940e-5	6.92823e-5
8e+0	3.45372e-5	3.36329e-5	3 26369e-5	3.15588e-5	3.04089e-5	2.91979e-5	2 79366e-5	2.66361e-5	2 53070e-5	2.39602e-5
9e+0	1.15159e-5	1.12450c-5	1.09458e-5	1.06208c-5	1.02729e-5	9.90505e-6	9.52020c-6	9.12145e-6	8 71187e-6	8.29449e-6
1e+1	3.87387e-6	3.79115e-6	3.69954e-6	3.59979e-6	3.49268e-6	3.37904e-6	3.25973e-6	3.13563c-6	3.00762e-6	2.87659c-6

Значения функции $W(u,\beta)$ для аргумента $\beta=4.5\div10.0$

B	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	10.0
0	1.27997e-2	7.38220c-3	4.27742e-3	2.48799e-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1 01763e-4	3.55601e-5
1e-1	1.27997e-2	7.38220c-3	4.27742e-3	2.48799e-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
2e-1	1.27997c-2	7.38220c-3	4.27742e-3	2.48799c-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
3e-1	1 27997c-2	7.38220c-3	4.27742e-3	2.48799e-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
4e-1	1.27996e-2	7.38219c-3	4.27742e-3	2.48799e-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355c-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
5e-1	1.27974e-2	7.38202e-3	4 27741e-3	2.48799e-3	1 45186c-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2 92941e-4	1.01763e-4	3 55601e-5
6e-1	1.27863e-2	7.38068c-3	4.27728e-3	2.48798e-3	1.45186e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2 92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
7e-1	1.27522e-2	7 37508e-3	4.27651e-3	2.48789e-3	1.45185e-3	8.49591e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
8e-1	1 26778e-2	7.35964e-3	4 27378c-3	2.48748e-3	1.45180e-3	8.49585e-4	4.98355e-4	2.92941e-4	1.01763e-4	3.55601e-5
9e-1	1 25471e-2	7.32711c-3	4 26677e-3	2.48617e-3	1.45159e-3	8.49555e-4	4 98351e-4	2.92941e-4	1 01763e-4	3.55601e-5
1e+0	1.23495e-2	7.27031e-3	4.25243e-3	2.48299c-3	1.45097e-3	8.49449e-4	4.98335e-4	2.92939e-4	1 01763e-4	3.55601e-5
2e+0	7.69481e-3	5.13436e-3	3.32815e-3	2.10468e-3	1.30423e-3	7.95470e-4	4.79501e-4	2.86709e-4	1.01183e-4	3.55170e-5
3e+0	3 39248e-3	2.49588e-3	1.78557e-3	1.24399e-3	8.45441e-4	5.61557e-4	3.65308e-4	2.33272e-4	9.08375e-5	3.38082e-5
4e+0	1.31093e-3	1.02646e-3	7.84672e-4	5.85975e-4	4.27775e-4	3.05519e-4	2.13667e-4	1.46471e-4	6.51198e-5	2.71275e-5
5e+0	4.79849e-4	3.91754e-4	3.13345e-4	2.45616e-4	1.88737e-4	1.42228e-4	1.05154e-4	7.63115e-5	3 80922e-5	1.77801e-5
6e+0	1.71394e-4	1.44149e-4	1.19101e-4	9.66885e-5	7.71379e-5	6.04894e-5	4.66344e-5	3.53556e-5	1.93482e-5	9.93995e-6
7e+0	6 05162e-5	5.20363e-5	4.40515e-5	3.67176e-5	3.01364e-5	2.43591e-5	1.93928e-5	1.52087e-5	8.94741e-6	4.96746e-6
8e+0	2.12534e-5	1.85910e-5	1.60374e-5	1.36443e-5	1.14493e-5	9.47645e-6	7.73732e-6	6.23233e-6	3.88410e-6	2.29596e-6
9e+0	7.44808c-6	6.60452e-6	5.78354 c -6	5.00172e-6	4.27204c-6	3.60381e-6	3.00277e-6	2.47139e-6	1.61387e-6	1.00415e-6
1e+1	2.60893e-6	2.33929e-6	2.07374e-6	1.81754e-6	1.57502e-6	1.34950e-6	1.14331e-6	9.57793e-7	6.50008e-7	4.21976e-7

П р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Hantush, Jacob, 1955b; Hantush, 1964c; Case, Addiego, 1977; Hunt, 1977; Cnpaвoчник..., 1979; Walton, 1984; Srivastava, Guzman-Guzman, 1998.

Функция $W_1(u,\beta)$

Функция:
$$W_1(u,\beta) = \frac{\beta}{2} \int_{u}^{\infty} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^2}$$
.

Предельное значение функции: $W_1(0,\beta) = 2K_1(\beta)$.

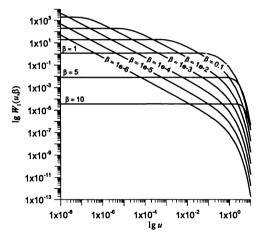


Рис. П28. Зависимость логарифма функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

Аппроксимация (для практических диапазонов аргументов функции) [Hantush, 1967c]:

Аппроксимация (д	рія практических диапазонов арі ументов функции) [Tamash, 1907c].
Диапазон	Зависимость
$u \leq 0.1$	$W_1(u,\beta) \approx 2K_1(\beta) - \frac{2}{\beta} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4u}\right) + 0.5\beta W\left(\frac{\beta^2}{4u}\right)$
$\frac{\beta}{2u} < 0.1$	$W_1(u,\beta) \approx 0.5\beta \left[\frac{\exp(-u)}{u} - W(u) \right]$

Условные обозначения:

 $K_1(\beta)$ – функция Бесселя (Приложение 2);

W(u) — функция влияния скважины (Приложение 26).

Значения функции $W_1(u, \beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u = 0, u = 10^{-8} \div 10.0$; $\beta = 10^{-6} \div 10$.

Значения функции $W_1(u, \beta)$ для аргумента $\beta = 10^{-6} \div 0.2$

N.	0.000001	0.000002	0.000005	0.00001	0.00002	0.00005	0.0001	0.0002	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2
0	2.00000e+6	1.00000e+6	4.00000e+5	2.00000e+5	1.00000e+5	4.00000c+4	2.00000e+4	1.00000c+4	4.00000e+3	1.99999e+3	9.99986e+2	3.99970e+2	1.99948c+2	9.99094c+1	3.98193c+1	1.97077e+1	9.55195e+0
1e-8	4.99994c+1	9.99950e+1	2.49922e+2	4.99375e+2	9.95016e+2	2.42348e+3	4.42398e+3	6.32120e+3	3.99227e+3	1.99999e+3	9.99986e+2	3.99970e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
2e-8	2.49998e+1	4.99987e+1	1.24980c+2	2.49844e+2	4.98752e+2	1.23067e+3	2.35006e+3	3.93469e+3	3.82425e+3	1.99999e+3	9.99986e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
3e-8	1.66666e+1	3.33328e+1	8.33246e+1	1.66597e+2	3.32778e+2	8.24712e+2	1.59911e+3	2.83469e+3	3.50194e+3	1.99951e+3	9.99986e+2	3.99970e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
4e-8		2.49997e+1	6.24951e+1	1.24961c+2	2.49688e+2	6.20142e+2	1.21174c+3	2.21199e+3	3.16155e+3	1.99613e+3	9.99986e+2	3.99970e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
_5e-8			4.99968e+1	9.99749c+1	1.99800e+2	4.96888e+2	9.75411e+2	1.812 69c+ 3	2.85398e+3	1.98652e+3	9.99986c+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
6e-8	8.33331e+0	1.66665e+1	4.16645e+1	8.33159e+1	1.66528e+2	4.14504c+2	8.16210e+2	1.53518e+3	2.58853e+3	1.96898e+3	9.99986e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
_7e-8	7.14284c+0	1.42856c+1	3.57126e+1	7.14157e+1		3.55553e+2	7.01680c+2	1.33122e+3	2.36206e+3	1.94376e+3	9.99986e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
	6.24998e+0	1.24999c+1	3.12487e+1	6.24902c+1		3.11282e+2	6.15334c+2	1.17503e+3	2.16866e+3	1.91212e+3	9.99983e+2	3.99970c+2		9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
<u>9e-8</u>	5.55554e+0	1.11110c+1	2.77768e+1	5.55478e+1	1.11049e+2		5.47910c+2	1.05161e+3	2.00259e+3	1.87564e+3	9.99971e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
16-7	4.99999e+0	9.99993e+0			9.99499e+1	2.49220c+2		9.51624c+2	1.85895e+3	1.83582e+3	9.99941c+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
_2e-7	2.49999e+0	4.99997e+0		2.49984c+1	4.99873e+1	1.24804e+2	2.48443e+2	4.87704c+2	1.07353e+3	1.42698e+3	9.93248e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
<u>3e-7</u>	1.66666e+0	3.33331e+0		1.66659e+1			1.65973e+2	3.27837e+2	7.52251e+2	1.13080c+3	9.64312e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
<u>4e-7</u>	1.24999e+0	2.49998e+0		1.24995e+1	2.49967e+1	6.24508e+1	1.24609e+2	2.46899e+2	5.78615e+2	9.29470e+2	9.17901e+2	3.99970c+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
_5e-7	9.99992e-1	1.99998e+0		9.99968e+0	1.99979e+1		9.97497e+1	1.98012e+2	4.70009e+2	7.86931e+2	8.64651e+2	3.99969e+2	1.99948c+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
6e-7	8.33326e-1	1.66665e+0	4.16661e+0	8.33309c+0	1.66651e+1	4.16446e+1	8.31592e+1	1.65284c+2	3.95696e+2	6.81512e+2	8.11111e+2	3.99958e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
<u> 7e-7</u>	7.14278c-1	1.42856e+0	3.57138e+0	7.14266e+0	1.42845e+1	3.56980e+1	7.13004e+1	1.41840e+2	3.41659e+2	6.00648e+2	7.60335e+2	3.99917e+2	1.99948e+2	9.99094e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
8e-7	6.24993e-1	1.24998e+0	3.12495e+0	6.24983e+0	1.24991e+1	3.12374c+1	6.24017e+1	1.24221e+2	3.00601e+2	5.36762e+2	7.13482e+2	3.99809e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
9e-7	5.55548e-1	1.11110c+0	2.77773e+0	5.55541e+0	1.11104e+1	2.77678e+1	5.54777e+1	1.10495e+2	2.68349e+2	4.85063e+2	6.70794e+2	3.99585e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
<u> 1e-6</u>	4.99993e-1	9.99985e-1	2.49996e+0	4.99987e+0	9.99936e+0	2.49918e+1	4.99368e+1	9.95002e+1	2.42344e+2	4.42391e+2	6.32107e+2	3.99198e+2	1.99948e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
2e-6	2.49993e-1	4.99986e-1	1.24996e+0	2.49992e+0	4.99974e+0	1.24977e+1	2.49837e+1	4.98739e+1	1.23064e+2	2.34999e+2	3.93456e+2	3.82396e+2	1.99947e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
3e-6	1.66660e-1	3.33320e-1	8.33300e-1	1.66659e+0	3.33315e+0	8.33214e+0	1.66591e+1	3.32765e+1	8.24680e+1	1.59905e+2	2.83456e+2	3.50165e+2	1.99900e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
4e-6	1.24994e-1	2.49987e-1	6.24967e-1	1.24993e+0	2.49984c+0	6.24919e+0	1.24955e+1	2.49675e+1	6.20110c+1	1.21167e+2	2.21187e+2	3.16126e+2	1.99562e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
5e-6	9.99937e-2	1.99987e-1	4.99968e-1	9.99934e-1	1.99985e+0	4.99937e+0	9.99687e+0	1.99788e+1	4.96856c+1	9.75349e+1	1.81257e+2	2.85369e+2	1.98600e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
6e-6	8.33271e-2	1.66654e-1	4.16635e-1	8.33269e-1	1.66653e+0	4.16614e+0	8.33098e+0	1.66515e+1	4.14473e+1	8.16149e+1	1.53506e+2	2.58825e+2	1.96847e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
7e-6	7.14224e-2	1.42845e-1	3.57112e-1	7.14223e-1	1.42844e+0	3.57096e+0	7.14097e+0	1.42743e+1	3.55522e+1	7.01620e+1	1.33110e+2	2.36177e+2	1.94325e+2	9.99094c+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
8e-6	6.24939e-2	1.24988c-1	3.12469e-1	6.24938e-1	1.24987e+0	3.12457e+0	6.24842e+0	1.24910c+1	3.11252e+1	6.15275e+1	1.17491e+2	2.16838e+2	1.91160e+2	9.99091e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
9e-6	5.55495e-2	1.11099e-1	2.77748e-1	5.55495e-1	1.11098e+0	2.77738e+0	5.55418c+0	1.11037e+1	2.76785e+1	5.47850e+1	1.05149e+2	2.00231e+2	1.87513e+2	9.99079e+1	3.98193e+1	1.97077c+1	9.55195e+0
1e-5	4.99940e-2	9.99881e-2	2.49970e-1	4.99940c-1	9.99876e-1	2.49962e+0	4.99878e+0	9.99381e+0	2.49191c+1	4.93742e+1	9.51507e+1	1.85867e+2	1.83531e+2	9.99049e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
2e-5	2.49944e-2	4.99888e-2	1.24972e-1	2.49944c-1	4.99886e-1	1.24970e+0	2.49928e+0	4.99763e+0	1.24777e+1	2.48388e+1	4.87594e+1	1.07326e+2	1.42648e+2	9.92357e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
3e-5	1.66612e-2	3.33225e-2	8.33062e-2	1.66612e-1	3.33224e-1	8.33054e-1	1.66606e+0	3.33169e+0	8.32195e+0	1.65920e+1	3.27731e+1	7.51989e+1	1.13030e+2	9.63421e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
4e-5	1.24947e-2	2.49895e-2	6.24736e-2	1.24947e-1	2.49894e-1	6.24731e-1	1.24943e+0	2.49863e+0	6.24248e+0	1.24557e+1	2.46796e+1	5.78359e+1	9.28977e+1	9.17012e+1	3.98193e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
5e-5	9.99484e-3	1.99897e-2	4.99742e-2	9.99483e-2	1.99897e-1	4.99739e-1	9.99459e-1	1.99877e+0	4.99430e+0	9.96988e+0	1.97910c+1	4.69757e+1	7.86445c+1	8.63764e+1	3.98192e+1	1.97077e+1	9.55195e+0
6e-5	8.32826e-3	1.66565e-2	4.16413e-2	8.32826e-2	1.66565e-1	4.16411e-1	8.32809e-1	1.66551e+0	4.16196c+0	8.31093e+0	1.65184c+1	3.95449e+1	6.81030e+1	8.10227e+1	3.98182e+1	1.97077e+1	9.55195e+0

														_					_	11	P	ונומ	10.		'n	ис		.0					_						1 == 1	51	٠١٠ -	باب اب	215	17	<u>ا</u> م	1		
710) —								19	- 12	_ 우	19	18	18	F	£	밁	٦ إ	3	F	F	£	٩ ا	5				246-1 246-1		86-	1.53078e-1	186e-2	189e-2	4.55019e-2	3.32268e-2	1 90015e-2	1.47403e-2	1.86920c-3	3.53740c-	7.97833e-	1.98943e-5	5 29639e-6	4.26234e-7	1.26355e-	3.82669e-8			
1	[£]	£ (5	200		0 551050+0	Ŧ	9 551950+0	9.55194c+0	194et	9.55191c+0	9.55180e+0	9.55149e+0	18468	9.19606e+0	.73358	8.20347e+0	7.67100c+0	7.16654eH	6. /0150e+C	6.27822cd	5.89502e+	3.54229e+(2.46886c+0	1.86734c	1.485486+	1 0315921	9 966472	7.73254e-	6 823196	2.78456e-	1.530	9 57486e-	6 44489e	4.55	3.32	1 8	1.47	_	ш	_	_	_	+-	_	_	ĺ		
0.2	9.55195c+0	9.55195e+0	9.55195c+0	0 55105040	155	1 966910+1 9 551950+1	95	_	т.	19.5	_	6	1.39849c+1 9.48468c+0		9.02405e+0 8.73358e+0				2	<u> </u>	ę į					-1-	-1-	100	46-1	25	74e-2	35e-2	38e-2	89e-2	96-2	636-3	7.41108e-3	937415e-4	1.77241e-4	3.99563e-5	9.96030e-6	7 301176-7	2 13299e-7	6.32261e-8	191468c-8	1		
-	+_+	_			-	ŧ	1 95730e+1	1.93978c+1	S7et	1.882950+1	1.84650e+1	1.80672e+1	849c	1.10303c+1	240Se	7.60502e+0	6.55658c+0	3.2840/e+0 5.7531/e+0	5.1190/6+0	4.60644e+0	2.29915c+0 4.18376c+0	2.13858c+0	1.40570e+0	1 03148e+0	6 \$47440	5 4730¢	A 67770	4.05327c-	3.56114e-	1.42455c-1	7.77704e-2	4.84705c-2	3 25538e-2	2.29489e-2	1.67396e-2	9.55863e-3	7.411	9 374	1.77	3.99	8	-	+-	-		i		
15	1.97077e+1	1.97077e+1	1.970772-1	197076e+	1 97079=+1	9996	1 957	93	1.914	1.88	1.84	_		1.1	0.6		9	2 5	2	2 3	ş		-	_	+	+	+	+	+-	+		_	-	_	_	2 2	20.3	10-4	2e-5	52c-5	900	1.52595e-6	1 06673e-7	3.16191c-8	9.57505e-9			
<u> </u>	H	_ †:	-	:1=	+=	-		+=		ŧ	17c+1	1.84197c+1	1.05766e+1	7.37161e+0	124ct	4.56002c+0	3.82094c+0	2/0	2.66/24-10	2.556/4e+0		1.12279c+0	7.26590e-1	3.28961e-1	3 33087e-1	2 778376-1	2367510-1	2.05086e-1	1.79987e-1	7.16378c-2	3.90409e-2	2 43104c-2	1.63183e-2	1 14994c-2	8.3836/6-3	4.78658c-3	3 71067e-3	4.69061c-4	8 86672e-5	1 99862c-5	4 98180e-6	3,696	8	3.16	9.57			
90.0	3.98140c+1	3.98032e+	3.978086+1	3 8062 10-1	3.48399e+1	3.14372e+1	2.83628c+1	2.57098c+1	2.34466e+1	2.15140e+1	1.98547e+1	1.841	1.057	1.37	5.64			2 0	3	_	-		-+	-	+	_	٠.	-	٠.	-	_	-	_	-	_	-	_	_	_	_	-	1 1	8	3e-8				
	_			_	-						-t-1	0+97	6e+0	3.21638e+0	2.40979e+0 5.64124e+0	1.92309e+0	1.59760e+0	1.3046/6+0	1.169/90+0	1.0536 ye+ 0	9.44784c-1	4 55352e-1	2.93367e-1	2.13093e-1	1 338846-1	1116016-1	0 4057847	8.23082e-2	7 22129e-2	2.87012c-2	1.56338e-2	9 73259c-3	6 53199e-3	4 60253c-3	3.356U3e-3	1.91545e-3	1.48485e-3	1.87664c-4	3.54721e-5	7.99540e-6	1.99290e-6	1 47869c-7	4 26716e-8	1 26483e-8	3 830			
0.02	7.59454c+1	7.12604e+1	6.69920e+1	3 97620e+1	2 82646e+1	2.20398e+1	1.80486e+1	1.52750e+1	32367	1.16760c+1	1.04428e+1	4439	1118.	3.2163	2.409	1.923	1.597		9	9	9.4	45	2.9	_	_	_	-	-	+-	+-	_	_	_	_	-		_	-		_	-		_	1	2e-9			
٥	7.59		6.69	0.0	-	1 2 2			9	- -	9	5	6+0				<u>.</u>	- 26	- -		4.74223e-1	2 28126e-1	1.46880c-1	1.06636e-1	6 4100/10-2	5 583476-7	7.7551607	4.73310c-2 4.11737c-2	3 61220e-2	1.43539e-2	7 81817e-3	4 86690e-3	3.26633e-3	2.30147c-3	1.678136-3	9 57781c-4	7.42464e-4	9 38347e-5	1 77364e-5	3 99776c-6	9 96465e-7	2 65214e-7	2 13360c-8	6.32422e-9	1 91512e-9 3 83020e-9			
-	72c+1	90ct	4.84596e+1	3 345650+1	1 594890+1	į	424c+	8.12311e+0	7855c	1574c	5.44206c+0	0149	15131	1.62862e+0	121640e+0	9.68911e-1	8.03911e-1	6.86089e-1	1.040-1	5.29109e-	4.742	2 28	146	<u> </u>	7 9	200		4	3.61	_	_	-	_	-	-	-	-		_	_	-	_	_	₽-	_			
0.01	6.00172c+1	5.36290c+	4.845	4.4		15	6		69	9	0 5.4	0.4.9	10 2		_	-1	-	-	-	<u>.</u>	3	3	2e-2	76-2	7-06	136.2	7 6	93e-2	1 806306-2	7.17737e-3	3 90924c-3	2 43352e-3	1 63321e-3	1.15076e-3	8 39092e-4	4 78898e-4	3.71237e-4	4 69177c-5	8.86826e-6	1.99889e-6	4 98234e-7	1 32607e-7	1 06680c-8	3 16211e-9	9 5756c-10	ĺ		
1.	-		Į.	2 42108c+11 4.41929c+11 0.3123/c+1	0 2258Apt	1	1	46e+	34e+	3 09396c+0 6.11574c+0	958ct	2,47389e+0 4.90149e+0 9,44392e+0	1.23146e+0 2.45131e+0 4.81116e+0	8.16887e-1	6 09650e-1	4 85382c-1	4 02598e-1	3.43515e-1	2.99242e-1	2.64839c-1	2.37341c-	1 14119e-l	7.34645e-2	5.33417e-2	4.13889e-2	3.350000e-2	2-301767	2.31/90e-2 2.05893e-2	180	17.7	390	2 433	1 63	1.15	83	4 78	371	_	-	_			_	ᅩ	_	l		
0.005	3.41416c+1	3.00360c+1	2 68110c+1	2 4210	977	277	948	4 17	5	38		2.47		-	-	Н	_	-	-+	_	-+	-+	-	-	_	_	_	_		8-3	11e-3	8e4	87e-4	06c-4	3.35638e-4	2 51064e-4	1 4849 Se-4	1 87671e-5	3.54731e-6	7.99557e-7	1 99294e-7	5.30429e-8	4.767.10-0	1 26485e-9	3 8302e-10			
-	+=					3.31923010 6.2239401 1 207650+1	7.48803640 0.180835040 9.71424640	1.98996510 4.3466510	1 410870+0 3 536340+0 6.978550+0 1.323670+1	1 241670+0	1 10306e+0 2.74958e+0	9 92 170e-1	4.93237c-1	3.27045e-1	2.44023e-1	1.94257c-1	1.61111e-1	1.37459c-1	1.19737c-1	1.05967e-1	9 49622e-2	4 56540e-2	2.93885c-2	2.13382e-2	1.65565e-2	1.34006e-2	7-306-7	9.511956-3	7 225416-3	2.87099c-3	1.56371e-3	9.73418e-4	6 53287e-4	4 60306c-4	3.356	2510	1487	187	3.54	7.99	_		_	4				
0.00	1.41742e+	1 24124c+1	1.10399e+1	9 94054c+0	4.9/839e+0	2616.6	7,4000	25.		1241		9	1 6	_	+-	↓-	_	-	_	_	_	_	-	-	-	-	-	-+-	-	_	+-	_	+-	-	96-4	525 64	200	9	1.77365e-6	79e-7	9.96469c-8	2 65215e-8	7.393566-9	6 32426-10	1 9151e-10			
-	1							-	+	-	١	2 2	3	1 63543e-1	1 22023e-1	971357e-2	8.05607c-2	6.87333c-2	5.98715c-2	5.29859e-2	4.74829c-2	2.28275e-2	1.46945e-2	1.06692c-2	8.27832c-3	6.70037c-3	5.58453e-3	4 75600e-3	4.118026-5	3.612/26-3	7 818586-4	4 86710e-4	3 26644c-4	2 30153e-4	1 67819c-4	1 25532c-4	7.47477e-S	0 38356-6	11/2	3 99779e-7	9.964	2 65	7.39	2 2	191			
1000	7125126+0	6 23532e+0	5.54298e+0	4.98894c+0	2.49397e+0	1.661716+0	1.24549e+U	9.95738c-1	1-266767 8	7.103136-1	1-2671120	4.067770-1	2 466650-1	3 5	2	_	٠	_	_	-	٠.	_	_	_	-		_	_	_	_		-		_	_	-+	-		2 12	1-9	35c-8	37c-8	86-9 1	1 0668Uc-9	ءَ فِي أَفِ	3		
		9			_		_	_	+	_	-	٠.	+		1	4 85688e-2	4 02810e-2	3.43671e-2	2 99361e-2	2 64932e-2	237417e-2	1 14138e-2	7.34726e-3	5.33461e-3	4.13917e-3	3.35019e-3	2.79227e-3	2.37800e-3	2 05901e-3	1.80636e-3	7.17/516-4	3 909 296-4	1 633776-4	1.15077e-4	8.39097e-5	6 27662e-5	4 78900c-5	3 71239e-5	8 86827e-7	1 99889e-7	4 98235c-8	1 32607c-8	3.69678c-9	990	3.1621e-10 9.5756e-11	2		
S S S S S S S S S S S S S S S S S S S	2 547340+0	3.30/34610	2.77438c+0	2 49681e+0	1.24757e+0	8.31113e-1	6.22889c-	4 97963e-1	4.14685e-1	3.55205e-	3.10599c-1	2.75909e-	2 48159e-1	1.233365-1	2 101306-2	88	4 028	3.43	29	4		_	4-	+	_	-			_	-			_	-	-	_	L	_	_	-	_	-	6-9	힑	_	_		
٩					_	-	-	_	-	-	-+	+	-	_	-		200	2-5	50.2	736-2	20170010	2010047	2 028010-3	2 13385e-3	1.65567e-3	1 34008e-3	1.11691c-3	9.51201c-4	8 23605e-4	7.22545c-4	2.87100c-4	1 56372c-4	9 734 2Uc-5	4.603076-5	3 356396-5	2 51065c-5	1.91560e-5	1 48496c-5	1.87671e-6	3.54/510-7	1 99794e-8	5 30429e-9	1 47871c-9	4 2672e-10	1 26496-10	3.830ze-11		
8	0.000	42747e+0	1.24694C10	0 98987e-1	4 99093e-	3.32474e-1	2 49172e-1	1.99196c-	1 65881e-1	1.42087e-1	1.24244c-1	1.10367c-	9.92664e-2	4 93360c-2	3.27099c-2	2.440336-2	1.942/105-2	1 37469c-2	1 107456-2	1 05973e-2			5 5	13	13	1_	1	_	1	-	-	_	_				_	-		٠,	+	-	_					
	3	1.42		4-	+-	+	_	-	₩	-	_	-	1 1	-	_	-			-	_	<u>و</u> اً.	3	9	200	0 778346-4	6.4/634CA	0./00300 6.604540-4	4 75601c-4	4 11802e-4	3.61273e-4	1.43550c-4	7.81859c-5	4.86710e-5	3 26644e-5	2.301536-5	1 25532e-5	9.57801c-6	7.42478c-6	9.38357e-7	1.77365c-	3.99779e-8	9.96409c-9	7 3936e-10	2 1336e-10	6.3242c-1	1.9151e-11		
	5	1736-1	6.24497c-1	5.550616-1	2 405510-1	46730e-1	1 24587c-	0 05986e-2	8 29411e-2	710441c-2	6.21222e-2	5.51837e-2	4.96334e-2	2.46681c-2	1.63550e-2	1.22027e-2	9.71382e-3	8.056246-5	6.8/3430-3	5.981246-5	5.29866e-3	4.74835e-3	2.28276e-3	1.469436-3	1.00092C-3	2/2		27.0	1	3.61	_	_	ш	-				_		_		_1	_	-	1 1			
	0.0001	7.13773c-	6.24	5.55			_	_	٠.	_	-			+-		Н	-		_		_	-	-	-	_		3	4 4		1 4	1.00001 7.1771e-5	3 90929e-5	2,43355e-5	1.63322e-5	1.150776-5	8 390976-6	9-9000e-6	3 712396-6	4.69178e-7	8.86827c-8	1.99889c-8	4.98235c-9	1 3260/6-7	1 0668e-10	3.1621e-1	9 5756e-12		
ľ	s	2c-1	52e-1	77533e-1	28e-1	٤	8.311996-7	6.229380-2	4.9/9940-4	4.14/000-2	3.334416-2	3.1001102	2.13919C	1 23340e-2	8 17750e-3	6.101346-3	4.856910-3	4.02812c-3	3.436730-3	2.99362e-3	2.64933e-3	2.37418e-3	1.14138e-3	7.34727c4	5.33462c-4	4.1391764	3.35019c-4	2.79227e-4	2.5/8000-	2.05%10-4	3/2	100			_	-				+-	_		_	_	=1=		١	
	0.00005	3.56892e-	3.12252e-	2.775	2.49758c-	1.24776c-1	83	975	2	4			2/2		_	4-	-	_	L	┺-	٠.	_	┺-	_	-	_	_	-		-	_	200	9-90000	6 53288e-6	4.60307c-6	3.35639e-6	2.51065e-6	191560c-b	1.484900-0	3 54731c-8	7.99557e-9	1.99294e-9	5.3043e-10	1 4787c-10	4 2672e-1	3 8302e-12		
	2	1:	وَا	100	6e-2	6e-2	30e-2	75e-2	.99198e-2	1.65882e-2	86	24245e-2	576-2	9 926690-3	4.93362c-3	3.2/1000-3	1 04776e-3	1611256-3	1374696-3	1 197456-3	1 049736-3	0 49671e-4	156552e4	2 93891c-4	2.13385e-4	1.65567c-4	1.34008c-4	1.11691c-4	9.51201e-5	8.23605e-5	7.225456-5	2.87100c-5	5	33				_			_	1_	\perp		-	_	4	
	0.00002	477576-	24901c-	11014c-1	9.99036e-2	4.99106e-2	3.32480e-2	2.49175c-2	1.99	1.658	1.42088c-2	1.242	1.10367e-2	926	2		١.		_	1_			_	_	_	_	_		_	ιι		-			15366	1 678196-6	1.25532e-6	7801c-7	2478c-7	38357e-8	77365-0	9647c-10	6522e-10	3936e-1	1336e-1	3242e-12	71-91516	
	-		71.	1	+-	١.	٠.	-	3	E-3	2c-3	36-3	7c-3	<u>6</u> -3	63	9	200	194776-4 4.85691c-4 9.71382e-4	8.030246	5/3	1736-4	86/c4	4.74835c-4	20/28	400470	0 77835e-5	20038	8454	4 75601c-5	4.11802e-5	1 80636e-5 3.61273e-5	1,43550e-5	7.8185	4.86710c-0	8 2	189	1.255	9.578	7 42	0	-1.	40	10	1	12	6	-	
	10000		7.13786e-2	6.2450/6-2	4.005186-2	2 405530-2	- 66740e-	1 2458e-2	0 05986-3	8 29412c-3	7.10442e-3	6.21223c-3	5.51837c-3	4.96334e-	2.46681c-3	1.63550c-	1 22027c-		5	8	5.987230	2	4.7	2.282/0				200	10	10	12	10		_		_	1	100	19e-7	78c-8	6-92	896-9	9 6	=	8-11	10-12	13	
	-	-	_	_			- 1 -						12		_		9	힐	120	36-4	52c-4	33c-4	18c-4	38c4	1276-	5.33462e-5	4.13917c-5	3.350196-5 0.7005	2 2	2378000-5	195	1.80030c-2	62606	2 43355e-6	6332	1.150776-0	1376767	780	3.71239e-7	4.69178c-8	8.86827c-9	1.99889c-9	4 98246-10	1.32016 1.068e-11	1 0668e-11	3.162	9.5756e-13	
		0.000005	3.56893e-2	3.12254c-2	2.77534c-2	2.49759c-2	1.247766-2	8.31200c-3	6.229386-3	4.97994c-3	4 14/000-2	3.552210-3	3.100110-2	2 481676-3	1 233406-3	4.93362c-4 8.17750c-4	6.101346-4	8569	1,51175e4 4.02812e-4	13746964 3.4367364 6.873436	2.99362e-4	2.649336-4 5.29867	2.374	1.14	7.34727e-5							-		12	_				وأو	180	6.0	9			詐	4 26/20-12 1 26490-12 3 16210-12	15	
		9	1	1_								_	_			100	14	14	4	170	1	10	15	26-5	S16-5	85c-5	67e-5	1.34008e-5	69 6-5	201e-6	ŝ	7.22545e-6	2.87100c-0	3420	3288	4.60307e-7	3.35639e-7	2.51065e-7	9156	1.48490c-1	3 547310-9	7.9956e-10	1.9929e-10	5.30436-11	1.47870-11	100	8302	
	1	0.000002	1. 477576-2	1 24901c-2	111014e-2	937e	4 99106c-3	3.32480e-3	2.49175e-3	1.99198c-3	1.65883e-3	1.42088c-3	1.24245e-3	1.10367c-3	9	33626	1 4	7,00	15	3746	1.07450-4	1.050730-4		13	2 938	33	13	1340	=	9.51	8.23	7.7			1	1	_			影								1
	1	9.0			E		100							Ē	4 963346-4 9.926696-4	2.46681c-4 4.93362c-4	4	1.22027c-4 4. 400776c-4	1			핡	र्ज	3	2.28276c-5 2.93891c-5	1	1.000yce-5	199	240-6	4.75601c-6 9.51201c-6	4 11802e-6 8.23605c-6	3 612730-6	1.435500-6	7.81859c-7 1.303/20-7		3.260446-7	1.08190-7	1 25532e-7	9.57801c-8	7.42478c-8	9.383576-9	1773656-7	0 9647e-11	2 6522e-11	7.3936e-12	2.1336e-12	9e+0 6.3242e-13 3.8302e-13	3
		1	1	7.13786e-3	6.2450/c-3		4 90 100	2.495555	1.00240-3	1.243664 0.6088e4	0 204136-4	10442e4	6 21223c4	5 51837e-4	334c-	198	1.63550e-4	힑	1382	56240	33	5.98725e-5	5.29867c-5	1483	282	\$ \ \$ \ \$ \	<u> </u>	8.27835c-0		135		15	15	18.	4.8	135	1		1							8e+0 2		
		100000	6.0	7.13	55	5.550096-2	2/3	2.43	<u> </u>	1/8				15	18	246	1.63	17	Se-3 9.71382e-3	6e-3 8.05624c-5	7e-3 6.87345c-5	3 5	3 5	16-2 4.74835c-5 3.4555c-5 1.14138c-4	20-2 2.282700-5 2 938910-5	김	4e-2 1.06092e-3	205		70-2 5.3847 601e-6 9.51201e-6			١	30	46-1	3	3		6	16.50	12	3640	4/	8/3	5/2	12	%	=
		10	7,	10.5	Se-5	3	회	3	1	1	*	\$	1		1	12	٢	46-3	8	18	10	86-3	6963	٦	امًا	اد.)	4	1-1	-1	١	١	•	•	•														
		V		1			_ '	•	_	•	·	•	•	•	•																																	_

Значения функции $W_1(u, \beta)$ для аргумента $\beta = 0.3 \div 10$

<u> </u>																	
<u> </u>	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
					2.10057e+0											1.07274e-4	3 72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0							8 08923e-3			3.10738c-4	1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10057e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10056e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.10055e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.09443e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					2.05360e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
4e-2	2.38613e+0	2.57260e+0	2.49690e+0	2.26461e+0	1.97109e+0	1.67926e+0	1.41947e+0	1 20009e+0	2.79732e-1	8 03129e-2	2 49670e-2	8 08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
					1.86315e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
					1.74547e+0											1.07274e-4	3.72975e-5
7e-2	1.40384e+0	1.63943e+0	1.73931e+0	1.72469e+0	1.62776e+0	1.48221e+0	1 31646e+0	1.15068e+0	2.79731e-1	8.03129e-2	2.49670e-2	8.08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
8e-2	1.21994e+0	1.44544e+0	1.55986e+0	1.57562e+0	1.51513e+0	1.40420e+0	1.26669e+0	1.12133e+0	2.79728e-1	8.03129e-2	2.49670e-2	8.08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
9e-2	1.07319e+0	1.28629e+0	1.40730e+0	1.44326e+0	1.40986e+0	1.32686e+0	1.21395e+0	1.08783e+0	2.79718e-1	8.03129e-2	2 49670e-2	8 08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
1e-1	9.53648e-1	1.15378e+0	1.27666e+0	1.32597e+0	1.31273e+0	1.25210e+0	1.16021e+0	1.05162e+0	2.79690e-1	8 03129e-2	2 49670e-2	8.08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
2e-1	4.02106e-1	5.08554e-1	5.94349e-1	6.57615e-1	6.98062e-1	7.16816e-1	7.16143e-1	6.99089e-1	2.74048e-1	8 03057e-2	2.49670e-2	8.08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
3e-1	2.23605e-1	2.87315e-1	3.42558e-1	3.88149e-1	4.23402e-1	4.48135e-1	4.62627e-1	4 67561e-1	2.51653e-1	8 00307e-2	2.49664e-2	8 08923e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
4e-1	1.40696e-1	1.82280e-1	2.19615e-1	2.51997e-1	2.78928e-1	3.00120e-1	3.15502e-1	3 25196e-1	2.19002e-1	7 86101e-2	2 49513e-2	8.08918e-3	2.68784e-3	9.08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
5e-1	9.50511e-2	1.23773e-1	1.50096e-1	1.73586e-1	1.93903e-1	2.10816e-1	2 24198e-1	2 34028e-1	1.85049e-1	7 54371e-2	2.48599e-2	8 08829e-3	2 68784e-3	9 08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
6e-1	6.72754e-2	8.79099e-2	1.07081e-1	1.24508e-1	1.39961e-1	1.53267e-1	1.64311e-1	1.73038e-1	1.54138e-1	7 06774e-2	2.45915e-2	8.08232e-3	2 68778e-3	9 08365e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
7e-1	4.92159e-2	6.44748e-2	7.87906e-2	9.19753e-2	1.03870e-1	1.14348e-1	1 23316e-1	1.30718e-1	1.27604e-1	6 48856e-2	2.40653e-2	8 06109e-3	2 68739e-3	9.08361e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
8e-1	3.69068e-2	4.84432e-2	5.93466e-2	6 94870e-2	7.87520e-2	8.70488e-2	9.43053e-2	1 00472e-1	1 05446e-1	5 86324e-2	2 32556e-2	8.01001e-3	2.68577e-3	9.08335e-4	3.10738e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
9e-1	2.82153e-2	3.70917e-2	4.55295e-2	5.34366e-2	6.07320e-2	6.73470e-2	7 32263e-2	7.83287e-2	8 71785e-2	5.23564e-2	2 21882e-2	7.91484e-3	2.68119e-3	9.08214e-4	3.10736e-4	1.07274e-4	3.72975e-5
1e+0	2.19074e-2	2.88352e-2	3.54513e-2	4.16890e-2	4.74890e-2	5.28000e-2	5.75793e-2	6.17939e-2	7.21982e-2	4.63448e-2	2.09193e-2	7.76586e-3	2.67119e-3	9.07824e-4	3.10727e-4	1 07274e-4	3.72975e-5
2e+0	2.78976e-3	3.69366e-3	4.57559e-3	5.43049e-3	6.25358e-3	7.04038e-3	7.78678e-3	8.48908e-3	1 25978e-2	1.15773e-2	7.90459e-3	4.31024e-3	1 97480e-3	7 97011e-4	2.96608e-4	1.05834e-4	3.71807e-5
3e+0	5.28758e-4	7.01569e-4	8.71460e-4	1.03774e-3	1.19975e-3	1 35685e-3	1 50843e-3	1.65395e-3	2.68414e-3	2 84881e-3	2 35239e-3	1.60306e-3	9.30794e-4	4.71621e-4	2.13224e-4	8.80159e-5	3.39705e-5
4e+0	1.19353e-4	1.58537e-4	1.97211e-4	2.35253e-4	2.72544e-4	3.08969e-4	3.44418e-4	3.78786e-4	6.44577e-4	7 39403e-4	6.78701e-4	5.26999e-4	3.55637e-4	2.12181e-4	1.13436e-4	5.50265e-5	2.45332e-5
5e+0	2.97758e-5	3.95789e-5	4.92779e-5	5.88477e-5	6.82637e-5	7.75021e-5	8.65397e-5	9 53543e-5	1 67134e-4	2 01309e-4	1 97633e-4	1.66987e-4	1.24544e-4	8.32140e-5	5.03252e-5	2.77811e-5	1.41088e-5
6e+0	7.92980e-6	1.05455e-5	1.31378e-5	1 57009e-5	1.82292e-5	2 07172e-5	2.31598e-5	2 55516e-5	4 57033e-5	5 69280e-5	5 85506e-5	5 24763e-5	4.20050e-5	3.04464e-5	2 01644e-5	1.22850e-5	6.92403e-6
7e+0	2.21163e-6	2.94217e-6	3.66704e-6	4.38483e-6	5.09419e-6	5.79379e-6	6.48231e-6	7.15849e-6	1.29950e-5	1.65890e-5	1.76543e-5	1.65257e-5	1.39403e-5	1.07394e-5	7.61951e-6	5.00838e-6	3.06415e-6
8e+0	6.38439e-7	8.49552e-7	1.05922e-6	1 26708e-6	1.47278e-6	1 67599e-6	1.87636e-6	2 07357e-6	3 80696e-6	4.95185e-6	5.40936e-6	5.23535e-6	4.59844e-6	3.71379e-6	2.78023e-6	1 93999e-6	1.26698e-6
9e+0	1.89291e-7	2 51936e-7	3 14197e-7	3 75977e-7	4 37184e-7	4 97727e-7	5.57514e-7	6 16459e-7	1.14191e-6	1 50749e-6	1.68114e-6	1.67063e-6	1.51522e-6	1.27061e-6	9.92924e-7	7.26931e-7	5.00510e-7
1e+1	5.73340e-8	7.63214e-8	9.52031e-8	1.13953e-7	1.32546e-7	1.50955e-7	1.69157e-7	1.87127e-7	3.49138e-7	4.66475e-7	5.28996e-7	5.37085e-7	4.99997e-7	4.32319e-7	3.49895e-7	2.66447e-7	1.91611e-7

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1967с.

Функция $W_N(u, \beta)$

Функция $W_N(u,\beta)$ для аргумента $u=t_s$ и $u=t_v$ определена в тексте уравнениями (6.2.1), (6.2.8) и (6.2.9) (см. раздел 6.2).

Все графики и табличные значения в данном приложении даны для совершенных по степени вскрытия опытной и наблюдательной скважин.

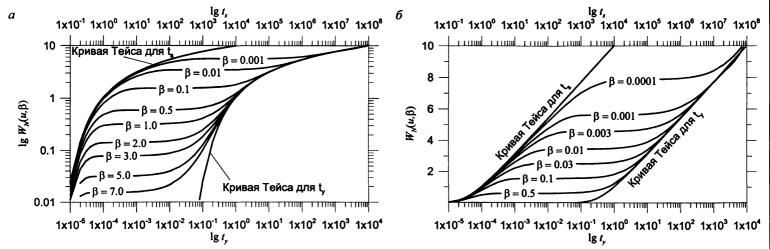
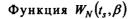


Рис. П29, А. Зависимость логарифма функции (a) и функции (b) от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента: для верхней шкалы $u = t_{y}$, для нижней шкалы $u = t_{y}$.



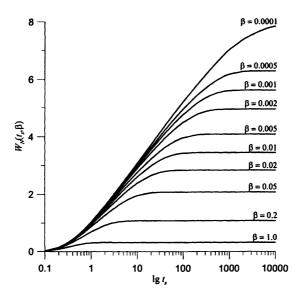


Рис. П29, Б. Зависимость функции от логарифма первого аргумента (t_s) при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $W_N(t_s,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $t_s=0.1\div 10000$, $\beta=0.0001\div 20.0$.

Значения функции $W_N(t_s, \beta)$ для аргумента $\beta = 0.0001 \div 0.5$

7	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
		0.0247																							
		0.1448																							
0.3	0.2906	0.2893	0.2880	0.2862	0.2847	0.2835	0.2825	0.2815	0.2806	0.2798	0.2790	0.2783	0.2724	0.2678	0.2639	0 2606	0.2575	0.2543	0.2517	0.2493	0.2469	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
		0.4262																							
		0.5524																							
		0.6657																							
0.7	0.7742	0.7683	0.7635	0.7567	0.7515	0.7471	0.7432	0.7397	0.7364	0.7334	0.7306	0.7279	0.7062	0.6895	0.6755	0.6631	0.6519	0 6416	0.6320	0.6230	0.6145	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
0.8	0.8688	0.8617	0.8561	0 8481	0.8419	0 8368	0 8321	0.8280	0 8242	0.8206	0.8173	0 8141	0.7885	0 7689	0 7524	0 7378	0.7246	0 7125	0.7012	0 6906	0 6805	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193

B	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.9	0.9538	0.9456	0.9392	0.9300	0.9229	0.9170	0.9117	0.9069	0.9025	0.8985	0.8946	0 8910	0 8634	0.8408	0.8218	0.8051	0.7900	0.7760	0.7631	0.7509	0.7394	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
1	1.0338	1.0245	1.0173	1.0069	0.9990	0.9923	0 9863	0.9810	0.9760	0.9714	0.9671	0.9630	0.9300	0.9047	0.8833	0 8661	0.8491	0 8334	0.8189	0.8052	0.7922	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
2	1.6046	1.5858	1.5714	1.5509	1.5350	1.5217	1.5099	1.4993	1.4895	1.4803	1 4718	1.4637	1.3982	1.3480	1.3056	1.2683	1.2345	1.2035	1.1746	1.1475	1.1219	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
3	1.9676	1.9408	1.9204	1.8913	1.8690	1 8502	1.8336	1.8186	1.8047	1.7919	1.7798	1.7684	1.6761	1.6052	1.5419	1.4893	1.4418	1.3981	1.3575	1.3195	1.2837	0.0214	0 0206	0.0199	0.0193
4	2.2294	2.1957	2.1700	2.1337	2.1057	2.0822	2.0613	2.0425	2.0252	2.0091	1.9940	1.9797	1.8641	1.7754	1.7006	1.6347	1.5718	1.5173	1.4669	1.4199	1.3759	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
5	2.4352	2.3953	2.3651	2.3221	2.2891	2.2612	2.2367	2.2144	2.1941	2 1750	2.1571	2.1403	2.0038	1.8991	1.8109	1.7333	1.6635	1.5998	1.5376	1.4832	1.4326	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
6	2.6047	2.5591	2.5247	2.4756	2.4380	2.4063	2.3783	2.3530	2.3297	2.3080	2.2876	2.2684	2.1129	1.9936	1.8932	1 8051	1.7262	1.6546	1.5890	1.5251	1 4692	0.0214	0.0206	0 0199	0.0193
7	2.7486	2.6979	2 6594	2.6049	2 5630	2 5276	2.4964	2.4682	2.4424	2.4181	2 3955	2 3741	2.2009	2.0681	1 9566	1 8592	1.7723	1.6939	1.6225	1.5536	1.4935	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
8	2 8738	2.8180	2.7759	2.7162	2.6703	2.6315	2 5974	2.5665	2.5381	2 5 1 1 6	2.4868	2.4634	2 2737	2 1284	2 0066	1.9007	1 8069	1 7226	1 6464	1.5770	1 5100	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
9	2 9843	2.9240	2.8784	2.8137	2.7640	2.7221	2.6851	2 6517			2.5655	2.5401	2.3349	2.1778	2.0467	1 9333	1.8333	1.7440	1.6637	1.5911	1 5215	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
10	3.0833	3.0186	2.9697	2.9003	2.8471	2 8022	2 7625	2.7267	2.6938	2.6631	2.6343	2 6071	2.3871	2 2191	2 0794	1.9591	1 8537	1.7602	1 6765		1.5295	0 0214	0 0206	0.0199	0.0193
20	3.7346	3.6342	3.5585	3 4512	3.3687	3 2991	3.2379	3 1824	3.1315	3 0840	3 0395	2.9974	2 6606	2 4129	2.2173	2.0578	1.9246	1.8114	1.7136	1.6282	1 5491	0 0214	0 0206	0.0199	0 0193
30	4.1133	3.9852	3.8888	3.7520	3.6469	3.5584	3.4804	3.4098	3.3450	3.2848		3.1750	2.7579	2.4664	2 2470	2.0743	1.9339	1.8166	1.7165	1.6298	1.5501	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
40	4.3799	4 2284	4.1143	3 9527	3.8285	3.7240	3.6318	3 5486	3.4723			3.2734	2.7999	2 4845	2.2548	2.0777	1 9353	1 8172	1.7168	1.6299	1.5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
50			4.2832	4.0996	3.9587	3.8399	3 7355	3.6414		3.4760		3.3331	2.8198	2.4912	2.2570	2.0785	1.9356	1.8173	1.7168		1.5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
60				4.2133	4.0572	3.9257	3.8103	3 7067				3.3712	2.8297	2 4938	2 2577	2.0786	1.9356	1.8173	1.7168		1 5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
70				4.3044	4.1344	3.9914		3.7544		3.5605	3.4753		2 8349		2 2579	2.0787	1.9356	1.8173	1.7168		1 5501	0 0214	0.0206	0.0199	0 0193
80		_	4.6181	4.3794	4.1964	4.0429		3.7901	3 6828			3.4134	2.8376		2.2580	2.0787	1 9356	1.8173	1 7168	1.6300	1 5501	0.0214	0 0206	0.0199	0.0193
90		******		4.4422	4.2472	4.0841	3.9425	3.8172	3.7048			3.4252	2.8390		2.2580	2.0787	1.9356	1.8173	1.7168	1.6300	1.5501	0.0214	0.0206	0 0199	0.0193
100				4.4957	4.2894	4.1175	3.9690	3 8381			3.5206	3 4334	2.8398	2.4955	2 2580	2 0787	1.9356	1.8173	1.7168	1.6300	1.5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
200		5.4393	5.1625	4.7739	4.4866	4.2580	4 0695	3.9103				3.4534	2 8408			2 0787	1.9356	1 8173	1 7168	1.6300	1 5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
300	6.1397	5.6829		4.8716		4.2878	4.0860	3.9196				3 4544	2 8408		2.2580	2.0787	1.9356	1.8173	1.7168		1 5501	0.0214	0.0206	0.0199	0.0193
400	6.3668			4.9139	4.5586	4.2956		3.9211		3 6570			2 8408	2 4956		2 0787	1.9356	1.8173	1 7168		1.5501	0.0214	0 0206	0 0199	0.0193
500				4.9343	4.5654	4.2979		3.9213	3.7794	3.6571	3 5499	3.4544	2.8408	2.4956		2 0787	1.9356	1 8173	1 7169	1.6300	1.5501	0 0214	0 0206	0.0199	0.0193
600	6.6780			4.9445	4.5681	4.2986	4.0904	3.9214	3.7794		3.5499		2.8408	2.4956	2 2580	2.0787	1.9356	1.8173	1.7169	1.6300	1.5501	0 0214	0.0206	0 0199	0.0193
700	6.7918		5.5666	4.9499	4.5692	4.2988	4.0904	3.9214	3.7794	-			2.8408	2.4956	2.2580	2.0787	1.9356	1.8173	1.7169	1 6300	1.5501	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
800	6.8867	6 1213		4.9527	4.5696	4.2989	4.0905	3.9214			3.5499			2.4956		2 0787		1.8173		1.6300	1 5501	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
900	6.9666			4.9541	4.5698	4.2989	4 0905		3.7794		3.5499		2.8408	2 4956				1 8173	1 7169	1.6300	1 5501	0 0214	0.0206	0 0199	0.0193
1000	7.0345	6.1814		4.9549	4.5699	4 2989			3.7794		3 5499		2 8408 2 8408		2 2580 2 2580	2 0787	1.9356	1.8173	1 7169	1.6300	1 5501	0 0214	0 0206	0.0199	0.0193
2000	7.3847	6.2715	5.6225	4.9559	4.5699	4.2989		3 9214			3 5499		2 8408	2 4956 2 4956	2 2581	2 0787	1.9356	1.8173	1.7169	1.6300	1.5501	0 0214	0 0206	0.0199	0.0193
3000	7.5348	6.2853	5.6233	4.9559	4 5699	4 2989	4 0905	3.9214		3.6571			2.8408			2 0787	1.9356	1 8173	1.7169	1 6300	1.5501	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
4000	7.6318	6.2886	5.6234	4.9559	4.5699	4 2989	4.0905	3.9214		3 6571	3 5499		2 8408				1 9357	1.8173	1 7169	1.6300	1 5502	0 0214	0.0206	0.0199	0.0193
5000 6000	7.7011	6.2895	5.6234	4.9559	4.5699 4.5699	4.2989	4 0905	3.9214 3.9214		3 6571	3.5499		2.8408	2 4956		2 0787	1.9357	1.8173	1.7169	1.6300	1 5502	0.0214	0.0206	0 0199	0.0193
7000	7.7883	6.2898		4.9559	4.5699	4.2989	4.0905	3.9214	3.7794	3.6571	3.5499	3.4544	2.8408	2 4956		2 0787	1.9357	1.8173	1 7169	1.6300	1 5502	0.0214	0.0206	0 0199	0.0193
8000	7.8151	6.2898		4.9559	4.5699	4.2989	4.0905	3.9214	3.7794	3 6571			2.8408	2,4956		2.0787	1 9357	1.8173	1 7169	1 6300	1 5502	0 0214	0.0206	0 0199	0.0193
9000	7.8347		5.6234	4.9559	4.5699	4.2989				3.6571	3 5499					2 0787		1 8173	1 7169	1 6300	1 5502	0.0214	0.0206	0 0199	0.0193
10000		6.2898			_					3.6571													0.0206		0.0193
10000	7.6489	0 2898	3.0234	4.9009	4.5099	4.2989	4 0905	3 7214	3 / /94	3.03/11	3 34371	J 7344	2.0400	2.77301	2 2301	2.0/0/	1 933/	1.01/3	1.7109	1.0300	1.5502	0 0214	0 02001	0.0177	0.0173

Значения функции $W_Nig(t_s,oldsymbol{eta}ig)$ для аргумента $oldsymbol{eta}=0.6\div20.0$

,	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	15.0	20.0
0.:	0 0188	0 0183	0 0179	0 0174	0 0170	0 0153	0 0138	0 0125	0 0113	0.0103	0 0093	0 0085	0.0077	0 0070	0 0064	0 0058	0 0053	0 0048	0 0044	0 0040	0 0037	0 0034	0 0031	0.0013	0.0000
0.:	0.0188	0.0183	0 0179	0.0174	0 0170	0.0153	0.0138	0 0125	0 0113	0 0103	0 0093	0 0085	0 0077	0.0201	0 0174	0 0151	0 0131	0.0114	0 0099	0 0087	0 0076	0 0067	0.0059	0.0019	0 0000
0.:	0.0188	0 0183	0 0179	0 0174	0.0170	0.0153	0 0138	0 0125	0 0113	0 0103	0.0093	0 0085	0 0077	0 0244	0 0206	0 0174	0 0148	0 0127	0 0109	0 0094	0 0081	0 0071	0 0062	0.0019	0 0000
0.4	0.0188	0 0183	0.0179	0.0174	0 0170	0 0153	0 0138	0 0125	0 0113	0.0103	0.0093	0 0085	0 0077	0 0255	0 0213	0 0179	0 0151	0 0129	0 0110	0 0095	0 0082	0 0071	0 0062	0 0019	0.0000
0.	0.0188	0.0183	0.0179	0 0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0 0093	0 0085	0 0077	0 0257	0.0214	0.0180	0 0152	0 0129	0.0111	0 0095	0 0082	0 0071	0.0062	0.0019	0.0000
0.	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0 0103	0 0093	0 0085	0 0077	0 0258	0 0215	0 0180	0 0152	0.0129	0 0111	0 0095	0 0082	0 0071	0.0062	0 0019	0.0000
0.	0.0188	0.0183	0 0179	0.0174	0 0170	0 0153	0 0138	0 0125	0 0113	0 0103	0 0093	0 0085	0.0077	0 0258	0 0215	0 0180	0 0152	0 0129	0 0111	0 0095	0 0082	0 0071	0 0062	0.0019	0.0000

B	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	15.0	20.0
4 0.8	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138		0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
0.9		0.0183	0.0179	0.0174	•		0.0138			0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
1	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138		0.0113			0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
- 2	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
3	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0 0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
4	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0 0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
5	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
6	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0 0129	0 0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
7	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
8	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0 0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
9	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0 0152	0.0129	0 0111	0.0095	0.0082	0 0071	0.0062	0 0019	0.0000
10	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174			0.0138		0.0113			0.0085		0.0258	0.0215	0.0180		0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
20	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138		0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
30		0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
40		0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103		0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
50		0.0183	0.0179	0.0174			0.0138	0.0125	0.0113	0.0103		0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
60		0.0183	0.0179	0.0174			0.0138		0.0113					0.0258		0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0 0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
70		0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138		0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
80		0.0183	0.0179	0.0174	0.00.0	0.0153	0.0138		0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0 0082	0.0071	0 0062	0.0019	0.0000
90	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138		0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0 0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
100		0.0183	0.0179	0.0174			0.0138		0.0113		0.0093	0.0085	0.0077	0.0258		0.0180	0 0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
200	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
300 400	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
500	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
600		0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
700	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
800	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0 0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
900	0.0188	0.0183	0 0179	0.0174		0.0153	0.0138	0 0125	0.0113	0.0103		0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0 0180	0.0152	0.0129	0 0111	0 0095	0.0082	0.0071	0 0062	0.0019	0.0000
1000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174		0.0153	0.0138		0 0113	0.0103		0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0 0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0 0062	0.0019	0.0000
2000	0.0188	0 0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0 0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0 0152	0.0129	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
3000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0 0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0129	0.0111	0 0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
4000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0 0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0258	0.0215	0.0180	0.0152	0.0130	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
5000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0259	0.0215	0.0180	0.0152	0.0130	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
6000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0 0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0 0077	0.0259	0.0215	0 0180	0.0152	0.0130	0.0111	0.0095	0.0082	0.0071	0.0062	0.0019	0.0000
7000	0.0188	0.0183	0.0179	0 0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0259	0.0215	0.0180	0.0152	0.0130	0.0111	0 0095	0.0082	0.0072	0 0062	0.0019	0.0000
8000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0259	0.0215	0.0180	0.0153	0.0130	0.0111	0 0095	0 0082	0.0072	0.0062	0.0019	0.0000
9000	0.0188						0 0138		0.0113			0 0085	0.0077	0.0259			0.0153	0 0130		0.0095	0.0083	0.0072	0.0062	0.0019	0.0000
10000	0.0188	0.0183	0.0179	0.0174	0.0170	0.0153	0.0138	0.0125	0.0113	0.0103	0.0093	0.0085	0.0077	0.0259	0.0215	0.0181	0.0153	0.0130	0.0111	0.0096	0.0083	0.0072	0.0062	0.0019	0.0000

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе DELAY2 (автор *Neuman*, 1986) для параметра $\sigma = 10^{-9}$, где $\sigma - \text{см}$. в разделе 6.2.

Функция $W_N(t_v,\beta)$

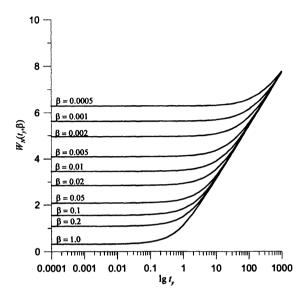


Рис. Π 29, В. Зависимость функции от логарифма первого аргумента (t_y) при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $W_N(t_y, \beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $t_y = 0.0001 \div 10000$, $\beta = 0.0001 \div 20.0$.

Значения функции $W_N(t_y, \beta)$ для аргумента $\beta = 0.0001 \div 0.5$

4	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	1 7.8875																								
	2 7.8875																								
	3 7.8875																								
	4 7.887																								
	5 7.887																								
	6 7.887																								
	7.887																								
0.00	8 7.887	6.2898	5.6234	4.9559	4.5699	4.2990	4.0905	3.9214	3.7794	3.6571	3.5499	3.4545	2.8409	2.4957	2.2582	2.0788	1.9358	1.8175	1.7171	1.6302	1.5504	1.0852	0.8469	0.6966	0.5894

, P	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.0009	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559	4.5699	4.2990	4.0905	3.9214	3.7794	3.6571	3.5499	3.4545	2.8409	2.4957	2.2582	2.0789	1.9358	1.8175	1.7171	1.6302	1.5504	1.0852	0.8470	0.6967	0.5895
0.001	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559	4.5699	4.2990	4.0905	3.9214	3.7794	3.6571	3.5499	3.4545	2.8409	2.4957	2.2582	2.0789	1.9358	1.8175	1.7171	1.6302	1.5504	1.0853	0.8470	0.6968	0.5896
0.002	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559		4.2990	4.0905	3.9215	3.7795	3.6572	3.5500	3.4545	2.8410	2.4958	2.2583	2.0791	1.9361	1.8178	1.7174	1.6305	1.5507	1.0857	0.8476	0.6975	0.5903
0.003	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559		4.2990	4.0906		3.7795	3.6572	3.5500	3.4546	2.8411	2.4959	2.2585		1.9363	1.8180	1.7176	1.6308	1.5510	1.0862	0.8482	0.6981	0.5911
0.004	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559		4.2990	4.0906		3.7796		3.5501	3.4546		2.4961	2.2587	2.0794	1.9365	1.8183	1.7179	1.6311	1.5513	1.0867	0.8488		
0.005	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559		4.2991	4.0906		3.7796	3.6573		3.4547	2.8413	2.4962	2.2588			1.8185	1.7182	1.6314	1.5517	1.0871	0.8494		0.5926
0.006	7.8875	6.2898	5.6234	4.9559		4.2991	4.0906	3.9216	3.7797	3.6574	3.5502	3.4548	2.8414	2.4963	2.2590		1.9369	1.8187	1.7184	1.6317	1.5520	1.0876	0.8500		0.5933
0.007	7.8875 7.8875	6.2898 6.2898	5.6234 5.6234	4.9560 4.9560		4.2991	4.0907				3.5502	3.4548	2.8415	2.4964	2.2591	2.0800		1.8190	1.7187	1.6319	1.5523	1.0880	0.8505		0.5941
0.009		6.2898	5.6234	4.9560		4.2991 4.2992	4.0907 4.0907		3.7797 3.7798			3.4549 3.4549	2.8416 2.8416		2.2593 2.2594		1.9373 1.9375	1.8192 1.8194	1.7189	1.6322	1.5526	1.0885	0.8511		
0.009	7.8875	6.2898	5.6234	4.9560		4.2992	4.0907	3.9217	3.7798			3.4550					1.9377	1.8194	1.7192	1.6325 1.6328	1.5529	1.0890	0.8517 0.8523		0.5956
0.02	7.8875		5.6235	4.9561		4.2994	4.0911	3.9221	3.7802	3.6580	3.5509	3.4555	2.8427	2.4980		2.0823	1.9398	1.8220	1.7221	1.6356	1.5562	1.0941	0.8582	0.7029	
0.03	7.8876		5.6236	4.9563		4.2997	4.0914		3.7806				2.8436					1.8244	1.7247	1.6384	1.5592	1.0987	0.8640		0.6113
0.04	7.8876			4.9564		4.3000			3.7811			3.4566		2.5004		2.0859		1.8267	1.7273	1.6412	1.5622	1.1033	0.8698		0.6188
0.05	7.8876	6.2900	5.6237	4.9565		4.3002		3.9232	3.7815	3.6594		3.4572	2.8454	2.5016			1.9461	1.8291	1.7299	1.6441	1.5652	1.1079	0.8757		0.6263
0.06	7.8876	6.2900	5.6238	4.9567	4.5711	4.3005	4.0923	3.9236	3.7819	3.6598	3.5529	3.4577	2.8463	2.5029	2.2671	2.0895	1.9482	1.8314	1.7324	1.6469	1.5682	1.1125	0.8815		0.6337
0.07	7.8876	6.2900	5.6239	4.9568	4.5713	4.3007	4.0926	3.9239	3.7823	3.6603	3.5534	3.4583	2.8472	2.5041	2.2686	2.0913	1.9502	1.8338	1.7350	1.6497	1.5747	1.1170	0.8872	0.7432	0.6411
0.08	7.8876	6.2901	5.6239	4.9570	4.5715	4.3010	4.0930	3.9243	3.7827	3.6608	3.5539	3.4588	2.8481	2.5053	2.2701	2.0931	1.9523	1.8361	1.7376	1.6525	1.5777	1.1216	0.8930	0.7498	0.6485
0.09	7.8876	6.2901	5.6240	4.9571		4.3012	4.0933	3.9247	3.7831	3.6612	3.5544	3.4594	2.8490	2.5065	2.2716	2.0949	1.9544	1.8385	1.7402	1.6553	1.5807	1.1262	0.8988	0.7565	0.6559
0.1	7.8876	6.2901	5.6241	4.9572		4.3015	4.0936	3.9250	3.7835	3.6617	3.5549	3.4599	2.8500	2.5077	2.2731	2.0967	1.9565	1.8408	1.7427	1.6580	1.5837	1.1307	0.9045	0.7631	0.6633
0.2		6.2905	5.6248	4.9586		4.3041	4.0967	3.9287	3.7877		3.5599	3.4654			2.2882	2.1145	1.9771	1.8640	1.7682	1.6857	1.6133	1.1758	0.9612	0.8286	0.7358
0.3	7.8877	6.2908	5.6255	4.9600		4.3066		3.9323	3.7918					2.5319		2.1322	1.9974	1.8868	1.7934	1.7129	1.6424	1.2201	1.0165		
0.4		6.2912	5.6262	4.9613		4.3092	4.1029	3.9359	3.7959		3.5700	3.4762	2.8771	2.5439	2.3179		2.0176	1.9094	1,8181	1.7396	1.6710	1.2635	1.0705		
0.5	7.8879	6.2915		4.9627		4.3117	4.1060		3.7999			3.4816			2.3327		2.0376	1.9317	1.8425	1.7660	1.6992	1.3059	1.1230		
0.6		6.2919	5.6276	4.9640		4.3142	4.1090	3.9430	3.8040		3.5799	3.4870	2.8950		2.3473	2.1845	2.0573	1.9537	1.8666	1.7920	1.7269	1.3475	1.1742		
0.7	7.8880 7.8881	6.2922 6.2926	5.6283 5.6290	4.9654 4.9667		4.3167 4.3193	4.1121		3.8081 3.8121	3.6890	3.5848	3.4923	2.9038	2.5795 2.5912	2.3619 2.3764			1.9754	1.8904	1.8176	1.7543	1.3882	1.2239		
0.9		6.2930	5.6297	4.9681		4.3218			3.8121		3.5897 3.5946	3.4976 3.5029	2.9126 2.9214	2.6029	2.3704		2.0962 2.1153	1.9969 2.0181	1.9138	1.8428	1.7812	1.4280	1.2724		1.1240
1	7.8882	6.2933	5.6304	4.9694	4.5894	4.3243	4.1212		3.8201		3.5995	3.5029	2.9301	2.6145	2.4050		2.1133	2.0391	1.9597	1.8922	1.8338	1.5050	1.3651		1.2366
	7.8889	6.2968	5.6375	4.9828		4.3490			3.8593		3.6471	3.5597	3.0148		2.5415		2.3123	2.2349	2.1716	2.1188	2.0740	1.8451	1.7612		1.6956
3	7.8897	6.3003	5.6444	4.9960		4.3731	4.1801		3.8971		3.6928	3.6090					2.4718	2.4082	2.3572		2.2805				
4	7.8904	6.3038	5.6514	5.0090		4.3966	4.2083	4.0579	3.9336			3.6563						2.5621	2,5205	2.4869	2.4593		2.3007		
5	7.8911	6.3073	5.6582	5.0219	4.6637	4.4196	4.2357	4.0894	3.9689	3.8668	3.7789	3.7018	3.2421	3.0201	2.8893	2.8035	2.7439	2.6997	2.6653	2.6380	2.6158	2.5214	2.4971	2.4872	2.4823
6	7.8918	6.3107	5.6650	5.0345	4.6814	4.4420	4.2624	4.1200	4.0031	3.9044	3.8197	3.7455	3.3100	3.1052	2.9876	2.9122	2.8609	2.8235	2.7949	2.7724	2.7542	2.6805	2.6630	2.6561	2.6527
7	7.8925	6.3142		5.0470		4.4640		4.1498	4.0363	3.9408	3.8590	3.7876	3.3743	3.1849			2.9676	2.9359	2.9118	2.8930	2.8780	2.8192	2.8062	2.8012	2.7987
8	7.8932	6.3176	5.6785	5.0593		4.4855	4.3138	4.1787	4.0684	3 9759	3.8970	3.8283	3.4355	3.2599			3.0657	3.0384	3 0180		2.9896		2.9320	2.9283	2.9264
9	7.8939	6.3210		5.0715		4.5065			4.0996			3.8675	3.4937					3.1326	3.1151		3.0912		3.0442		
10		6.3244		5.0835		4.5271	4.3627	4.2342	4.1300	4.0431		3.9054	3.5492		3.3170		3.2400	3.2197	3.2046		3.1841	3.1513	3.1452		
20		6.3577	5.7553	5.1958		4.7128	4.5778	4.4751	4.3943	4.3286	4.2742	4.2281	3.9953	3.9123	3.8755			3.8417	3.8375	3.8342	3.8314	3.8222	3.8211		
30		6.3899	5.8146			4.8700		4.6721	4.6073			4.4792	4.3156	4.2644				4.2308	4.2292	4.2279	4.2266	4.2219	4.2216		
40		6.4209	5.8704	5.3872		5.0068	4.9097	4.8392	4.7861	4.7447		4.6846	4.5642	4.5298	4.5179			4.5122	4.5117		4.5101	4.5069	4.5069		4.5068
<u>50</u>		6.4509 6.4800	5.9229 5.9726	5.4705 5.5476		5.1283	5.0443 5.1644	4.9846	4.9404		4.8799	4.8583 5.0085	4 7665 4.9366	4.7418				4.7323	4.7322	4.7318 4.9127	4.7311 4.9122	4.7286	4.7287 4.9101		
70		6.5081	6.0198			5.3371	5.2728	5.1132 5.2286	5.0760 5.1970	5.0479 5.1734	5.0261 5.1553		5.0830	4.9178 5.0682	4.9125 5.0643		4.9121 5.0649	4.9128 5.0658	4.9129 5.0661	5.0660	5.0654	4.9099 5.0634	5.0636	4.9101 5.0636	4.9100
80		6.5354	6.0647	5.6864			5.3716		5.3061	5.2861			5.2114		5.1963			5.1986			5.1983	5.1964	5.1966		
90		6.5619	6.1076	5.7495		5.5130	5.4625		5.4055	5.3883	5.3754	5.3652	5.3257		5.3130			5.3158	5.3162		5.3157	5.3138			
100		6.5876	6.1487	5.8091	5.6653	5.5915	5.5465		5.4966			5.4620	5.4284		5.4176			5.4207	5 4211	5.4211	5 4207	5.4189			
200			6.4881	6.2753				6.1430	6.1365	6.1319		6 1257	6.1129		6.1075			6.1119	6 1124	6.1125	6.1122	6.1107	6.1110		
300		6.9939	6.7445			6.5463	6.5390		6.5318			6.5262	6.5165					6.5154	6.5159		6.5156			6.5142	
400		7.1478		6.8548														6.8034			6.8035	6 8016			
500	8.1933	7.2815	7.1248	7.0586										7.0268					7.0308		7.0304				

1,	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
600	8.2454	7.4000	7.2737	7.2289	7.2219	7.2238	7.2250	7.2254	7.2257	7.2255	7.2251	7.2244	7.2179	7.2138	7.2135	7.2146	7.2165	7.2179	7.2185	7.2186	7.2182	7.2166	7.2169	7.2169	7.2169
														7.3723											
800	8.3430	7.6031	7.5191	7.5010	7.5025	7.5083	7.5116	7.5135	7.5149	7.5155	7.5158	7.5156	7.5117	7.5086	7.5089	7.5103	7.5123	7.5139	7.5146	7.5148	7.5145	7.5132	7.5136	7.5137	7.5137
														7.6270											
														7.7307											
																									8.3450
3000	9.0993	8.7373	8.7116	8.7017	8.6984	8.7000	8.7002	8.6997	8.6992	8.6985	8.6976	8.6964	8.6880	8.6832	8.6826	8.6834	8.6852	8.6865	8.6869	8.6870	8.6866	8.6848	8.6850	8.6850	8.6850
4000	9.3469	9.0340	9.0039	8.9891	8.9840	8.9848	8.9844	8.9836	8.9829	8.9820	8.9810	8.9797	8.9708	8.9659	8.9652	8.9661	8.9678	8.9691	8.9695	8.9696	8.9692	8.9673	8.9675	8.9675	8.9675
5000	9.5639	9.2893	9.2600	9.2457	9.2410	9.2421	9.2420	9.2413	9.2407	9.2398	9.2389	9.2376	9.2291	9 2242	9.2236	9.2245	9.2262	9.2275	9.2280	9.2280	9.2276	9.2258	9.2260	9.2260	9.2260
6000	9.7587	9.5196	9.4943	9.4828	9.4792	9.4808	9.4810	9.4806	9.4802	9.4795	9.4786	9.4775	9.4693	9 4646	9.4640	9.4649	9.4667	9.4680	9.4685	9.4685	9.4681	9.4664	9.4666	9.4666	9.4666
7000	9.9364	9.7317	9.7119	9.7037	9.7013	9.7035	9.7041	9.7040	9.7037	9.7031	9.7024	9.7013	9.6935	9.6889	9.6885	9.6894	9.6912	9.6926	9.6930	9.6931	9.6927	9.6910	9.6912	9.6912	9.6912
8000	10.1003	9.9291	9.9150	9.9100	9.9087	9.9115	9.9125	9.9126	9.9125	9.9120	9.9114	9.9104	9.9030	9.8985	9.8981	9.8991	9.9009	9.9022	9.9027	9.9028	9.9024	9.9007	9.9010	9.9010	9.9010
														10.0942											
10000	10.3948	10.2859	10.2823	10.2831	10.2837	10.2875	10.2891	10.2895	10.2897	10.2895	10.2890	10.2881	10.2813	10.2770	10.2767	10.2778	10.2796	10.2810	10 2815	10.2816	10.2812	10.2796	10.2799	10.2799	10.2799

Значения функции $W_N(t_y, oldsymbol{eta})$ для аргумента $oldsymbol{eta} = 0.6 \div 20.0$

4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	15.0	20.0
0.0001	0.5075	0.4445	0.3938	0.3520	0.3175	0.2031	0.1413	0.1032	0.0780	0.0606	0.0479	0.0385	0.0314	0.0259	0.0215	0.0181	0.0153	0.0130	0.0111	0.0096	0.0083	0.0072	0.0062	0.0019	0.0000
0.0002	0.5076	0.4446	0.3939	0.3521	0.3176	0.2032	0 1414	0.1033	0.0781	0.0607	0.0480	0.0386	0.0315	0.0260	0.0216	0.0181	0.0153	0.0130	0.0112	0.0096	0.0083	0.0072	0.0063	0.0019	0.0000
0.0003	0.5077	0.4447	0.3940	0.3522	0.3177	0.2033	0.1415	0.1034	0.0782	0.0608	0.0481	0.0387	0.0316	0.0260	0.0217	0.0182	0.0154	0.0131	0.0112	0.0096	0.0084	0.0073	0.0063	0.0019	0.0000
0.0004	0.5077	0.4448	0.3941	0.3523	0.3178	0.2034	0.1416	0.1035	0.0783	0.0609	0.0482	0.0388	0.0317	0.0261	0.0217	0.0183	0.0154	0.0132	0.0113	0.0097	0.0084	0.0073	0.0064	0.0020	0.0000
0.0005	0.5078	0.4449	0.3942	0.3524	0.3179	0.2035	0.1417	0.1037	0.0784	0.0610	0.0483	0.0389	0.0317	0.0262	0.0218	0.0183	0.0155	0.0132	0.0113	0.0097	0.0084	0.0073	0.0064	0.0020	0.0000
0.0006		0.4449	0.3942	0.3525		0.2036	0.1418	0.1038	0.0785	0.0611	0.0484	0.0390	0.0318	0.0263	0.0219	0.0184	0.0156	0.0133	0.0114	0.0098	0.0085	0.0074	0.0064	0.0020	0.0000
0.0007	0.5080	******	0.3943	0.3526	0.3181	0.2037	0.1419	0.1039	0.0786	0.0611	0.0484	0.0390	0.0319	0.0263	0.0219	0.0184	0.0156	0.0133	0.0114	0.0098	0.0085	0.0074	0.0065	0.0020	0.0000
0.0008	0.5081	0.4451	0.3944	0.3527	0.3182	0.2038	0.1420	0.1040	0.0787	0.0612	0.0485	0.0391	0.0320	0.0264	0.0220	0.0185	0.0157	0.0134	0.0115	0.0099	0.0086	0.0075	0.0065	0.0021	0.0000
0.0009	0.5082	0.4452	0.3945	0.3528	0.3183	0.2039	0.1421	0.1041	0.0788	0.0613	0.0486	0.0392	0.0320	0.0265	0.0221	0.0186	0.0157	0.0134	0.0115	0.0099	0.0086	0.0075	0.0066	0.0021	0.0000
0.001	0.5082	0.4453	0.3946	0.3529	0.3184	0.2040		0.1042		0.0614	0.0487	0.0393	0.0321		0.0221	0.0186	0.0158	0.0135			0.0087	0.0075	0.0066	0.0021	0.0000
0.002	0.5090	0.4462	0.3955	0.3538		0.2050	0.1433	0.1051	0.0799	0.0624	0.0496		0.0329		0.0228	0.0193	0.0164	0.0141		0.0105		0.0080	0.0070	0.0023	0.0000
0.003	0.5099	0.4470	0.3964	0.3547	0.3203	0.2061	0.1443	0.1061	0.0809	0.0633	0.0505	0 0410	0.0337	0.0280	0.0235	0.0200	0.0170	0.0146	0.0127	0.0110	0.0097	0.0084	0.0074	0.0026	0.0011
0.004	0.5107	0.4479	0.3973	0.3557	0.3213	0.2071	0.1454	0.1071	0.0819	0.0642	0.0514	0.0418	0.0345		0.0243	0.0206	0.0176	0.0152				0.0089	0.0079	0.0028	0.0012
0.005	0.5115		0.3982	0.3566	0.3222	0.2081		0.1081	0.0828	0.0652	0.0523	0.0427	0.0353		0.0250	0.0213	0.0183	0.0158				0.0093	0.0083	0.0031	0.0014
0.006			0.3991	0.3575	0.3232	0.2092	0.1475	0.1092			0.0532	0.0435	0.0361	0 0303	0.0257	0.0219	0.0189	0.0164				0.0098	0.0087	0.0033	0.0015
0.007	0.5131		0.4000	0.3585	0.3241	0.2102	0.1485	0.1102	0.0848	0.0671	0.0541	0.0444	0.0369	0 0310	0.0264	0.0226	0.0196	0.0170	0.0149	0.0131	0.0116	0.0103	0.0092	0.0035	0.0017
0.008	0.5139		0.4009	0.3594	0.3251	0.2112	0.1495	0.1112	0.0858	0.0680	0.0550	0.0453	0.0377	0 0318	0.0271	0.0233	0.0202	0.0176		0.0137	0.0121	0.0108	0.0097	0.0038	0.0019
0.009	0.5147		0.4018	0.3603	0.3261	0.2123	0.1506	0.1123	0.0869	0 0690	0.0559	0.0461	0.0385		0.0278	0.0240	0.0209	0.0182		0.0142		0.0113	0.0101	0.0041	0.0021
0.01				0.3613	0.3270	0.2133		0 1133		0.0700	0.0568		0.0393		0.0286	0.0247	0.0215	0.0189		0.0148		0.0118	0.0106		0.0022
0.02	0.5245		0.4117			_	0.1621	0.1236		0.0796	0.0661	0.0558	0.0478		0.0362	0.0320	0.0284	0.0254		0.0207		0.0172	0.0158		0.0045
0.03	0.5326		0.4207	0.3799	0.3462	0.2340	0.1727	0.1341	0.1082	0.0895	0.0757	0.0651	0.0566	0.0499	0 0444	0.0398	0.0359	0.0326	0.0298	0.0273	0.0252	0.0233	0.0217	0.0119	0.0077
0.04	0.5406	0.4788	0.4296	0.3892	0.3553	0.2444	0.1833	0.1449	0.1185	0.0998	0.0855	0 0745	0.0659	0.0588	0.0529	0.0481	0.0439	0.0403	0.0373	0.0346		0.0301	0.0283	0.0170	0.0118
0.05			0.4386		0.3648	0.2551	0.1938	0.1556		0.1101	0.0957	0.0844	0.0754	0.0681	0.0620	0.0568	0.0524	0.0487	0.0454		0.0399	0.0376	0.0356	0.0229	0.0168
0.06	0.5567	*****	0.4475	0.4077	0.3744	0.2655	0.2045	0.1663			0.1060	0.0946	0.0853	0.0777	0.0714	0.0661	0.0614	0.0575		0.0509		0.0457	0.0435	0.0296	0.0227
0.07	0.5647		0.4564	0.4170	0.3839	0.2759	0.2153	0.1772	0.1507	0.1312	0.1165	0.1049	0 0955	0.0877	0.0812	0.0757	0.0709	0.0668		0.0599	0.0570	0.0544	0.0521	0.0372	0.0296
0.08	0.5727		0.4653	0.4262	0.3934	0.2863	0.2261		0.1617		0.1272	0.1154	0.1060	0.0981	0.0913	0.0857	0.0807	0.0765	0.0727	0.0694	0.0664	0.0637	0.0612	0.0454	0.0373
0.09	0.5807		0.4741	0.4354	0.4029	0.2967		0.1989				0.1262	0.1166		0.1019	0.0961	0.0910	0.0866		0.0793	0.0762	0.0734	0.0709	0.0544	0.0458
0.1	0.5887		0.4830			0.3072	0.2478		0.1838			_	0.1275			0.1068	0.1017	0 0972				0.0836			0 0550
0.2	0.6670	0.6137	0.5710	0.5352	0.5060	0.4103	0.3573	0.3228		_	0.2663		0.2454			0.2253	0.2204	0.2160		0.2087	0.2056	0.2027	0.2002	0.1837	0.1749
0.3	0.7430		0.6556			0.5116	0.4646	0.4345						0.3627		0.3526			0.3419			0.3344	0.3324	0.3194	0.3128
0.4	0.8165	0.7722	0.7372	0.7089	0.6854	0.6103	0.5697	0.5432	0.5256	0.5127	0.5029	0.4952	0.4890	0.4839	0.4796	0 4759	0.4728	0 4700	0.4677	0 4655	0.4637	0.4620	0.4605	0.4509	0.4461

<i>t.</i> \ 1	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	15.0	20.0
0.5	0.8875	0.8473	0.8157	0.7904	0.7695	0.7037	0.6689	0.6474	0.6329	0.6224	0.6145	0.6084	0.6034	0.5994	0.5961	0 5932	0.5908	0.5887	0.5869	0.5853	0.5838	0.5826	0.5814	0.5742	0.5707
0.6	0.9542	0.9177	0.8893	0.8684	0.8499	0.7924	0.7627	0 7448	0.7328	0 7242	0.7179	0 7129	0.7090	0.7059	0.7032	0.7010	0.6991	0.6975	0.6961	0.6948	0.6937	0.6927	0.6919	0.6863	0.6837
0.7	1 0200	0.9869	0.9614	0.9412	0.9248	0.8763	0.8511	0.8360	0.8261	0.8191	0.8139	0.8099	0.8068	0 8042	0.8021	0.8004	0.7989	0.7976	0.7965	0.7955	0.7946	0.7938	0.7931	0.7888	0.7867
0.8	1.0833	1.0533	1.0303	1.0123	0.9977	0.9539	0.9323	0.9196	0.9114	0.9056	0.9014	0.8981	0.8956	0.8935	0 8918	0.8904	0.8892	0 8898	0.8889	0.8881	0 8874	0 8868	0.8862	0.8828	0.8811
0.9	1.1441	1.1169	1.0962	1.0801	1.0672	1.0288	1.0103	0.9995	0.9926	0.9878	0.9843	0.9816	0.9795	0.9778	0.9764	0.9752	0.9742	0.9733	0.9726	0.9720	0.9714	0.9709	0.9704	0 9676	0.9662
1	1.2024	1.1778	1.1592	1.1447	1.1333	1.0996	1.0836	1.0744	1.0686	1.0645	1.0616	1.0593	1.0575	1.0561	1.0549	1.0540	1.0531	1 0524	1.0518	1.0513	1.0508	1.0504	1.0500	1.0476	1 0465
2	1.6805	1.6703	1.6630	1.6576	1.6535	1.6386	1.6337	1.6310	1.6294	1.6282	1.6274	1 6268	1.6263	1.6259	1.6256	1.6253	1.6251	1.6249	1.6247	1.6246	1.6244	1.6243	1.6242	1.6235	1.6232
3	2 0173	2.0122	2.0087	2.0062		1.9992	1.9970		1.9951	1.9946	1.9942	1.9939	1 9937	1 9935	1.9934	1 9933	1.9931	1.9931	1.9930	1.9929	1.9929	1.9928	1.9928	1.9925	1 9923
4	2.2737	2.2708		2.2674	2.2664	2.2636			2.2613	2.2610	2.2608	2.2606		2.2604	2.2603	2.2603	2.2602	2.2601	2.2601	2.2601	2 2600	2.2600		2.2598	2.2597
5	2.4794	2.4776		2.4755		2.4731	2.4723	2.4719	2.4716	2.4714	2.4713	2.4712		2 4710	2.4710	2.4710	2 4709	2.4709	2.4709	2.4708		2.4708	2 4708	2 4707	2.4706
6	2 6507	2.6495		2.6481			2.6459		2.6454	2.6453		2.6451	2.6451	2.6450	2.6450		2.6449	2.6449	2 6449	2.6449		2.6449	2.6448	2 6448	2.6447
7	2.7974	2.7965	2.7959	2.7954	2.7951	2.7942	2.7939		2.7935	2.7934	2.7934	2.7933		2.7932	2.7932		2.7932	2 7932	2.7931	2.7931	2.7931	2.7931	2.7931	2 7930	2.7930
- 8	2.9254	2.9247	2.9243	2.9239		2.9230	2.9228		2.9225	2.9224	2.9224	2.9224	2.9223	2.9223	2 9223		2.9223	2 9222	2.9222	2.9222		2.9222	2.9222	2.9222	2.9221
9	3.0390	3.0385	3.0381	3.0379		3.0372	3.0370		3.0368	3.0367		3.0367	3.0366	3.0366			3 0366		3 0366	3.0366		3.0365	3.0365	3.0365	3.0365
10	3.1411	3.1407	3.1404	3.1402			3.1395		3.1393	3.1393		3.1392		3.1392	3.1392		3.1392	3.1392	3.1392	3.1392		3.1391	3.1391	3.1391	3.1391
20	3 8202	3.8201	3.8201	3.8200		3.8199	3.8199		3.8198	3.8198		3.8198		3.8198			3 8198	3.8198	3.8198			3.8198	3.8198	3.8198	3.8198
30	4.2212	4.2212	4.2212	4.2212		4.2211	4.2211	4.2211	4.2211	4.2211		4.2211	4.2211	4.2211			4.2211	4.2211	4.2211		4.2211	4.2211	4.2211	4.2211	4.2212
40	4.5067	4.5067	4.5067	4.5067		4.5067	4.5067	4.5067	4.5067	4.5067		4.5067	4.5067	4.5067	4.5067		4.5067	4.5067	4.5067	4 5067	4.5067	4.5067	4.5067	4.5067	4.5068
50	4.7286	4.7286	4.7286	4.7286		4.7286	4.7286	4.7286	4.7286	4.7286		4.7286	4.7286	4.7286	4.7286		4.7286	4.7286	4.7286			4.7286	4.7286	4 7286	4.7287
60	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101		4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101		4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4 9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101	4.9101
70	5.0636	5.0636		5.0636		5.0636	5.0636		5.0636	5.0637		5.0637	5.0637	5 0637	5.0637		5.0637	5.0637	5.0637	5.0637		5.0637	5.0637	5.0637	5.0637
80	5.1967	5.1967	5.1967	5.1967		5.1967	5.1967		5.1967	5.1967		5.1967		5.1967	5.1967		5.1967	5.1967	5.1967	5.1967		5.1967	5.1967	5.1968	5.1968
90 100	5 3141	5.3141	5.3141	5.3141			5.3141	5.3141	5.3141	5.3141		5.3142		5.3142	5.3142		5.3142					5.3142	5.3142	5.3142	5.3142
200	5 4192 6 1111	5.4192 6.1111	5.4192 6.1112				5.4192 6.1112		6.1113	6.1113	5.4192	5.4192 6.1113		5.4192 6.1113	5.4192 6 1113		5.4192 6.1113		5,4192	5.4193		5.4193	5.4193	5 4193	5.4193
300	6.5142	6.5142	6.5142	6.5142		6.1112	6.5142	6.5142	6.5142	6 5142		6 5142	6.5142	6.5142	6.5142		6.5142	6.5143	6.1113	6.1113 6.5143	6.1113	6.1113	6.1113	6.1113	6.1113
400	6.8018	6.8018	6.8018	6.8018		6.8018	6.8018		6.8018	6.8018				6 8018	6 8018	6 8018	6.8018		6 8018	6.8018		6.8018	6.8018	6.8018	6.8018
500	7.0288	7.0288		7.0288		7.0288	7.0288		7.0288	7.0288		7.0288		7.0288	7.0289		7.0289		7.0289	7.0289		7.0289	7.0289	7.0289	7.0289
600	7.2169	7.2169	7.2169	7.2170		7.2170	7.2170		7.0200	7.2170				7.2170	7 2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2170	7.2171
700	7.3766	7.3766		7.3766			7.3767	7.3767	7.3767	7.3767		7 3767		7.3767	7.3767		7.3767	7.3767	7.3767	7.3767	7.3767	7.3767	7.3767	7.3767	7 3768
800	7.5138	7.5138	7.5138	7.5138			7.5139		7.5140	7.5140				7.5140	7.5140		7.5140	7.5140	7.5140			7.5140		7.5140	7.5140
900	7.6328	7.6328	7.6329	7.6329		7 6329			7 6330	7 6330				7.6330	7.6330	7 6330	7.6330	7.6331	7.6330	7.6330	7.6330	7.6331	7.6331	7.6331	7.6331
1000	7.7368	7.7369	7.7369	7.7369		7 7370		7.7370	7.7370	7 7371	7.7371	7 7371	7.7371	7.7371	7.7371		7.7371	7.7371	7.7371	7.7371	7.7371	7.7371	7.7371	7 7371	7.7371
2000	8.3451	8.3451	8.3451	8.3451	8.3451		8 3451	8.3451	8.3452	8.3452	8.3452	8.3452		8.3452	8.3452		8.3452		8.3452	8.3452		8.3452	8.3452	8.3452	8.3452
3000	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850		8.6850			8.6850	8.6850	8.6850	8.6850		8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6850	8.6851
4000	8 9675	8.9675	8.9675	8.9675		8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675	8.9675		8.9675	8.9675	8.9675	8.9675		8.9675		8.9675	8.9675
5000	9.2260	9.2260	9.2260			9.2260	9.2260	9.2260	9.2260	9.2260	9.2260			9.2260			9.2260	9.2260	9.2260	9.2260		9.2260		9.2260	9.2261
6000	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4666	9.4667	9.4667	9.4667	9 4667		9 4667	9 4667	9.4667	9.4667	9.4667	9.4667	9 4667	9.4667	9.4667
7000	9.6912	9.6912	9.6912	9.6912	9.6912	9.6913	9.6912	9 6913	9.6913	9.6913	9 6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913	9 6913	9.6913	9.6913	9.6913	9.6913
8000	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9010	9.9011	9.9010	9.9011	9.9011	9.9011	9.9011	9.9011		9.9011	9.9011		9.9011	9.9011	9.9011	9 9011	9.9011
9000	10.0969	10.0969	10 0969	10.0969	10 0969	10 0970	10.0970	10.0970	10.0970	10 0970	10 0970	10 0970	10 0970	10 0970	10 0970	10 0970	10 0970	10.0970	10 0970	10.0970	10.0970	10.0970	10.0970	10 0970	10.0970
10000	10.2799	10.2799	10.2799	10.2799	10.2800	10.2800	10 2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800	10.2800

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе DELAY2 (автор *Neuman*, 1986) для параметра $\sigma = 10^{-9}$, где $\sigma - \text{см}$. в разделе 6.2.

Литература: Neuman, 1972, 1973, 1974, 1975.

Функция $W_{NW}(u,\beta)$

Функция:
$$W_{NW}(u,\beta) = \int_{\beta}^{\infty} W\left(\frac{u\tau^2}{\tau^2 - \beta}\right) \exp(-\tau^2) d\tau$$
.

Предельное значение функции: $W_{NW}(u,0) = W(u)$, $W_{NW}(0,\beta) = \infty$, где W(u) – функция влияния скважины (Приложение 26).

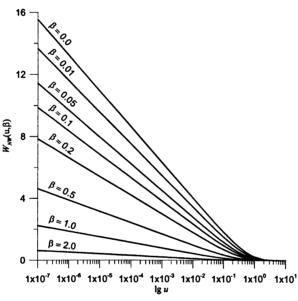


Рис. ПЗО. Зависимость функции от логарифма первого аргумента при различных значениях второго аргумента.

0.1177404043

 a_4

0.152695636

0.1441917632

b

Апп	роксимация (под	обра	на автором):									
	Диапазон				Зависимость							
u ·	< 0.01 и $10^{-5} \le \beta$:	≤1.0		W_N	$_{W}(u,\beta) = -C(\beta) \ln u - $	$A(\beta)$,					
где												
$C(\beta$	$C(\beta) = a_0 \exp(b_0 \sqrt{\beta}) + a_1 \exp(b_1 \beta) + a_2 \exp(b_2 \beta^2) + a_3 \exp(b_3 \beta^3) + a_4 \exp(b_4 \beta^4) + a_5 \exp(b_5 \beta^5),$											
Α(β	$ = \frac{c_0}{\sqrt{\beta}} + c_1 \exp\left(\frac{a}{\sqrt{\beta}}\right) $	$\left(\frac{l_1}{\overline{\beta}}\right)$	$+c_2 \exp\left(\frac{d_2}{\sqrt{\beta}}\right) + c_3 \in$	exp(a	$(d_4\beta^2) + c_4 \exp(d_4\beta^3) +$	c ₅ e	$\exp(d_5\beta^4)$					
	C(eta) $A(eta)$											
a ₀	0.3417002069	b_0	-3.340961289	c_0	-0.00001486338765							
a_1	0.1636688436	b_1	-9.763932273	c_1	0.1263841135	d_1	-0.1362851532					
a ₂	0.08009713177	<i>b</i> ₂	-26.13718737	c_2	0.04322525953	d_2	-0.0275872065					

C3

0.2984049043

0.02317877338

0.2631103306 d_5

-4.654639762

-314.2350514

-0.6049903099

-16.94717556

-3.126743379

-0.04030147022

Значения функции $W_{NW}(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-7} \div 10.0$; $\beta=0, \beta=10^{-5} \div 10$.

Значения функции $W_{NW}(u, oldsymbol{eta})$

TA	•	0.00001	0.0001	0.0005	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
10-7	15 54088	15.48050		15.11485	14 93905	14 69119	14 20225	13 65639	12 89522	11 43017	9 86692	7 84835	4 61891	2 23634	0 62769	0 02053	0 00010
2e-7	14 84773	14 78983		14 43919	14 27063	14 03300	13 56431	13 04119		10 90904	9 41311	7.48300	4.39896	2 12731	0 59616	0 01945	0 00009
3e-7	14 44227	14 38581		14 04395	13 87963	13 64798	13.19115	12.68133	11 97076	10 60420	9 14764	7 26928	4 27031	2 06353	0 57771	0 01881	0 00009
4e-7	14.15459	14 09915		13.76353	13 60221 13 38702	13.37480	12.92638	12 42600 12 22795	11.72868	10 38791	8 95929 8.81319	7 11765 7 00003	4 17902 4 10822	2 01827	0 56462 0 55447	0.01836 0.01801	0 00009
6e-7	13 74912	13.69514		13 36829	13 21 121	12 98979	12 55322	12.06613	11.38749	10 08307	8.69382	6 90394	4 05037	1 95450	0 54617	0 01773	0 00008
	13 59497	13 54153	13 42613	13 21803	13 06256	12.84341	12 41135	11 92932	11 25777	9.96718	8 59290 8 50547	6 82268	4 00145	1 93025	0 53916	0 01749	0 00008
8e-7 9e-7	13.46144	13.40848	13 29411 13 17765	13 08787 12.97305	12 93379 12 82021	12 71661 12 60477	12.28845	11 81080 11.70627	11 14541 11.04630	9 86678 9 77823	8.42836	6 75230 6.69022	3 95908 3 92171	1 90924 1 89072	0.53308 0.52772	0 01728	0 00008
1e-6	13 23830	13 18613	13.07348	12 87035	12.71860	12 50472	12.08308	11.61276	10 95764	9 69902	8.35938	6 63469	3 88828	1 87414	0 52293	0 0 1 6 9 3	0 00008
2e-6 3e-6	12 54515	12 49546		12 19469	12 05018		11.44515	10.99756 10 63770	10 37437 10.03318	9 17789 8 87305		6 26934 6 05563	3 66834 3 53968	1 76512 1 70134	0 49139 0 47294	0 01584 0 01521	0 00007
4e-6	12.13969	12 09144 11 80479		11 79946 11 51903	11 65918		10 80722	10 38237	9 79111	8.65677	7.45175	5 90400	3 44840	1 65609	0 47294	0 01321	0.00007
5e-6	11 62886	11.58244	11 48221	11 30152	11 16658	10.97645	10.60185	10.18433	9.60334	8.48900	7 30566	5 78638	3.37760	1 62099	0 44970	0 01441	0 00007
6e-6 7e-6	11 44654	11 40077 11 24717		11 12380	10 99076 10 84211	10 80333 10 65695	10 43405	10 02251 9 88570	9 44992 9 32021	8 35193 8 23604	7 18629 7 08537	5 69029 5 60904	3 31975 3 27084	1 59232 1 56807	0 44141 0 43440	0 01413	0 00007
8e-6	11.15886		11 01751	10 9/334	10 71335		10.29218	9.76719	9 20784	8.13565	6 99794	5 53866	3 22847	1 54707	0 42832	0 01367	0 00006
9e-6	11 04108	10 99676	10.90106	10.72857	10.59977	10 41831	10 06089	9 66265	9 10873	8.04710		5.47658	3 19110	1 52854	0 42296	0 01349	0 00006
1e-5	10 93572	10.89177		10 62586	10 49816		9 96392	9 56914	9 02008 8 43682	7 96789 7 44678	6 85185 6 39806	5 42105 5 05573	3 15767 2 93776	1 51197 1 40297	0 41817 0 38664	0 01333	0 00006
2e-5	9 83713	9 79710	10 11157 9.71069	9.95021 9.55499	9 82975 9 43876	9 66009 9 27508	9.32600 8 95285	8 95396 8.59411		7 14196	6.13262	4 84204	2 80913	1 33921	0 36821	0 01161	0 00005
4e-5	9 54946	9 51046		9 27458	9 16135	9 00192	8 68810	8.33880	7 85359	6.92570	5 94429	4 69043	2 71787	1 29398	0 35513	0 01116	0 00005
5e-5	9 32632	9.28812	9 20565	9 05707	8 94618		8 48274 8 31496	8 14077 7.97897	7.66584 7.51243	6 75795 6 62090	5 79822 5 67887	4 57284 4 47677	2 64709 2 58927	1 25890	0 34498	0 01081	0 00005
7e-5	9 14401 8 98987	9.10646 8.95287	9 02540 8 87300	8 87936 8 72911	8.77038 8 62174	8 61693 8 47056	8 17310	7.97897	7 38274	6 50502		4 39554	2 54038	1 20601	0.32969	0 01032	0 00005
8e-5	8 85635	8 81982	8 74098	8 59896	8 49298	8 34378	8 05022	7 72367	7 27039	6.40465	5 49057	4 32519	2 49804	1 18503	0 32363	0 01008	0 00005
9e-5	8 73858	8.70247	8 62454	8.48416	8.37941	8.23194	7.94183	7.61915	7 17129	6 31612	5 41348	4 26313	2.46069	1.16652	0 31828	0 00989	0 00004
1e-4 2e-4	8 63322 7 94018	8 59750 7 90692	8 52038 7 83516	8 38147 7 70592	8 27782 7.60951	8.13191 7.47384	7.84488 7 20708	7 52565 6 91060	7 08265 6 49954	6 23692 5 71599	5 34452 4.89092	4 20762 3.84252	2 42729 2 20759	1 14997	0 31349	0 00973 0.00865	0 00004
3e-4	7.53481	7 50301	7 43437	7 31079	7 21862	7 08894	6 83404	6.55088	6 15851	5 41134	4 62567	3 62904	2 07916	0 97753	0 26368	0 00802	0 00004
4e-4	7 24723	7.21645	7.15004	7 03048	6 94132	6 81589	6 56940	6 29569	5 91659	5 19523	4 43752	3 47763	1 98810	0 93244	0 25067	0 00757	0 00003
5a-4 6e-4	7 02419 6 84197	6 99421 6 81264	6.92952 6 74936	6 81307 6 63546	6 72625 6 55054	6 60411	6.19649	6.09779 5.93611	5 72897 5 57571	5 02765 4 89075	4 29163 4 17246	3 36024 3 26436	1 91751 1 85987	0 89751	0 24059 0 23237	0 00723	0 00003
70-4	6 68791	6 65914	6 59705	6 48531	6 40200	6 28484	6 05475	5 79943	5.44615	4 77503	4 07173	3 18332	1 81117	0 84490	0 22543	0 00671	0 00003
8e-4	6 55448	6 52618	6 46513	6 35525	6 27335	6 15816	5 93198	5 68105	5 33393	4,67481	3 98450	3 11315	1 76904	0 82405	0 21942	0 00651	0 00003
9e-4 1e-3	6 43680 6 33154	6,40892 6 30404	6.34878 6.24471	6 24055 6 13795	6 15988	6 04644 5 94651	5 82371 5 72686	5 57665 5 48328	5.23497 5 14646	4 58643 4 50739	3 90758 3 83879	3 05128 2 99595	1 73183 1 69860	0 80568 0 78925	0 21413 0 20941	0 00633	0 00003
2e-3	5 63939	5 61437	5 56042	5.46337	5 39107	5 28947	5 09017	4 86942	4 56465	3 98793	3 38682	2.63258	1 48055	0 68163	0 17851	0 00513	0 00002
3e-3	5 23493	5 21136	5 16056	5.06920	5 00117	4 90559	4 71822	4 51085	4 22487	3 68469	3 12311	2 42074	1 35366	0 61915	0 16064	0 00453	0 00002
4e-3 5e-3	4.94824	4 92572	4 87715 4 65755	4 78985 4 57339	4 72485 4 51075	4 63355	4 45466 4 25049	4 25681 4 06003	3 98418 3 79777	3 46996 3 30373	2 93646 2.79203	2 27091 2 15505	1 26406	0 57513	0 14810 0 13846	0 00411	0 00002
6e-3	4 54477	4 52371	4 47831	4 39673	4 33602	4.25077	4.08387	3 89947	3 64570	3 16816		2 06066	1 13860	0 51367	0 13066	0 00354	0 00001
7e-3	4 39162	4.37112	4 32693	4 24753	4 18844	4 10551	3 94318	3.76390	3 51732	3 05374	2 57496	1 98108	1 09122	0 49052	0 12413	0 00333	0 00001
8e-3 9e-3	4 25908 4 14229	4 23907 4 12271	4 19592 4 08049	4 11842	4 06075 3 94825	3.97982 3 86909	3 82146 3.71422	3 64662 3 54332	3 40628 3.30848	2 95481 2 86771	2 48911 2 41355	1 91234 1 85187	1.05035	0 47059	0 11851	0 00315	0 00001
1e-2	4.03793	4 01873		3 90301	3 84772	3.77014	3 61842	3 45103	3 22113	2 78993	2 34610	1 79793	0 98245	0 43756	0 10925	0 00285	0.00001
2e-2	3 35471	3 33805	3.30216	3 23781	3 18991	3 12284	2.99189	2 84779	2 65051	2 28259	1.90689	1 44755	0 77582	0 33784	0 08164	0 00199	0 00001
3e-2 4e-2	2 95912 2 68126	2 94397 2 66719	2 91134 2 63690	2 85283 2 58260	2 80937 2 54231	2 74852 2 48590	2 62986	2 49952 2 25554	2 32150	1 99083 1 78716	1 65512	1 24766	0 65918 0 57905	0 28228 0 24455	0.06657	0 00155 0 00126	0,00000
5e-2	2 46790	2 45467	2 42621	2.37531	2 33738	2 28446	2.18146	2 06865	1 91510	1.63163	1 34636	1 00397	0 51876	0 21646	0 04914	0 00106	0.00000
6e-2	2 29531	2 28278	2.25582	2 20753	2 17173	2 12167	2 02432	1 91781	1 77305	1 50650	1 23921	0 91989	0 47092	0 19436	0 04343	0 00090	0 00000
7e-2 8e-2	2 15084 2 02694	2.13890 2 01552	2.11322 1 99095	2 06724 1 94699	2 03316 1.91441	1 98554 1 86890	1 89298 1 78052	1.79183	1 65453 1 55318	1.40228	1.15018	0 85026 0 79116	0.43158	0.17636 0 16131	0 03884	0 00078	0.00000
9e-2	1 91874	1 90778	1 88420	1 84219	1.91441	1 76713	1 68244	1 59005	1 46493	1 23603	1 00860	0 74005	0.39842	0 14848	0 03185	0 00061	0.00000
1e-1	1 82292	1 81237	1.78968	1 74926	1 71904	1 67708	1.59570	1.50699	1 38700	1 16787	0.95073	0 69522	0 34509	0 13738	0 02912	0 00054	0 00000
2e-1	1 22265	1 21483 0.89946	1 19803	1 16805	1 14592 0.84481	1 11510	1 05560 0 77361	0 99117 0.72313	0.65588	0 74927 0 53622	0 59844	0 42571 0 29388	0.19972	0 07443	0.00835	0 00022	0.00000
3e-1 4e-1	0.90568	0.89946	0.88611	0 86233 0 66691	0.84481	0 82045 0 63262	0.59449	0.72313		0 40380		0.21461	0.13199	0 03152	0.00833	0 00006	0.00000
5e-1	0 55977	0 55550	0.54635	0 53008	0 51814	0 50159	0 46993	0 43610	0 39147	0 31348	0 24092	0 16213	0 06791	0 02218	0 00352	0 00004	0.00000
6e-1 7e-1	0 45438	0 45076 0 37068	0 44302 0 36407	0 42927 0.35234	0.41919	0 40524 0 33189	0.37861	0 35026 0.28530	0 31302	0.19986	0 18899	0 12533 0 09853	0 05095	0 01608	0 00243	0 00002	0,00990
8e-1	0 3/3//	0 3 7 0 6 8		0.29219	0.34373	0 33189	0.30929	0.28530	0 20825	0.19986	0 12148	0 07847	0 03024	0.00897	0 00172	0.00001	0.00000
9e-1	0 26018	0 25789	0.25298	0.24429	0 23 794	0 22918	0 21258	0 19505	0.17229	0 13358	0 09894	0 06314	0 02375	0 00685	0 00091	0 00001	0.00000
1.0	0 21938	0 21739	0.21313	0.20560	0.20010	0.19253	0 17821	0.16310		0 11053	0.01449	0 05124	0.00253	0 00529	0.00067	0 00000	0:00000
2.0 3.0	0.01305	0 04835	0.04718	0 04513	0.04364 0.01144	0.04161	0.03782	0 03391	0.02900	0 02107	0.01449	0 00832	0.00253	0 00009	0.00003	0 00000	0:00000
4.0	0 00378	0 00372	0,00361	0.00341	0.00326	0.00307	0 00272	0.00236	0 00194	0 00129	0 00081	0 00040	0 00009	0.00002	0 00000	0 00000	0.00000
5.0	0.00115	0 00113	0.00109	0 00103	0.00098	0.00092	0 00080	0 00069	0 00055	0 00036	0.00021	0 00010	0 00002	0.00000	0 00000	0.00000	0.00000
6.0 7.0	0.00036	0 00035	0 00034	0 00032	0.00030	0.00028	0 00024	0.00006	0 00016	0 00010	0 000001	0 00003	0 00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8.0	0.00004	0 00004	0 00004	0 00003	0 00003	0.00003	0 00002	0.00002	0 00002	0 00001	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0.00000
9.0	0 00001	0 00001	0.00001	0 00001	0.00001	0.00001	0 00001	0.00001	0.00000	0.00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0.00000	0.00000	0.00000
10.0	0.00000	0 00000	0.00000	0.00000	0 00000	0.00000	0 00000	0.00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 000000	0 00000	0.00000	0 00000	0.00000	U.UUU UU

Примечание. Значения функции рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> Neuman, Witherspoon, 1968.

ПРИЛОЖЕНИЕ 31

Функция для скважин с постоянным понижением $Z(u, \beta_1, \beta_2)$ (самоизливающиеся скважины) в пластах с перетеканием

Функция:

$$Z(u,\beta_1,\beta_2) = K_0(\beta_1\beta_2)K_0(\beta_2) + \exp(-u\tau^2)\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(\tau\beta_1)Y_0(\tau) - Y_0(\tau\beta_1)J_0(\tau)}{J_0^2(\tau) + Y_0^2(\tau)} \frac{\exp(-u\tau^2)}{\tau^2 + \beta_2^2} \tau d\tau.$$

Аппроксимация [Hantush, 1964c]:

Диап а зон	Зависимость
$\frac{u}{\alpha^2} < 0.05$	$Z(u,\alpha,\beta) \approx \frac{1}{2\sqrt{\alpha}} \begin{cases} \operatorname{erfc}[\beta(\alpha-1)] \operatorname{erfc}\left(\beta\sqrt{u} + \frac{\alpha-1}{2\sqrt{u}}\right) + \\ + \exp[-\beta(\alpha-1)] \operatorname{erfc}\left(-\beta\sqrt{u} + \frac{\alpha-1}{2\sqrt{u}}\right) \end{cases}$
$u\beta^2 > 1$	$Z(u,\alpha,\beta) \approx \frac{W\left(\frac{\alpha^2}{4u},\alpha\beta\right)}{W\left(\frac{1}{4u},\beta\right)}$
$u = \infty$	$Z(u,\alpha,\beta) = \frac{K_0(\alpha\beta)}{K_0(\beta)}$
$\beta = 0$	$Z(u,\alpha,\beta)=A(u,\alpha)$

Условные обозначения:

 $A(u, \beta)$ – функция для скважин с постоянным понижением (Приложение 1);

erfc β – дополнительный интеграл вероятностей (Приложение 4);

 $J_0(\beta)$, $K_0(\beta)$, $Y_0(\beta)$ — функции Бесселя (Приложения 2);

 $W(u,\beta)$ – функция влияния скважины в пластах с перетеканием (Приложение 27).

Функция не табулирована.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1959b, 1964с.

Корни уравнения $\alpha_n \tan(\alpha_n) = c$

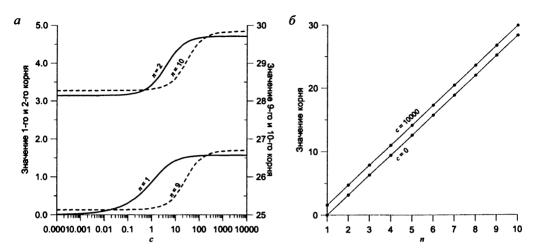


Рис. П32. Зависимости значения корня (1-й, 2-й, 9-й и 10-й) от величины c (a) и от его номера n при различных величинах c (0 и 10000) (δ).

Аппроксимация [Hantush, 1967b]:

Диапазон	Зависимость
n > 6	$\alpha_n = \alpha_6 + (n-6)\pi$
c < 0.2; $n = 2,3,4,$	$\alpha_1 = \left(1 - \frac{c}{6}\right)\sqrt{c}$; $\alpha_n = (n-1)\pi + \frac{c}{(n-1)^2\pi^2} - \frac{c^2}{(n-1)^3\pi^3}$
$c \le 0.01$; $n = 2,3,4,$	$\alpha_1 = \sqrt{c}$; $\alpha_n = (n-1)\pi$

Условные обозначения:

 α_n – значение n-го корня;

c — постоянное значение;

n – номер корня.

Значения первых 10 корней для значений $c=0\div\infty$

			-		• ''			-		
с	αı	G ₂	a ₃	a,	a ₅	Q4	Q ₇	a .	a	a _{ie}
0.0	0.000000	3.141593	6.283185	9.424778	12.566371	15.707963	18.849556	21.991149	25.132741	28.274334
0.0001	0.010000	3.141624	6.283201	9.424789	12.566379	15.707970	18.849561	21.991153	25.132745	28.274337
0.0002	0.014142	3.141656	6.283217	9.424799	12.566387	15.707976	18.849567	21.991158	25.132749	28.274341
0.0003	6.017320	3.141688	6.283233	9.424810	12.566394	15.707982	18.849572	21.991162	25.132753	28.274344
0.0004	0.019999	3.141720	6.283249	9.424820	12.566402	15.707989	18.849577	21.991167	25.132757	28.274348
0.0005	0.022359	3.141752	6.283265	9.424831	12.566410	15.707995	18.849582	21.991171	25.132761	28.274352
0.0006	0.024492	3.141784	6.283281	9.424842	12.566418	15.708001	18.849588	21.991176	25 132765	28.274355
0.0007	0.026454	3.141815	6.283297	9.424852	12.566426	15.708008	18.849593	21.991180	25.132769	28.274359
0.0008	0.028281	3.141847	6.283313	9.424863	12.566434	15.708014	18.849598	21.991185	25.132773	28.274362
0.0009	0.029996	3.141879	6.283329	9.424873	12.566442	15.708021	18.849604	21.991190	25.132777	28.274366
0.001	0.031618	3.141911	6.283344	9.424884	12.566450	15.708027	18.849609	21.991194	25.132781	28.274369
0.002	0.044706	3.142229	6.283504	9 424990	12.566530	15.708091	18.849662	21.991240	25.132821	28 274405
0.003	0 054745	3.142547	6.283663	9.425096	12.566609	15.708154	18.849715	21.991285	25.132861	28.274440
0.004	0.063203	3.142865	6.283822	9 425202	12.566689	15.708218	18.849768	21.991330	25.132900	28,274475

c	α ₁	<i>α</i> ₂	α,	α,	a ₅	α_{6}	a ₁	a _k	α,	<i>α</i> ₁₀
0.005	0.070652	3.143183	6 283981	9.425308	12.566768	15.708282	18.849821	21.991376	25.132940	28.274511
0.006	0.077382	3.143501	6.284140	9.425415	12.566848	15.708345	18.849874	21.991421	25 132980	28.274546
0.007	0.083569	3 143819	6.284299	9.425521	12.566928	15.708409	18.849927	21.991467	25.133020	28.274581
0.008	0.089324	3.144137	6.284458	9.425627	12.567007	15.708473	18.849980	21.991512	25 133060	28.274617
0.009	0.094726	3.144455	6.284617	9 425733	12.567087	15.708536	18.850033	21.991558	25.133099	28.274652
0.01	0 099834	3.144773	6.284776	9.425839	12.567166	15.708600	18.850086	21.991603	25 133139	28.274688
0.02	0.140952	3.147946	6.286367	9.426900	12 567962	15.709236	18.850617	21.992058	25.133537	28.275041
0.03	0.172344	3.151113	6.287956	9.427960	12.568757	15.709873	18.851147	21.992513	25.133935	28.275395
0.04	0 198676	3.154273	6.289545	9.429020	12.569553	15.710509	18.851678	21 992967	25.134333	28.275749
0.05	0.221760	3.157427	6.291133	9.430080	12 570348	15.711146	18.852208	21.993422	25.134731	28.276102
0.06	0.242526	3.160574	6.292720	9.431140	12.571143	15.711782	18.852738	21.993877	25.135128	28 276456
0.07	0.261528	3.163715	6.294306	9.432199	12.571939	15.712418	18.853269	21.994331	25.135526	28.276809
0.08	0.279126	3.166849	6.295891	9.433258	12.572734	15.713055	18.853799	21.994786	25.135924	28.277163
0.09	0 295574	3.169976	6.297476	9.434317	12.573528	15.713691	18.854329	21.995240	25.136322	28.277517
0.1	0.311053	3 173097	6.299059	9.435376	12.574323	15 714327	18.854860	21.995695	25.136719	28.277870
0.2	0.432841	3.203935	6.314846	9.445948	12.582265	15.720685	18.860160	22.000239	25.140696	28.281406
0.3	0.521791	3.234090	6.330539	9.456492	12.590194	15.727036	18.865457	22.004781	25.144672	28.284940
0.4	0.593242	3.263550	6.346133	9.467005	12.598111	15.733381	18.870750	22.009321	25.148645	28.288473
0.5	0.653271	3.292310	6.361620	9.477486	12.606013	15.739719	18.876038 18.881323	22 013858 22 018392	25.152617	28.292005
0.6	0.705065 0.750558	3.320366 3.347720	6.376997 6.392258	9.487932 9.498342	12.613901 12.621774	15.746050 15.752372	18.886602	22 022923	25.156587 25.160555	28.295535 28.299065
0.7	0.791034	3.347720	6.407398	9.508714	12.629629	15.758685	18.891877	22 027451	25.164521	28.302592
0.8	0.791034	3.400339	6.422413	9.519045	12.637467	15.764990	18.897146	22.031976	25.168485	28.306118
1.0	0.860334	3.425618	6.437298	9.529334	12.645287	15.771285	18.902410	22.036497	25.172446	28.309643
2.0	1.076874	3.643597	6 578334	9.629560	12.722299	15.833611	18.954682	22.081476	25.211903	28.344777
3.0	1.192459	3.808762	6.703956	9.724027	12.796648	15.894513	19.006108	22.125914	25.250994	28.379652
4.0	1.264592	3.935162	6.814010	9 811878	12 867756	15.953626	19.056455	22.169655	25.289609	28.414190
5.0	1.313838	4.033568	6.909596	9.892753	12.935221	16.010659	19.105520	22.212556	25.327648	28.448314
6.0	1.349553	4 111618	6 992352	9.966671	12.998813	16.065395	19.153137	22.254495	25.365018	28 481958
7.0	1.376615	4.174638	7.064031	10.033914	13.058442	16.117689	19.199177	22.295369	25.401640	28.515058
8.0	1.397816	4.226362	7.126281	10.094916	13.114132	16.167459	19.243543	22.335093	25.437444	28.547560
9.0	1.414865	4.269444	7.180559	10.150187	13.165991	16.214677	19.286174	22.373602	25.472374	28.579415
10.0	1.428870	4.305801	7.228110	10.200263	13.214186	16.259361	19.327034	22.410848	25.506383	28.610582
20.0	1.496129	4.491480	7.495412	10.511670	13.541977	16.586395	19.643935	22.713113	25 792317	28.880022
30.0	1.520167	4.561495	7.605690	10.654324	13.708547	16.769057	19.836141	22.909759	25.989644	29.075382
40.0	1.532502	4.597943	7.664660	10.733415	13.804845	16 879445	19.957554	23.039371	26.124969	29.214319
50.0	1.540006	4.620246	7.701159	10.783164	13.866633	16.951884	20.039171	23.128684	26.220552	29.314847
60.0	1.545051	4.635287	7.725921	10.817204	13.909368	17.002622	20.097145	23 193086	26 290560	29.389654
70.0	1.548676	4.646113	7.743804	10.841911	13.940588	17.039976	20.140202	23.241377	26.343595	29.446932
80.0	1.551406	4.654276	7.757317	10.860641	13.964354	17.068554	20.173335	23 278779	26.384960	29.491939
90.0	1.553537	4.660650	7.767885	10.875320	13.983032	17.091093	20.199571	23.308529	26.418024	29.528106
100.0	1.555245	4.665765	7.776374	10.887130	13.998090	17.109307	20.220834	23.332719	26.445006	29.557736
200.0 300.0	1.562982	4.688949	7.814927	10.940924	14.066948	17.193005	20.319104	23.445251	26.571454	29 697719
400.0	1.565578	4.696734 4.700638	7.827895 7.834398	10.959060	14.090234 14.101927	17.221418 17.235697	20.352614	23.483825 23.503254	26 615052 26.637043	29.746299 29.770840
500.0	1.567661	4.702983	7.838306	10.973631	14.101927	17.244285	20.379616	23.514950	26.650287	29.770840
600.0	1.568183	4.704548	7.840914	10.973631	14.113649	17.250017	20.379616	23.522760	26.659135	29.795512
700.0	1.568556	4.705667	7.842778	10.977281	14.117003	17.254116	20.391230	23.528346	26 665462	29.802581
800.0	1.568835	4.706506	7.844177	10.981848	14.119519	17.257191	20.394864	23.532538	26 670212	29.807888
900.0	1.569053	4.707159	7.845265	10 983371	14.121478	17.259585	20.397692	23.535800	26.673909	29.812018
1000.0	1.569227	4.707681	7.846136	10.984590	14.123045	17.261500	20.399955	23.538411	26.676867	29.815324
5000.0	1.570482	4.711447	7.852411	10.993376	14.134340	17.275305	20.416269	23.557233	26 698198	29.839162
10000.0	1.570639	4.711918	7.853196	10.994475	14.135753	17.277032	20.418310	23.559589	26.700867	29 842146
60	1.570796	4.712389	7.853982	10.995574	14.137167	17.278760	20.420352	23.561945	26.703538	29.845130
•	•		-,	-		- ,	•			

Примечание. Значения корней рассчитаны на программе МАРLE7.

<u>Литература:</u> *Hantush*, 1967b.

Корни уравнений
$$J_0(x_n) = 0$$
, $J_1(x_{n,1}) = 0$

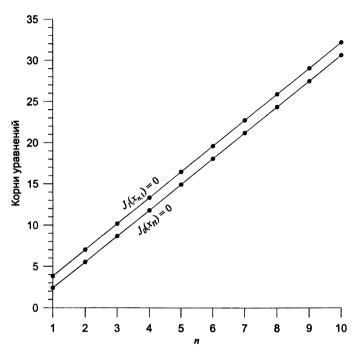


Рис. ПЗЗ. Зависимости значения корня двух уравнений от номера корня (первые десять корней).

Условные обозначения:

 $J_0(\beta), J_1(\beta)$ – функции Бесселя (Приложение 2);

 x_n – корень уравнения $J_0(x_n) = 0$;

 $x_{n,1}$ – корень уравнения $J_1(x_{n,1}) = 0$;

n — порядковый номер корня.

Аппроксимация (для больших значений номера корня):

Уравнение	Зависимость
$J_0(x_n)=0$	$x_n = \pi n - \pi/4$
$J_1(x_{n,1})=0$	$x_{n,1} = \pi n + \pi/4$

Значения первых двухсот корней уравнений

	T	r									
	2.404826	3.831706	n 51	159.436611	X _{8.1} 161.004294	n 101	316.515855	319 095077	n 161	X ₀	475 165100
					164.145932		319.657444		151 152	473.595357 476.736947	475.165100 478.306698
3		10.173468			167.287567		322.799032		153		481.448295
4		13.323692	54		170.429201		325.940621		154		484.589893
5		16.470630			173.570834		329.082210		155		487.731491
6		19.615859			176.712465	106		333.793096	156	489.303311	
7		22.760084			179.854094		335.365389		157	492.444902	494.014686
8		25.903672	58		182.995723	108		340.076302	158	495.586493	
9		29.046829			186.137350		341.648567		159	498.728084	
10		32.189680		187.710827	189.278976		344.790156		160	501.869676	
11		35.332308	61		192.420601	111		349.501110	161	505.011267	
12		38.474766			195.562225		351.073335			508.152858	
13		41.617094			198.703848	113			163		512.864270
14		44.759319			201.845470		357.356514			514.436040	
15		47.901461	65	203.418739	204.987091	115	360.498104	362.067518	165	517.577631	519.147464
16	49.482610	51.043535	66	206.560322	208.128712	116	363.639693	365.209119	166	520.719222	522.289061
17	52.624052	54.185554	67	209.701906	211.270331	117	366.781283	368.350721	167	523.860814	525.430658
18	55.765511	57.327525	68	212 843490	214.411950	118	369.922873	371.492322	168	527.002405	528.572255
19	58.906984	60.469458	69	215.985074	217.553568	119	373.064463	374.633923	169	530.143996	531.713851
20		63 611357	70	219.126658	220.695185	120	376 206053	377.775524	170	533.285587	534 855448
21	65.189965	66.753227	71	222.268243	223.836801	121	379.347642	380.917125	171	536.427179	537.997045
22		69.895072	72		226.978417	122		384.058726	172	539.568770	541.138642
23		73.036895			230.120032	123	385.630822		173		544.280238
24	74.614501	76.178700	74		233.261647	124		390.341927	174		547.421835
25		79.320487	75		236.403261	125		393.483527	175	548.993544	
26		82.462260	76	237.976169	239.544874	126	395.055593		176		553.705028
27		85.604019	77	241.117755	242.686487	127	398.197183		177		556 846624
28	87.180630	88.745767	78		245.828100	128		402.908327	178		559.988221
29		91.887504		247 400927	248.969712	129	404.480363		179		563.129817
30		95 029232		250.542513		130	407.621954		180		
31		98.170951	81	253.684100		131		412.333126	181	567.843092	569.413010
32				256.825686		132	413.905134		182		572.554606
33				259.967273	261.536155	133 134	417.046725 420.188315	418.616325 421.757925	183 184		575.696202 578.837799
35	106 029931 109.171490		85	263.108860 266 250447	267.819374	135	423.329905	424.899524	185		581.979395
	112.313050		86	269.392034	270.960982	136	426.471496	428.041123	186	583.551050	
37			87	272.533621	274.102591	137	429.613086	431.182722	187	586.692641	
	118.596177		88	275.675209	277.244199	138	432.754677	434.324321	188		591.404183
	121.737742			278.816796	280.385807	139	435.896268		189	592.975824	
	124.879309		90		283.527414	140	439.037858		190		597.687375
	128.020877			285.099972	286.669022	141	442.179449	443.749117	191	599.259007	
	131.162446		92	288.241560		142	445.321039	446.890716	192	602.400599	
	134.304017		93	291.383148	292.952235	143	448 462630		193	605.542190	
	137.445588		94	294.524736	296.093841	144	451.604221	453.173913	194	608.683782	610.253759
	140.587160		95	297.666324	299.235447	145	454.745812	456.315511	195	611.825374	
	143.728734		96	300.807912	302.377053	146	457.887402	459.457109	196		616.536950
47			97	303.949501	305.518658	147	461.028993	462.598708	197		619.678546
	150.011883		98	307.091089	308.660263	148	464.170584	465.740306	198		622.820142
	153.153458		99	310.232678		149	467.312175	468.881904	199	624.391740	625.961737
	156.295034		100	313.374266	314.943473	150	470.453766	472.023502	200	627.533332	629.103333

Примечание . Значения корней рассчитаны на программе МАРLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Корни уравнения $J_m(x_n) = 0$

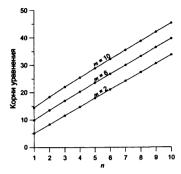


Рис. ПЗ4. Зависимости значения корня уравнения от номера корня (первые десять корней).

Значения первых пятидесяти корней уравнения

	m .												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
1	5 135622	6 380162	7 588342	8 771484	9.936110	11.086370	12 225092	13 354300	14 475501	15 589848			
2	8 417244	9 761023	11 064709	12 338604	13 589290	14 821269	16 037774	17 241220	18 433464	19 615967			
3	11 619841	13 015201	14 372537	15 700174	17 003820	18 287583	19 554536	20 807048	22 046985	23 275854			
4	14 795952	16 223466	17 615966	18 980134	20 320789	21 641541	22 945173	24 233885	25 509451	26 773323			
5	17 959819	19 409415	20 826933	22 217800	23 586084	24 934928	26 266815	27 583749	28 887375	30 179061			
6	21 116997	22 582730	24 019020	25 430341	26 820152	28 191188	29 545660	30 885379	32 211856	33 526364			
7	24 270112	25 748167	27 199088	28 626618	30 033722	31 422794	32 795800	34.154378	35 499909	36 833571			
8	27 420574	28 908351	30 371008	31 811717	33 233042	34 637089	36 025615	37.400100	38 761807	40 111823			
9	30 569205	32 064852	33 537138	34 988781	36 422020	37 838717	39.240448	40 628554	42 004190	43 368361			
10	33 716520	35 218671	36 699001	38 159869	39 603239	41 030774	42 443888	43 843801	45 231574	46 608133			
11	36 862857	38 370472	39 857627	41 326383	42 778482	44 215409	45 638444	47 048701	48 447151	49 834654			
12	40 008447	41 520720	43 013738	44 489319	45 949016	47 394166	48 825930	50.245327	51 653252	53 050499			
13	43 153454	44 669743	46 167854	47 649400	49 115774	50 568185	52 007691	53 435227	54 851619	56 257605			
14	46 297997	47 817786	49 320361	50 807165	52 279454	53 738325	55 184748	56 619580	58 043588	59 457457			
15	49 442164	50 965030	52 471551	53 963027	55 440592	56 905250	58 357889	59 799302	61 230198	62 651217			
16	52 586024	54 111616	55 621651	57 117303	58 599606	60 069477	61 527735	62 975114	64.412272	65,839809			
17	55 729627	57 257652	58 770836	60 270245	61 756825	63.231418	64 694781	66 147594	67 590472	69 023974			
18	58 873016	60 403224	61 919246	63 422054	64 912515	66.391406	67.859427	69 317212	70 765334	72 204318			
19	62 016222	63 548402	65 066995	66 572892	68.066890	69 549709	71 021999	72 484350	73 937299	75 381339			
20	65 159273	66 693242	68 214175	69 722891	71 220128	72 706551	74.182767	75 649327	77 106734	78 555452			
21	68 302190	69 837788	71 360861	72 872161	74 372373	75 862116	77 341955	78 812407	80.273945	81 727005			
22	71 444990	72 982080	74 507115	76 020793	77.523749	79 016559	80.499752	81 973814	83 439190	84 896291			
23	74 587688	76 126149	77.652992	79 168864	80 674357	82 170009	83 656318	85 133737	86 602688	88 063560			
24	77 730297	79 270021	80 798534	82.316438	83 824285	85 322579	86 811788	88 292339	89 764629	91 229026			
25	80 872827	82 413720	83 943780	85 463570	86 973607	88.474363	89 966278	91 449756	92 925172	94.392875			
26	84 015287	85.557263	87 088761	88 610308	90.122387	91 625443	93.119891	94 606111	96 084459	97 555267			
27	87 157684	88 700668	90 233507	91 756693	93 270680	94 775890	96 272711	97 761506	99 242611	100 716341			
28	90.300025	91 843949	93 378039	94 902759	96 418535	97 925765	99 424816	100 916033	102 399734	103 876219			
29	93 442316	94 987118	96 522380	98 048537	99 565993	101 075122	102.576273	104 069771	105 555922	107 035009			
30	96.584561	98.130186	99 666547	101 194055	102 713090	104 224008	105 727139	107 222792	108 711257	110 192805			
31	99.726766	101 273162	102.810556	104 339335	105.859859	107 372465	108 877465	110 375156	111 865812	113 349693			
32	102 868933	104 416055	105 954422	107 484400	109 006329	110 520529	112 027299	113 526919	115 019652	116 505746			
33	106 011066	107.558872	109 098157	110 629267	112 152525	113 668235	115.176681	116 678130	118.172835	119 661031			
34	109 153167	110 701620	112 241772	113 773952	115 298469	116 815610	118,325646	119 828834	121 325412	122 815609			
35	112 295241	113 844303	115 385276	116 918471	118 444181	119 962681	121.474228	122 979068	124 477431	125.969532			
36	115 437288	116.986928	118 528679	120 062837	121 589680	123 109471	124 622456	126 128870	127 628932	129 122850			
37	118 579311	120.129499	121 671989	123 207061	124 734981	126.256001	127.770356	129 278270	130 779953	132 275606			
38	121 721312	123 272021	124.815211	126 351153	127 880100	129 402291	130.917952	132.427297	133 930529	135 427840			
39	124 863292	126.414495	127 958354	129 495125	131 025049	132 548357	134 065265	135.575978	137 080690	138 579587			
40	128 005253	129 556928	131 101423	132.638983	134 169841	135 694216	137.212315	138 724336	140 230465	141 730881			
41	131 147197	132.699320	134 244422	135 782736	137 314486	138 839881	140,359120	141 872393	143 379879	144 881751			
42	134.289124	135.841675	137 387356	138.926392	140 458994	141.985365	143,505695	145 020168	146 528956	148 032224			
43	137 431036	138.983996	140.530231	142 069956	143.603374	145 130680	146 652057	148 167680	149 677717	151 182326			
44	140 572933	142,126285	143 673050	145 213435	146 747635	148,275837	149.798217	151 314945	152 826181	154 332079			
45	143.714817	145.268543	146 815816	148 356833	149 891783	151 420845	152 944190	154 461979	155 974368	157.481505			
46	146.856689	148.410774	149 958533	151 500157	153 035827	154.565715	156.089985	157 608794	159 122292	160 630622			
47	149.998549	151 552978	153 101204	154 643410	156 179771	157 710453	159.235614	160 755405	162.269970	163.779449			
48	153.140398	154.695157	156 243831	157.786597	159 323623	160.855069	162 381087	163 901823	165 417416	166.928002			
49	156.282237	157 837312	159.386417	160 929722	162.467387	163.999568	165,526411	167 048058	168 564643	170,076296			
50	159,424066	160 979446	162.528965	164 072788	165 61 1069	167 143958	168.671597	170.194121	171.711663				
- JUI	139.424066	100 9/9446	107.379303	104 0/2/88	102 01 1069	10/143938	108.0/139/	1/0.194121	1/1./11663	173 224347			

Примечания функции рассчитаны на программе МАРLЕ7.

Литература: Справочник..., 1979.

ПРИЛОЖЕНИЕ 35

Корни уравнения $J_0(\alpha_n)Y_0(c\alpha_n)-Y_0(\alpha_n)J_0(c\alpha_n)=0$

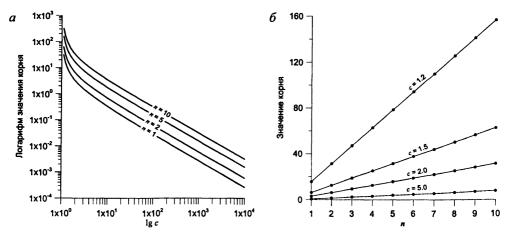


Рис. ПЗ5. Зависимости логарифма значения корня (1-й, 2-й, 5-й и 10-й) от логарифма величины c (a) и зависимости значения корня от сго номера при различных величинах c (1.2, 1.5, 2.0 и 5.0) (б).

Условные обозначения:

 $J_0(\beta), Y_0(\beta)$ – функции Бесселя (Приложение 2);

 α_n – значение n-го корня;

c — постоянное значение;

n – номер корня.

Значения первых десяти корней для $c = 1.1 \div 10000$

с	a	a_	as	α,	_ as	Œ	Ch Ch	G,	ø,	Ø ₁₀		
1.1	31.412314	62 830045	94.246574	125.662802	157.078909	188.494956	219.910969	251 326960	282 742937	314 158904		
1.2	15 701364	31 412615	47 121681	62 830196	78.538490	94.246675	109 954796	125 662877	141 370933	157 078970		
1.3	10.462885	20.939372	31 412869	41 885608	52 358042	62 830323	73.302517	83 774657	94 246760	104 718837		
1.4	7.842799	15 702303	23 558163	31 413088	39.267636	47 121996	54.976248	62 830432	70.684572	78.538680		
1.5	6.270235	12.559781	18.845147	25.129431	31 413277	37.696903	43.980403	50 263825	56 547195	62.830527		
1.6	5.221537	10 464579	15 703009	20 940229	26.176959	31 413442	36.649784	41.886038	47.122233	52 358386		
1.7	4 472261	8 967878	13 458535	17.947874	22 436677	26 925210	31 413588	35 901870	40 390086	44 878257		
1.8	3 910169	7 845262	11.775115	15.703558	19 631426	23 559002	27 486412	31 413718	35 340954	39.268141		
1.9	3 472900	6 972051	10 465742	13 957943	17 449534	20 940816	24.431921	27.922915	31 413834	34 904702		
2.0	3 123031	6 273436	9 418208	12 561423	15.703998	18 846248	21 988311	25 130258	28 272126	31 413939		
2.1	2 836741	5 701807	8.561108	11.418795	14 275815	17.132496	19 988982	22 845345	25.701627	28.557851		
2.2	2.598148	5 225424	7 846837	10 466589	13 085649	15 704358	18.322864	20 941243	23 559537	26 177771		
2.3	2 396255	4 822312	7 242439	9.660863	12.078575	14.495924	16 913064	19 330073	21 746993	24 163851		
2.4	2.223203	4.476774	6 724371	8 970230	11 215360	13 460116	15.704658	17 949064	20 193379	22 437630		
2.5	2 073229	4 177299	6 275370	8 371674	10 467233	12.562411	14.657367	16.752185	18 846909	20 941568		
2.6	1.942010	3 915251	5.882487	7.847931	9 812617	11 776913	13 740984	15 704912	17 668745	19 632510		
2.7	1 826239	3 684028	5 535819	7.385800	9.235010	11 083823	12 932406	14.780844	16 629185	18.477457		
2.8	1 723343	3.478494	5.227666	6.975012	8 721578	10 467740	12 213668	13.959448	15.705130	17.450741		
2.9	1 631292	3 294594	4 951947	6 607462	8 262188	9.916505	11.570584	13 224513	14 878341	16.532098		
3.0	1 548459	3 129084	4 703797	6.276665	7.848735	9 420391	10 991807	12 563070	14 134230	15 705318		
3.1	1 473528	2 979337	4 479279	5.977370	7 474656	8.971524	10 468149	11 964619	13 460985	14 957278		
3.2	1 405423	2 843206	4 275171	5.705281	7 134583	8.563462	9.992095	11 420572	12 848943	14 277240		
3.3	1 343254	2.718913	4 088811	5.456852	6 824080	8.190882	9 557436	10 923832	12 290121	13 656335		
3.4	1 286279	2 604980	3 917980	5.229124	6 539451	7 849350	9 158998	10 468486	11 777867	13 087172		
3.5	1 233875	2 500165	3.760816	5 019614	6 277592	7 535139	8 792433	10 049567	11 306592	12 563540		
3.6	1 185514	2 403415	3 615742	4 826219	6 035875	7 245098	8 454066	9 662872	10 871569	12 080188		
3.7	1 140748	2,313835	3 481414	4 647150	5.812062	6 976540	8 140762	9 304820	10 468768	11 632639		
3.8	1 099191	2 230656	3 356682	4.480871	5 604236	6 727165	7 849836	8 972343	10 094739	11 217057		
3.9	1 060512	2 153217	3 240553	4 326060	5 410742	6 494987	7 578974	8 662795	9 746505	10 830136		
4.0	1 024421	2 080943	3 132167	4 181569	5 230148	6 278288	7 326169	8 373883	9 421486	10 469009		
4.1	0 990670	2 013336	3 030774	4.046401	5 061205	6 075569	7.089673	8 103611	9 117435	10 131180		
4.2	0 959038	1 949957	2 935720	3 919681	4 902820	5 885520	6 867959	7 850230	8 832388	9 814465		
4.3	0 929332	1 890423	2 846427	3 800642	4 754035	5 706989	6.659681	7 612205	8 564616	9 516945		
4.4	0 901383	1 834393	2 762389	3 688605	4 614002	5 538960	6 463655	7 388182	8 312594	9 236926		

с	CI.	Ot.	as .	a ,	as .	a,	On Common of the	A	a _h	Ø11
4.5	0.875040 0.850169	1 781569 1 731682	2 683153 2 608321	3 582970 3 483205	4 481971 4 357275	5.380532 5 230906	6 278830 6 104274	7 176960 6 977472	8 074974 7 850555	8 972908 8 723557
4.7	0 826650	1 684495	2.537535	3.388833	4 239320	5 089368	5 939152	6 788767	7 638267	8 487685
4.8	0 804376	1 639794	2.470476	3 299429	4 127573	4 955279	5 782722	6 609995	7 437152	8.264227
4.9	0 783252	1 597389	2.406857	3.214610	4 021557	4 828067	5 634313	6 440389	7 246350	8 052228
5.0	0.763191	1 557106	2 346421	3 134032 3 057386	3 920842 3 825041	4 707215 4 592259	5 493325 5 359214	6 279265	7 065088 6.892668	7 850829 7 659254
5.1	0.744116 0 725955	1 518792 1 482304	2 288933 2 234185	2 984390	3 733801	4 482777	5 231490	5 980033	6 728459	7 476802
5.3	0 708645	1 447517	2 181984	2.914790	3 646806	4 378388	5 109706	5 840855	6 571887	7.302836
5.4	0 692127	1 414313	2.132157	2 848355	3 563765	4 278743	4 993459	5 708004	6 422432	7 136778
5.5	0 676350	1 382587	2 084546	2 784872	3 484416	4 183527	4 882377	5 581057	6 279620	6 978100
5.6	0 661263 0 646824	1 352243 1 323193	2 039006 1 995406	2 724151 2 666013	3.408516 3.335847	4 092452	4 776126 4 674396	5 459630 5 343370	6 143017 6 012227	6.826321 6.681001
5.7 5.8	0 632992	1 295356	1 953623	2 610299	3 266206	3 921686	4 576905	5 231954	5 886886	6 541735
5.9	0 619728	1 268657	1 913546	2 556860	3 199408	3 841530	4 483393	5 125086	5 766662	6 408154
6.0	0 607000	1 243028	1 875074	2 505559	3 135282	3 764582	4 393622	5 022492	5 651246	6 279917
6,1	0 594775	1 218406	1 838112	2 456270	3 073672	3 690651	4 307371	4 923922	5 540357	6 156708
6.2	0 583025 0 571722	1 194734 1 171956	1 802572 1 768375	2 408878 2 363274	3 014431 2 957426	3 619563 3 551159	4 224438	4 829143	5 433732 5 331132	5 924238
6.4	0 560842	1 150025	1 735445	2 319360	2 902533	3 485288	4 067787	4 650117	5 232331	5 814461
6.5	0 550361	1 128892	1 703714	2 277044	2 849636	3 421813	3 993734	4 565486	5 137123	5 708676
6.6	0 540258	1 108517	1 673117	2 236240	2 798629	3 360605	3 922326	4 483879	5 045315	5 606669
6.7	0 530513	1 088858	1 643595	2 196868	2 749412	3 301545	3 853423	4 405134	4 956729	5 508241 5 413207
6.8	0.521107 0.512023	1 069878 1 051544	1 615092 1 587555	2.158854 2.122129	2 701893 2 655984	3 244521 3 189431	3 786897 3 722626	4 329105 4 255654	4 871198 4 788566	5 321395
7.0	0 503245	1 033823	1 560938	2 086629	2 611606	3 136178	3 660497	4 184651	4 708689	5 232643
7.1	0 494758	1 016684	1 535194	2 052294	2 568684	3 084671	3 600406	4 115976	4 631430	5 146802
7.2	0 486548	1 000099	1 510282	2 019067	2 527147	3 034825	3 542253	4 049516	4 556664	5 063729
7.3	0 478600	0 984043	1 486161	1 986895	2 486928 2 447967	2 986562 2 939808	3 485947 3 431400	3 985166 3 922828	4 484271 4 414141	4 983294
7.4	0 470904 0 463448	0 968490 0 953417	1 462795 1 440149	1 955729 1 925522	2 410205	2 894492	3 378532	3 862408	4 346169	4 829848
7.6	0 456219	0 938802	1 418190	1 896232	2 373588	2 850550	3 327266	3 803818	4 280257	4 756612
7.7	0 449209	0.924625	1 396888	1 867816	2 338064	2 807920	3 277530	3 746978	4 216312	4 685563
7.8	0 442408	0 910866	1 376212	1 840236	2 303585	2 766543	3 229258	3 691810	4 154248	4 616604
7.9	0.435806 0 429394	0 897507 0 884531	1 356137 1 336636	1 813457 1 787443	2 270106 2 237584	2 726367 2 687338	3 182385 3 136851	3 638240 3 586202	4 093983 4 035440	4 549643 4 484596
8.0 8.1	0 423165	0 871922	1 317685	1 762162	2 205978	2 649409	3 092600	3 535629	3 978546	4 421381
8.2	0 417112	0 859664	1 299261	1 737584	2 175250	2 612534	3 049578	3 486462	3 923233	4 359922
8.3	0 411226	0 847744	1 281343	1 713680	2 145365	2 576670	3 007736	3 438641	3 869435	4 300147
8.4	0 405501	0 836146	1 263910	1 690423	2.116287	2 541775	2 967024	3 392113	3 817091	4 241987
8.5 8.6	0 399930	0 824860 0 813871	1 246942 1 230422	1 667786 1 645745	2 087986 2 060429	2 507810 2 474740	2 927398 2 888815	3 346826 3 302731	3 766143 3 716536	4 1853/9
8.7	0 389229	0 803168	1 214331	1 624277	2 033589	2 442529	2 851234	3 259781	3 668218	4 076573
8.8	0 384086	0 792741	1 198654	1 603360	2 007437	2 411144	2 814617	3 217933	3 621138	4 024263
8.9	0 379076	0 782580	1 183374	1 582973	1 981947	2 380554	2 778927	3 177144	3 575251	3 973277
9.0	0 374192 0 369430	0 772673	1 168477 1 153948	1 563097 1 543711	1 957095 1 932857	2 350729 2 321640	2 744130 2 710192	3 137375 3 098588	3 530510 3 486875	3 923566 3 875082
9.2	0 364786	0 753587	1 139774	1 524798	1 909210	2 293261	2 677082	3 060748	3 444304	3 827781
9.3	0 360255	0 744390	1 125942	1 506342	1.886134	2 265566	2 644770	3 023819	3 402759	3.781619
9.4	0 355834	0 735413	1 112441	1 488326	1 863607	2 238531	2 613227	2 987769	3 362203	3 736557
9.5	0 351518	0 726648	1 099257	1 470733	1 841610	2 212132	2 582427	2 952568	3 322601 3 283921	3 692555 3 649577
9.6	0 347303	0 718088 0 709726	1 086381 1 073801	1 453551	1 820125 1 799135	2.161155	2 552343 2 522951	2 918186 2 884594	3 246130	3 607586
9.8	0 339165	0 701554	1 061508	1 420358	1 778621	2 136536	2 494227	2 851766	3 209197	3 566550
9.9	0 335235	0 693567	1 049491	1 404322	1 758569	2 112470	2 466148	2 819675	3 173095	3 526437
10	0 331394	0 685758	1 037742	1 388642	1 738963	2 088939	2 438694	2 788298	3 137795	3 487214
30	0 153220 0 099032	0 321270 0 209076	0 488337 0 318576	0.654874	0 821095 0 536728	0.987114	1 152993 0 754315	0 862990	1 484476 0 971612	1 650123 1 080191
40	0 072969	0 154735	0.236154	0.427732	0 398408	0 479366	0 560255	0 641090	0 721885	0 802648
50	0 057684	0 122716	0 187508	0.252136	0 316657	0 381103	0 445495	0 509846	0 574164	0 638457
60	0 047653	0 101627	0.155425	0 209096	0 262682	0 316209	0 369692	0 423142	0 476566 0 407288	0 529968 0 452955
70 80	0 040570 0 035306	0 086694 0 075569	0 132684 0.115729	0 178573 0 155804	0 224392 0 195822	0 270163 0 235799	0.315897 0 275745	0 361604 0 315667	0.355571	0 395459
90	0 031241	0 066963	0.102603	0 138171	0 173691	0 209175	0 244633	0 280070	0 315491	0 350899
100	0 028009	0 060109	0 092142	0.124114	0 156043	0 187942	0 219818	0 251676	0 283520	0 315352
200	0 013709	0 029633	0.045544	0 061434	0 077308	0 093171	0 109024	0 124870	0 140710	0 156545
300 400	0 009049	0 019630 0 014666	0.030210	0.040779	0 051339	0.061892	0 072440	0 082984 0 062124	0 093525	0 104062 0 077917
500	0 005372	0 011701	0 018033	0 030303	0 030684	0 037005	0 043322	0 049638	0 055952	0 062264
600	0 004462	0 009731	0 015004	0 020274	0 025540	0 030805	0 036067	0 041327	0 046587	0 051845
700	0 003814	0 008327	0 012844	0 017359	0 021872	0 026382	0 030891	0 035398	0 039905	0 044410
800	0 003330	0 007276	0 011227	0.015176	0 019124	0 023069	0 027013	0 030956	0 034898	0 038839
900	0.002955	0.005809	0 009971	0 013481	0 016988 0 015281	0 020494 0 018436	0 023999	0 027503	0 031007	0.034509
2000	0.002633	0.003809	0.004465	0 006042	0 007618	0.009193	0 010769	0.012344	0.013919	0.031047
3000	0 000872	0 001920	0 002971	0 004021	0 005071	0 006121	0 007171	0 008221	0 009270	0 010319
4000	0 000652	0 001438	0 002225	0.003013	0 003800	0 004587	0 005374	0 006161	0 006948	0 007735
5000	0 000521	0.001149	0 001778	0 002408	0 003038	0 003668	0 004297	0 004927	0 005556	0 006186 0 005153
7000	0 000433	0 000956	0.001481	0 002006	0 002530	0 003055 0 002618	0 003580	0 004104 0 003517	0.003966	0 005153
8000	0 000324	0.000716	0 001110	0 001718	0 001897	0 002290	0 002683	0 003077	0 003470	0 003863
9000	0 000288	0 000636	0 000986	0 001336	0.001685	0 002035	0 002385	0 002734	0 003084	0 003433
10000	0.000259	0 000572	0 000887	0 001202	0.001516	0 001831	0 002146	0 002460	0.002775	0 003089

П р и м е ч а н и е . Значения корней рассчитаны на программе MAPLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Корни уравнения $J_1(\alpha_n)Y_0(c\alpha_n)-Y_1(\alpha_n)J_0(c\alpha_n)=0$

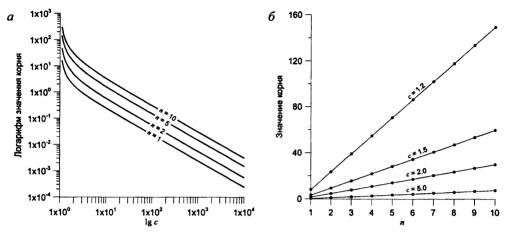


Рис. ПЗ6. Зависимости логарифма значения корня (1-й, 2-й, 5-й и 10-й) от логарифма величины c (a) и зависимости значения корня от его номера при различных величинах c (1.2, 1.5, 2.0 и 5.0) (6).

 $\frac{\text{Условные обозначения:}}{J_0(m{eta}), J_1(m{eta}), Y_0(m{eta}), Y_1(m{eta})$ – функции Бесселя (Приложения 2);

 α_n – значение n-го корня;

c — постоянное значение;

n – номер корня.

Значения первых десяти корней для $c = 1.1 \div 10000$

c	a,	Øt.	4	a,	æ	a,	Ør	a,	as	a _t ,
1.1	16 012606	47.227334	78 601978	110 000163	141.406224	172 815871	204 227448	235 640185	267 053673	298 467674
1.2	8.146276	23 663117	39 330807	55.021409	70.719710	86.421519	102 125220	117 830057	133 535629	149 241704
1.3	5 517045	15 807156	26 239756	36 694701	47.157187	57 623117	68.090904	78 559806	89 029431	99 499551
1.4	4 197763	11 878413	19 693831	27 531073	35.375718	43 223747	51 073603	58 924558	66 776224	74 628378
1.5	3 402902	9 520645	15 766012	22 032719	28 306701	34 584016	40.863132	47 143331	53,424231	59 705612
1.6	2 870557	7 948417	13.147281	18 367027	23.593931	28 824121	34 056088	39 289125	44 522855	49 757059
1.7	2 488442	6.825103	11 276622	15.748586	20.227600	24 709857	29 193870	33.678940	38 164695	42 650920
1.8	2.200385	5 982382	9.873521	13.784688	17.702802	21 624119	25 547173	29 471273	33 396051	37 321294
1.9	1.975158	5 326739	8.782137	12.257159	15.739032	19.224072	22 710829	26 198622	29 687088	33 176013
2.0	1 794011	4 802061	7 908962	11 035095	14.167987	17 304010	20 441734	23 580485	26 719902	29 859776
2.1	1 644998	4.372637	7 194488	10.035190	12.882561	15.733031	18 585187	21 438360	24 292194	27.146480
2.2	1 520149	4 014660	6.599044	9 201907	11.811354	14 423868	17.038052	19 653245	22 269094	24 885393
2.3	1 413937	3.711647	6 095164	8.496797	10.904931	13.316101	15.728928	18.142755	20.557234	22 972159
2.4	1 322410	3.451823	5 663229	7.892397	10 127983	12.366576	14 606812	16.848042	19.089918	21 332238
2.5	1 242666	3.226553	5 288852	7.368565	9.454616	11.543646	13 634305	15.725952	17 818240	19,910969
2.6	1.172525	3 029361	4 961241	6 910195	8.865409	10 823574	12.783356	14.744117	16,705517	18.667355
2.7	1 110317	2 855293	4 672145	6.505737	8 345511	10 188209	12 032512	13.877789	15.723699	17 570046
2.8	1 054740	2 700498	4 415145	6 146205	7 883371	9 623435	11.365091	13 107715	14.850969	16 594657
2.9	1 004766	2 561934	4.185175	5.824506	7 469870	9 118105	10 767921	12 418698	14 070102	15 721938
3.0	0.959569	2 437167	3.978179	5.534966	7.097712	8 663303	10 230464	11 798580	13 367320	14 936488
3,1	0 918480	2 324228	3.790876	5.272991	6 760991	8.251811	9 744190	11 237518	12 731467	14 225842
3.2	0 880951	2.221505	3 620581	5.034822	6 454875	7 877724	9 302120	10 727460	12.153416	13 579798
3.3	0.846527	2 127667	3 465076	4 817354	6.175373	7 536162	8 898488	10 261752	11 625630	12 989930
3.4	0.814830	2 041603	3.322513	4 617999	5 919157	7 223060	8 528489	9 834851	11.141824	12 449217
3.5	0.785540	1 962382	3 191338	4 434585	5 683433	6 935003	8 188088	9 442100	10 696720	11 951760
3.6	0 758387	1 889216	3 070238	4 265272	5 465838	6 669101	7 873869	9 079560	10.285855	11.492567
3.7	0.733139	1.821431	2 958093	4.108493	5 264356	6.422893	7 582924	8 743872	9 905422	11.067388
3.8	0 709598	1 758453	2.853944	3 962905	5 077262	6 194268	7 312759	8 432161	9 552162	10 672577
3.9	0 687592	1 699785	2.756964	3 827351	4 903066	5 981408	7 061223	8 141946	9 223264	10 304994
4.0	0 666971	1 644996	2 666436	3 700827	4 740480	5.782736	6.826456	7.871077	8 916291	9 961916
4.1	0 647607	1.593711	2.581737	3.582460	4 588380	5.596879	6 606832	7.617682	8 629122	9.640971
4.2	0 629385	1 545604	2 502318	3.471484	4 445782	5 422636	6 400934	7 380123	8 359900	9 340084
4.3	0 612204	1 500385	2 427702	3 367229	4 311823	5 258951	6 207513	7.156961	8.106994	9 057432
4.4	0.595975	1 457800	2 357463	3 269100	4 185741	5 104892	6 025468	6 946925	7.868964	8 791406

с	αı	a _i	a _h	Œ,	a,	α,	αh	Ø4	On .	α ₁₀
45	0 580620	1 417624	2 291227	3 176573 3 089181	4 066860	4 959635	5 853824 5 691714	6 748889 6 561855	7 644534 7 432572	8 540581 8 303690
4.6	0 566068	1 379657 1 343719	2 228660	3 006508	3 954581 3 848367	4 822445 4 692669	5 538366	6 384930	7 232067	8 079603
4.8	0 539129	1 309652	2 113377	2 928181	3 747741	4 569722	5 393088	6 217315	7 042114	7 867310
4 9	0 526634	1 277312	2 060155	2 853866	3 652273	4 453078	5 255258	6 058296	6 861902	7 665903
50	0 514727	1 246570	2 009585	2 783262	3 561575	4 342264	5 124319	5 907226	6 690699	7 474566
5.1	0 503365	1 217308	1 961473 1 915644	2 716097 2 652127	3 475298 3 393128	4 236854 4 136462	4 999766 4 881142	5 763525 5 626666	6 527847 6 372750	7 292562 7 119225
5.2	0 492312	1 162817	1 871938	2 591127	3 314776	4 040737	4 768035	5 496171	6 224865	6 953949
54	0 472198	1 137405	1 830211	2 532895	3 239984	3 949362	4 660068	5 371608	6 083702	6 796185
5.5	0 462677	1 113106	1 790331	2 477248	3 168513	3 862047	4 556899	5 252580	5 948813	6 645432
5.6	0 453545	1 089849	1 752177	2 424015	3 100147	3 778526	4 458214	5 138726	5 819787	6 501234
57	0 444777	1 067568	1 715639	2 373045	3 034688	3 698558	4 363727 4 273177	5 029716	5 696252 5 577863	6 363171 6 230860
5.8	0 436353	1 046201	1 680617 1 647017	2 324193 2 277333	2 971954 2 911778	3 621920 3 548409	4 186321	4 925247 4 825042	5 464306	6 103949
6.0	0 420455	1 005994	1 614755	2 232342	2 854007	3 477837	4 102938	4 728845	5 355290	5 982115
61	0 412945	0 987055	1 583752	2 189113	2 798500	3 410031	4 022825	4 636419	5 250550	5 865058
6 2	0 405706	0 968832	1 553934	2 147543	2 745125	3 344832	3 945792	4 547547	5 149837	5 752502
6.3	0 398724	0 951286	1 525236	2 107538	2 693762	3 282091	3 871664	4 462028	5 052924	5 644194
6.4	0 391984	0 934379	1 497595	2 069011	2 644300 2 596634	3 221673 3 163451	3 800282 3 731494	4 379676 4 300318	4 959600 4 869669	5 539896 5 439391
6.5	0 385475	0 918077	1 470954 1 445258	2 031882 1 996076	2 550669	3 107307	3 665162	4 223794	4 782950	5 342475
6.7	0 373100	0 887159	1 420458	1 961523	2 506314	3 053131	3 601156	4 149954	4 699273	5 248959
6.8	0 367214	0 872486	1 396509	1 928158	2 463487	3 000823	3 539357	4 078659	4 618481	5 158668
6 9	0 361515	0 858301	1 373366	1 895922	2 422110	2 950286	3 479652	4 009781	4 540427	5 071437
7.0	0 355994	0 844581	1 350990	1 864757	2 382110	2 901433	3 421936	3 943198	4 464974	4 987113
7.1	0 350643	0 831302 0 818444	1 329342	1 834611 1 805434	2 343420 2 305977	2 854180 2 808450	3 366111 3 312087	3 878797 3 816474	4 391995	4 905554 4 826625
7.3	0 340421	0 805986	1 288095	1 777182	2 269720	2 764171	3 259777	3 756128	4 252986	4 750202
7.4	0 335535	0 793910	1 268432	1 749809	2 234594	2 721274	3 209101	3 697668	4 186738	4 676166
7.5	0 3 3 0 7 9 1	0 782199	1 249369	1 723276	2 200548	2 679697	3 159983	3 641005	4 122529	4 604408
7.6	0 326182	0 770835	1 230879	1 697544	2 167532	2 639378	3 112353	3 586059	4 060265	4 534825
77	0 321702	0 759805	1 212938	1 672578	2 135499	2 600261	3 066144	3 532753	3 999859	4 467318
7.8	0 317346	0 749092 0 738683	1 195520 1 178603	1 648344 1 624810	2 104408 2 074215	2 562294 2 525426	3 021293 2 977741	3 481014 3 430775	3 941230 3 884299	4 338173
80	0 308986	0 728566	1 162166	1 601946	2 044884	2 489611	2 935433	3 381970	3 828995	4 276368
81	0 304972	0 718728	1 146187	1 579723	2 016378	2 454804	2 894317	3 334539	3 775248	4 216304
8.2	0 301063	0 709157	1 130650	1 558116	1 988662	2 420962	2 854341	3 288426	3 722994	4 157907
8 3	0 297255	0 699844	1 115534	1 537098	1 961704	2 388047	2 815460	3 243575	3 672171	4 101110
8.4	0 293543 0 289925	0 690777 0 681946	1 100823 1 086502	1 516646 1 496738	1 935473	2 356020 2 324846	2 777630 2 740807	3 199936 3 157460	3 622721 3 574590	4 045848 3 992060
8.5	0 286397	0 673343	1 072554	1 477351	1 885078	2 294492	2 704953	3 116102	3 527724	3 939686
8.7	0 282955	0 664959	1 058965	1 458466	1 860860	2 264925	2 670029	3 075817	3 482076	3 888673
8.8	0 279596	0 656785	1 045721	1 440063	1 837261	2 236116	2 636000	3 036564	3 437598	3 838967
8 9	0 276318	0 648813	1 032810	1 422124	1 814259	2 208034	2 602832	2 998305	3 394245	3 790519
9.0	0 273116	0 641036	1 020219	1 404631	1 791831	2 180654 2 153949	2 570493 2 538951	2 961002	3 351976 3 310750	3 743283 3 697212
9.1	0 269990	0 633448	0 995948	1 387568	1 748611	2 127895	2 508178	2 924620 2 889124	3 270529	3 652265
9.3	0 263949	0 618806	0 984248	1 354671	1 727781	2 102468	2 478146	2 854484	3 231278	3 608400
94	0 261031	0 611741	0 972823	1 338807	1 707445	2 077645	2 448829	2 820667	3 192960	3 565580
9.5	0 258178	0 604839	0 961664	1 323315	1 687586	2 053405	2 420200	2 787646	3 155544	3 523767
9.6	0 255387	0 598093	0 950763	1 308181	1 668188	2 029728	2 392237	2 755392	3 118997	3 482926
9 7	0 252657	0 591499 0 585052	0 940109 0 929695	1 293394 1 278940	1 649235 1 630712	2 006595 1 983987	2 364916 2 338216	2 723880 2 693083	3 083290 3 048395	3 443024 3 404028
9.9	0 247370	0 578746	0 919513	1 264810	1 612603	1 961886	2 312115	2 662978	3 014283	3 365909
10	0 244810	0 572576	0 909555	1 250993	1 594896	1 940275	2 286593	2 633541	2 980929	3 328636
20	0 120792	0 278809	0 439160	0 600775	0 763241	0 926314	1 089831	1 253680	1 417782	1 582081
30	0 080325	0 184856	0 290481	0 396647	0 503195	0 610035	0 717106	0 824361	0 931767	1 039295
40 50	0 060190	0 138366	0 217218 0 173529	0 296365	0 375718	0 455232 0 363261	0 534879 0 426695	0 614636	0 694487	0 774416
60	0 040101	0 092110	0 144494	0 197010	0 249610	0 302276	0 354997	0 407766	0 460577	0 513425
70	0 034368	0 078927	0 123793	0 168758	0 213784	0 258857	0 303969	0 349114	0 394290	0 439492
80	0 030069	0 069047	0 108284	0 147602	0 186965	0 226362	0 265789	0 305240	0 344713	0 384206
90	0 026726	0 061367	0 096232	0 131163	0 166131	0 201126	0 236142	0 271177	0 306229	0 341296
100	0 024053	0 055225	0 086595	0 118022 0 058971	0 149479	0 180957	0 212452 0 106102	0 243962	0 275485	0 307020
300	0 008016	0 018401	0 028848	0 039309	0 049776	0 060246	0 070718	0 081192	0 091667	0 102142
400	0 006012	0 013801	0 021635	0 029481	0 037330	0 045182	0 053035	0 060888	0 068743	0 076598
500	0 004810	0 011040	0 017308	0 023584	0 029863	0 036144	0 042426	0 048709	0 054992	0 061275
600	0 004008	0 009200	0 014423	0 019653	0 024886	0 030120	0 035354	0 040590	0 045825	0 051061
700	0 003435	0.007886	0.012363	0 016845	0 021330	0 025817	0 030303	0 034791	0 039278	0.043766
900	0 003006	0 006900	0 010817 0 009615	0 014740 0 013102	0 018664	0 022589	0 026515 0 023569	0 030441	0 034368	0 038295
1000	0 002405	0 005520	0 008654	0 011792	0 014931	0 018071	0 021212	0 024353	0 027494	0 030635
2000	0 001202	0 002760	0 004327	0 005896	0 007465	0 009036	0 010606	0 012176	0 013747	0 015317
3000	0 000802	0 001840	0 002885	0 003931	0 004977	0 006024	0 007071	0 008118	0 009165	0 010212
4000	0 000601	0 001380	0 002163	0 002948	0 003733	0 004518	0 005303	0 006088	0 006873	0 007659
5000	0 000481	0 001104	0 001731	0 002358	0 002986	0 003614	0 004242 0 003535	0 004870	0 005499 0 004582	0 006127 0 005106
7000	0 000344	0 000920	0 001236	0 001685	0 002488	0 003012	0 003030	0 003479	0 003928	0 003106
8000	0 000301	0 000690	0 001082	0 001474	0 001866	0 002259	0 002651	0 003044	0 003437	0 003829
9000	0 000267	0 000613	0 000962	0 001310	0 001659	0 002008	0 002357	0 002706	0 003055	0 003404
10000	0 000240	0 000552	0 000865	0 001179	0 001493	0 001807	0 002121	0 002435	0 002749	0 003063

 Π р и м е ч а н и е . Значения корней рассчитаны на программе MAPLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Корни системы уравнений

Система уравнений: $\begin{cases} C_1 = \cosh(\zeta_1)\cos(\zeta_2) \\ C_2 = \sinh(\zeta_1)\sin(\zeta_2) \end{cases}$

Для величины $C_1 < 0$ значение первого корня ζ_1 равно значению этого корня при $C_1 > 0$ с отрицательным знаком: $\zeta_1 = -\zeta_1$; значение второго корня ζ_2 равно значению этого корня при $C_1 > 0$ минус число $\pi: \zeta_2 = \zeta_2 - \pi$.

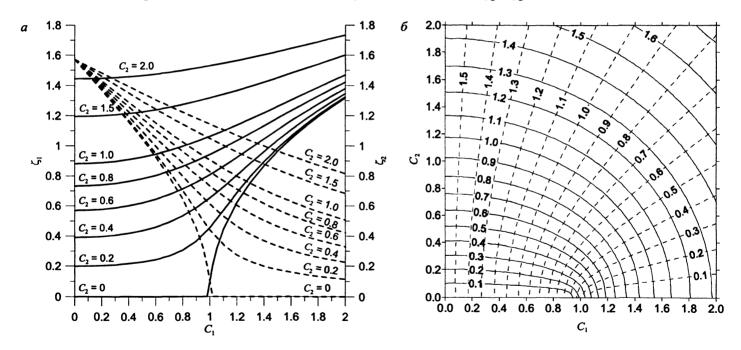


Рис. ПЗ7. Зависимости величины C_1 от первого корня ζ_1 (сплошные линии) и от второго корня ζ_2 (штриховые линии) при различных значениях величины C_2 (а) и диаграмма определения первого корня ζ_1 (сплошные линии) и второго корня ζ_2 (штриховые линии) от величин C_1 (ось абсцисс) и C_2 (ось ординат).

Значения корней для величин $C_1 = 0 \div 2.0, C_2 = 0 \div 2.0$

						,																
c_1	C_1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.0	ζι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.44357	0.62236	0.75643	0.86701	0.96242	1.04697	1.12323	1.19291	1.25720	1.31696
	ζ_2	1.57080	1.47063	1.36944	1 26610	1.15928	1.04720	0 92730	0.79540	0.64350	0.45103		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	ζι	0.09983	0.10033	0.10186	0 10458	0.10877	0.11497	0.12415	0.13833	0.16225	0.20950	0.31880	0 48888	0.64154	0.76741	0.87432	0.96773	1.05104	1.12648	1.19558	1.25944	1.31888
U.1	ζ2	1.57080	1.47113	1.37049	1 26782	1.16185	1.05099	0 93303	0.80466	0.66066	0.49366	0.31354	0.19791	0.14620	0.11862	0.10118	0.08893	0.07973	0.07251	0.06665	0.06177	0.05764
0.2	ζι	0.19869	0.19964	0.20257	0.20773	0.21561	0.22709	0.24366	0.26805	0 30528	0.36419	0.45431	0.56943	0.68773	0.79682	0.89480	0.98294	1 06287	1.13601	1.20345	1.26608	1.32456
0.2	ζ2	1.57080	1.47260	1.37355	1.27276	1.16921	1.06171	0.94885	0.82904	0.70112	0.56713	0.43945	0.33942	0.27245	0.22826	0.19754	0.17495	0.15756	0.14370	0.13234	0.12282	0.11471
0.3	ζι	0 29567	0 29700	0.30107	0.30820	0.31896	0.33430	0.35573	0.38559	0.42730	0.48489	0.56042	0.64997	0.74484	0.83770	0.92513	1.00630	1.08146	1.15118	1.21611	1.27682	1.33382
- 0.5	ζ_2	1 57080	1.47490	1.37834	1.28044	1.18048	1.07776	0.97165	0.86189	0.74934	0.63738	0.53320	0.44515	0.37665	0.32513	0.28615	0.25596	0.23197	0.21244	0.19621	0.18248	0.17070
0.4	ζι	0.39004	0.39164	0.39657	0.40511	0 41782	0.43556	0.45955	0.49145	0.53322	0.58650	0.65145	0.72564	0.80472	0.88442	0.96188	1.03572	1.10547	1.17114	1.23298	1.29128	1.34636
	ζ2	1.57080	1.47787	1.38448	1.29017	1.19452	1.09724	0 99824	0.89795	0.79771	0.70027	0.60973	0.53017	0.46365	0.40965	0.36616	0.33092	0.30201	0.27794	0.25762	0.24022	0.22516
0.5	ζι	0.48121	0.48301	0.48848	0.49790	0.51173	0.53064	0 55552	0.58742	0.62737	0.67596	0.73286	0.79646	0.86426	0.93361	1.00241	1.06931	1.13359	1.19496	1.25338	1.30894	1.36180
	ζ2	1.57080	1.48131	1.39154	1.30124	1.21024	1.11852	1.02629	0.93421	0.84355	0.75628	0.67489	0.60165	0.53789	0.48363	0.43798	0.39964	0.36728	0.33975	0.31613	0.29565	0.27775
0.6	ζι	0.56882	0.57072	0.57648	0.58632	0.60059	0.61977	0.64447	0.67528	0.71271	0.75689	0.80739	0.86308	0.92236	0.98350	1.04495	1.10559	1.16466	1.22174	1.27664	1.32931	1.37976
0.0	ζ2	1.57080	1.48503	1.39913	1.31304	1.22673	1.14037	1.05429	0.96918	0.88608	0.80640	0.73171	0.66344	0.60245	0.54894	0.50251	0.46240	0.42775	0.39770	0.37150	0.34853	0.32824
0.7	ζι	0.65267	0.65460	0.66043	0.67034	0.68455	0.70341	0.72727	0.75647	0.79119	0.83139	0.87663	0.92608	0.97865	1.03313	1.08838	1.14348	1.19775	1.25074	1.30216	1.35189	1.39985
	ζ2	1.57080	1.48887	1.40695	1.32506	1.24333	1.16197	1.08139	1.00220	0.92522	0.85148	0.78203	0.71782	0.65944	0.60712	0.56069	0.51972	0.48363	0.45181	0.42369	0.39873	0.37648
0.8	ζι	0.73267	0.73458	0.74033	0.75005	0.76388	0.78204	0.80472	0.83208	0.86415	0.90078	0.94159	0.98595	1.03306	1.08203	1.13200	1.18225	1.23216	1.28131	1.32940	1.37623	1.42170
V.0	ζ_2	1.57080	1 49272	1.41474	1.33696	1.25957	1.18284	1.10715	1.03304	0.96115	0.89225	0.82707	0.76628	0.71031	0 65937	0.61340	0.57215	0.53524	0.50224	0.47271	0.44623	0.42241
0.9	ζι	0.80887	0.81072	0.81629	0.82565	0.83890	0.85614	0.87747	0.90294	0.93250	0.96596	1.00298	1.04306	1.08560	1.12993	1.17538	1.22136	1.26736	1.31297	1.35791	1.40195	1.44496
0.5	ζ2	1.57080	1.49649	1.42233	1.34849	1.27518	1.20268	1.13135	1.06166	0.99410	0.92927	0.86770	0.80986	0.75611	0.70661	0 66136	0.62022	0.58294	0.54921	0.51870	0.49107	0.46602
1.0	ζ_1	0 88137	0.88314	0.88846	0.89737	0.90991	0.92613	0.94607	0.96970	0.99692	1.02754	1.06128	1.09771	1.13637	1.17672	1 21826	1.26048	1.30295	1.34533	1.38732	1.42871	1.46935
	ζ2	1.57080	1.50012	1.42962	1.35949	1.28998	1.22136	1.15395	1.08813	1.02434	0.96301	0.90456	0.84934	0 79763	0.74958	0.70520	0.66442	0 62708	0.59296	0.56181	0.53336	0.50736
1.1	ζ,	0.95035	0.95202	0.95705	0.96545	0.97723	0.99241	1.01096	1.03284	1.05791	1.08601	1.11686	1.15013	1.18543	1.22235	1.26045	1.29935	1.33866	1.37807	1.41734	1.45623	1.49461
	ζ2	1.57080	1.50356	1.43653	1.36990	1.30391	1.23883	1.17495	1.11260	1.05212	0.99386	0.93816	0.88530	0.83548	0 78884	0.74542	0.70518	0 66800	0.63374	0.60221	0.57319	0.54650
1.2	ζι	1.01597	1.01755	1 02227	1.03014	1.04116	1.05530	1.07253	1.09276	1 11588	1.14171	1.17001	1.20051	1.23288	1.26678	1.30187	1.33780	1.37427	1.41099	1.44772	1.48428	1.52051
	ζ2	1.57080	1.50681	1.44303	1.37967	1.31694	1.25511	1.19443	1.13518	1.07766	1.02215	0.96892	0.91819		0.82488	0 78245	0.74285	0 70600	0.67179	0.64009	0.61072	0.58353
1.3	ζ_1	1.07845	1.07992	1.08434	1.09169	1.10196	1.11511	1.13108	1.14980	1.17113	1.19492	1.22095	1.24900		1.31004	1.34245	1.37574		1.44389	1.47830		1.54687
	ζ_2	1.57080	1.50986	1.44912	1.38880			1.21247		1.10119	1.04816	0.99716	0.94839	0.90200	0.85807	0.81666	0.77777	0.74136	0.70734	0.67562	0.64607	0.61855
1.4	ζ,	1.13798	1.13936	1.14347	1.15032	1.15987	1 17208	1.18689	1.20421	1 22392	1.24587	1.26989	1.29576	1 32326	1.35214	1 38215	1.41306	1.44463	1.47664	1.50891	1.54126	1.57355
	ζ2	1.57080	1.51270	1.45481	1.39730			1.22919		1.12290	1.07213	1.02318	0.97622	0.93137	0.88873	0.84833	0.81020		0.74060	0.70899	0.67939	0.65169
1.5		1.19476	1.19604	1.19988	1.20625	1.21512	1.22646	1.24019		1.27446	1.29476	1.31696	1.34088	1.36633	1.39310		1.44973	1.47919		1.53944	1.56990	
	ζ2	1.57080	1.51536	1.46010	1.40522	1.35089		1.24467	1.19316	1.14296	1.09426	1.04720	1.00192	0 95854	0.91713	0 87774	0.84040		0.77174	0.74034	0.71080	
1.6	ζ,	1 24898	1.25017	1 25374	1.25966		1.27843	1 29117	1.30604	1.32293	1.34174	1.36230	1.38448		1 43295	1.45889	1.48572		1.54133	1.56980	1.59851	1.62735
	ζ2	1.57080	1.51783	1.46503	1.41257	1.36064	1.30940		1.20968	1.16153	1.11474	1.06943	1.02573		0.94351	0.90511	0.86856	0.83385	0.80095	0.76984	0.74044	0.71270
1.7	ςι	1.30082	1.30193	1.30524	1.31075	1.31841	1.32819	1.34002	1.35382	1.36950	1.38695	1.40604	1.42664	1.44859	1.47174	1.49593	1.52099	1.54677	1.57313	1.59991	1.62700	
	ζ2	1.57080	1.52012	1.46961	1.41941	1.36970	1.32062	1.27234	1.22500	1.17875	1.13373	1.09005	1.04783	1 00714	0.96806	0.93063	0.89487	0 86080	0.82838	0.79761	0.76843	0.74078
1.8	ζ,	1.35044	1.35147		1.35968	1 36681	1.37589	1.38689		1.41429	1.43051	1.44827	1.46744		1.50949		1.55554	1.57972	1.60449	1.62972	1.65530	
	ζ2	1.57080	1.52226	1.47387	1.42577	1.37811	1.33105	1.28470		1.19474	1.15137	1.10922	1.06838	1.02894	0 99095	0.95446	0.91950	0.88608	0.85418	0.82379	0.79487	0.76739
1.9	ζι	1.39800	1.39896		1.40660		1.42169	1.43192		1.45743	1.47254	1.48909	1.50696		1.54624	1 56739	1.58938	1.61209	1.63540		1.68336	
	ζ ₂	1.57080	1.52424		1.43168		1.34074		1.25246	1.20962	1.16779	1.12707	1.08754	1.04928	1.01234	0 97677	0.94260		0.87846	0.84849	0.81989	
2.0	ζι	1.44364	1.44453		1.45165		1.46572	1 47525		1 49903	1.51313	1.52857	1.54527	1 56312	1.58202	1.60185	1.62249	1.64385	1.66582	1.68828	1.71114	1.73432
	ζ2	1.57080	1.52610	1.48152	1.43719	1.39324	1.34978	1.30692	1.26479	1.22348	1.18309	1.14372	1.10543	1.06829	1.03237	0.99769	0.96428	0.93217	0.90135	0.87182	0.84356	0.81655

Примечания функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Muskat, 1937; Theis, 1963.

ПРИЛОЖЕНИЕ 38

Функция $F_d(u, \beta)$

Функция:
$$F_d(u, \beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-2\sqrt{u}\right) \int_0^{\sqrt{u}} \exp\left[2\sqrt{u-\tau^2} - \frac{\beta^2}{4\tau^2}\right] d\tau$$
.

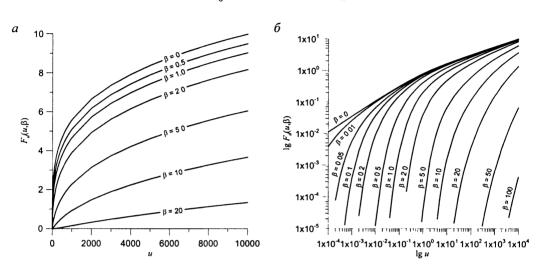


Рис. ПЗ8. Зависимости функции от первого аргумента (a) и логарифма функции от логарифма первого аргумента (б) при различных значениях второго аргумента.

Значения функции $F_d(u,\beta)$ даны в табличном виде для следующих диапазонов аргументов: $u=0, u=10^{-4} \div 10000, \ \beta=0, \ \beta=10^{-3} \div 100$.

Значения функции $F_d(u, \beta)$

u B	0.0	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100
0.0	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0001	0 01124	0 01026	0 00935	0 00694	0 00396	0 00100	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0002	0 01586	0 01488	0 01394	0 01136	0 00784	0 00329	0 00008	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0003	0 01940	0 01842	0 01747	0 01481	0 01103	0 00564	0 00036	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0004	0 02238	0 02139	0.02043	0.01773	0 01380	0 00787	0 00086	0 00000	0 00000	0.00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0005	0 02499	0 02400	0 02304	0 02031	0 01627	0 00995	0 00150	0 00001	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0006	0 02735	0 02636	0 02540	0 02265	0 01852	0 01192	0 00225	0 00004	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0007	0 02952	0 02853	0 02756	0 02479	0 02061	0 01377	0 00307	0 00008	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0008	0.03153	0 03054	0.02957	0 02679	0 02255	0 01553	0 00394	0 00015	0 00000	0 00000	0.00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.0009	0 03342	0 03243	0 03146	0 02866	0 02438	0 01720	0 00484	0 00025	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.001	0 03520	0 03421	0 03324	0 03044	0 02612	0.01880	0 00575	0 00038	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.002	0 04951	0 04852	0 04754	0 04468	0 04017	0 03212	0 01493	0 00293	0 00003	0.00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.003	0 06039	0 05939	0 05841	0 05552	0 05093	0 04254	0 02330	0 00682	0 00022	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.004	0 06948	0 06849	0 06750	0 06460	0 05996	0 05136	0.03086	0 01119	0 00073	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.005	0 07744	0 07645	0 07546	0 07255	0 06787	0 05914	0 03774	0 01568	0 00157	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.006	0 08460	0 08360	0 08261	0 07969	0 07499	0 06616	0 04409	0 02015	0.00269	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0.00000	0 00000	0 00000
0.007	0 09114	0 09014	0 08915	0 08623	0 08151	0 07260	0 05001	0 02455	0 00405	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.008	0 09720	0 09620	0 09521	0 09229	0.08755	0 07857	0.05556	0 02883	0 00560	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.009	0 10287	0 10187	0 10088	0 09795	0 09319	0 08417	0 06080	0 03300	0 00730	0.00001	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.01	0 10820	0 10721	0 10622	0 10328	0 09852	0 08944	0 06578	0 03705	0 00910	0 00001	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.02	0 15047	0 14947	0 14848	0 14553	0 14070	0 13138	0 10607	0 07209	0 02953	0 00067	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.03	0.18197	0 18097	0 17997	0 17701	0 17216	0 16273	0.13668	0.10025	0 04993	0 00305	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.04	0.20791	0 20691	0 20592	0 20295	0 19808	0 18859	0 16210	0 12418	0 06888	0 00705	0.00002	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000
0.05	0 23033	0 22933	0 22833	0 22536	0 22048	0 21095	0 18415	0 14520	0 08637	0 01221	0 00010	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000	0 00000

\	0.0	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100
0.06	0.25024	0.24924	0.24825	0.24528	0.24039	0.23082	0.20379	0.16409	0.10258	0.01811	0.00029	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.07	0.26828	0.26728	0.26628									0.00000					
0.08	0.28482				0.27495												
0.09	0.30016	0.29916	0.29817		0.29028												
0.1		0.31349			0.30461												
0.2		0.42325			0.41434												
0.3					0.49210												
0.4					0.55384										0.00000		
0.5					0.60563												
0.6					0.65051												
0.7					0.69029										0.00000		
0.8					0.72612												
0.9										0.38912					0.00000		
					0.78884												
2					1.00669												
					1.15059										0.00000		
					1.26036										0.00000		
					1.35011										0.00000		
	1.43652				1.42656					1.01082					0 00000		
					1.49348					1.07501					0.00000		
				1.55819								0.41736			0.00000		
					1.65686										0.00000		
20					2.01265										0.000001		
					2.24776										0.00001		
					2.42834												
					2.57699										0.00061		
60					2.70436					2.25706					0.00001		
				2.82141								1.38753					
					2.91687												
					3.00816										0.00289		
					3.09203												
					3.70019										0.01475		
					4.10633												
400	4 42987				4.41989					3.95690					0.04538		
					4.67878												
					4.90111												
700					5.09703												
800	5.28284				5.27285												
900	5.44281											3.76804					
1000	5.58990	5.58990	5.58790	5.58491	5.57991										0.15217		
2000	6.65927	6 65927	6.65927	6.65427	6 64927	6.63930	6.60945	6.56001	6.46223	6.17753	5.73055	4 93104	3.14050	1 47870	0.32625	0 00337	0 00000
3000	7.37542	7.37542	7.37542	7.37042	7.36542	7.35544	7.32559	7.27609	7.17810	6.89195	6.44011	5.62318	3.74229	1.89683	0.48577	0.00795	0.00001
4000	7.92908	7.92908	7.92908	7.92408	7.91908	7.90910	7.87923	7.82970	7.73157	7.44448	6.98945	6.16099	4.21880	2.24291	0.63244	0.01391	0.00002
5000	8.38662	8.38662	8.38662	8.38162	8.37662	8.36664	8.33677	8.28721	8.18898	7.90121	7.44384	6.60688	4.61880	2.54212	0.76861	0.02092	0 00005
6000	8.77977	8.77977	8.77777	8.77477	8.76977	8.75979	8.72991	8.68034	8.58203	8.29372	7.83453	6.99092	4.96641	2.80784	0.89608	0.02876	0.00009
	9.12638				9.11638										1.01624		0 00015
					9.42756												
9000	9.72075	9.72074	9.72075	9.71575	9.71076	9.70077	9.67088	9.62126	9.52279	9.23338	8.77041	7.91286	5.81084	3.47237	1.23863	0 05575	0.00031
10000	9.98122	9.98122	9.98122	9.97622	9.97123	9.96124	9.93135	9.88172	9.78321	9.49352	9.02963	8.16865	6.04727	3.66268	1.34235	0.06558	0.00042

 Π р и м е ч а н и е . Значения функции рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Kruseman, Ridder, 1994.

ПРИЛОЖЕНИЕ 39

Корни уравнения $J_0(\alpha_n)Y_1(c\alpha_n)-Y_0(\alpha_n)J_1(c\alpha_n)=0$

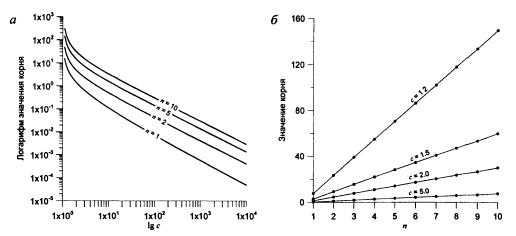


Рис. ПЗ9. Зависимости логарифма значения корня (1-й, 2-й, 5-й и 10-й) от логарифма величины $c \ (a)$ и зависимости значения корня от его номера при различных величинах c (1.2, 1.5, 2.0 и 5.0) (б).

<u>Условные обозначения:</u> $J_0(\beta), J_1(\beta), Y_0(\beta), Y_1(\beta)$ — функции Бесселя (Приложения 2);

 α_n – значение n-го корня;

C — постоянное значение;

n – номер корня.

Значения первых десяти корней для $c = 1.1 \div 10000$

c	9	- a	a _b	a,	Ø6	CK.	O)	a	4	Øi.
1.1	15 406054	47.024831	78 480454	109 913356	141 338706	172 760628	204 180704	235 599674	267 017927	298 435691
1.2	7.566666	23.468798	39 214138	54,938059	70 654877	86.368472	102 080333	117 791154	133 501303	149 210991
1.3	4.961756	15.619850	26 127215	36,614283	47.094630	57.571929	68 047589	78 522266	88 996306	99 469912
1.4	3 664567	11 697201	19 584847	27.453176	35.315114	43 174154	51 031637	58 888186	66 744130	74 599661
1.5	2 889886	9.344791	15.660130	21 957012	28 247793	34 535808	40 822336	47 107971	53 393030	59 677694
1.6	2 376067	7 777328	13 044129	18 293244	23 536510	28 777126	34 016317	39 254653	44 492436	49 729841
1.7	2 011031	6 658291	11 175898	15 676507	20.171495	24 663935	29 155004	33 645251	38 134967	42 624320
1.8	1 738783	5 819442	9 774973	13.714130	17 647870	21.579152	25.509113	29 438282	33 366938	37 295243
1.9	1 528241	5 167332	8 685553	12 187970	15 685153	19 179961	22 673491	26 166255	29 658524	33 150454
2.0	1 360777	4 645900	7 814163	10 967144	14 115058	17 260671	20 405047	23 548681	26 691834	29 834659
2.1	1 224553	4 219477	7 101322	9 968366	12 830496	15 690394	18 549090	21 407066	24 264575	27 121765
2.2	1 111687	3 864290	6 507379	9 136115	11 760077	14 381869	17 002493	19 622415	22 241884	24 861043
2.3	1 016731	3 563883	6.004887	8.431954	10 854377	13 274688	15 693860	18 112350	20 530397	22 948142
2.4	0.935803	3 306505	5 574241	7.828430	10 078095	12 325701	14 572197	16 818027	19 063425	21 308528
2.5	0 866058	3 083539	5 201067	7 305411	9 405344	11 503268	13 600108	15 696296	17 792063	19 887541
2.6	0 805369	2 888527	4 874583	6 847798	8 816710	10 783657	12 749544	14 714795	16 679633	18 644188
2.7	0 752112	2.716527	4 586546	6.444048	8 297345	10 148721	11.999060	13 848775	15 698086	17 547120
2.8	0 705026	2 563701	4 330545	6 085180	7 835704	9 584347	11 331973	13 078989	14 825608	16 571956
2.9	0 663119	2 427015	4 101519	5.764106	7 422670	9 079391	10 735115	12 390240	14 044977	15 699447
3.0	0 625598	2 304045	3 895421	5.475156	7.050952	8.624940	10 197951	11 770374	13 342415	14 914194
3.1	0 591823	2 192829	3 708972	5 213739	6 714645	8 213779	9 711953	11 209548	12 706769	14 203732
3.2	0 561272	2 091761	3 539493	4 976099	6 408922	7.840003	9 270142	10 699712	12 128913	13 557861
3.3	0 533515	1 999515	3 384767	4 759135	6 129791	7 498736	8 866754	10 234213	11 601309	12 968156
3.4	0 508193	1 91498R	3 242951	4 560261	5 873928	7 185914	8 496987	9 807510	11 117676	12 427597
3.5	0 485007	1 837250	3 112495	4 377306	5 638540	6 898122	8 156806	9 414947	10 672737	11 930285
3.6	0 463704	1 765517	2 992086	4 208432	5 421265	6 632472	7 842795	9 052584	10 262026	11 471230
3.7	0 444069	1 699121	2 880607	4 052075	5 220090	6 386505	7 552049	8 717066	9 881741	11 046181
3.8	0 425918	1 637489	2 777102	3 906893	5 033289	6 158110	7 282072	8 405516	9 528621	10 651495
3.9	0.409092	1 580127	2 680745	3.771729	4 859375	5 945470	7 030718	8 115454	9 199856	10 284030
4.0	0 393456	1 526607	2 590821	3 645581	4 697059	5 747008	6 796123	7 844731	8 893011	9 941064
4.1	0 378891	1 476556	2 506706	3 527578	4 545219	5 561354	6 576665	7 591477	8 605963	9 620227
4,2	0 365292	1 429649	2 427856	3 416954	4.402872	5 387305	6 370925	7 354052	8 336858	9 319443
4.3	0 352570	1 385599	2 353792	3 313039	4.269156	5 223807	6 177656	7 131019	8 084063	9 036890
4.4	0 340644	1 344154	2 284092	3 215241	4 143307	5 069929	5 995758	6.021106	7.946140	0.770050

-	4	Øt.	as I	a,	a,	4	Ø ₁	6	a	a _i ,
4.5	0 329443	1.305089	2 218380	3 123035	4 024653	4 924846	5.824256	6 723190	7 621814	8 520224
4.6	0.318906	1.268207	2 156325	3 035956	3 912593	4.787825	5.662283	6 536270	7 409951	8 283420
4.7	0.308976	1 233328	2 097630	2 953586	3 806593	4 658212	5,509066	6 359455	7 209541	8 059417
4.8	0 299603	1 200296	2 042030 1 989285	2 875555 2 801529	3.706174 3 610907	4.535422	5 363915 5.226209	6.033031	7 019680 6 839556	7 847204 7 645875
5.0	0 282358	1.139215	1 939182	2 731206	3 520405	4 308266	5 095389	5 882061	6 668439	7 454613
5.1	0.274410	1.110922	1 891528	2 664317	3 434319	4 203000	4 970951	5 738457	6 505670	7 272682
5.2	0 266866	1.083984	1 846147	2 600616	3 352335	4 102749	4.852440	5 601691	6 350652	7 099414
5.3	0 259698	1.058307	1 802881	2 539879	3 274165	4 007161	4 739443	5 471287	6 202846	6 934206
5.4	0 252878	1 033804	1 761585	2.481906	3 199550	3 915919	4 631582	5.346812	6 061758	6 776508
5.5	0 246384	1 010397	1.722128	2.426512	3 128253	3 828734	4 528516	5 227869	5 926942	6 625819
5.6	0 240192	0.988015	1.684390	2.373528	3 060057 2 994764	3 745340 3 665496	4 429932 4 335543	5 114099 5 005170	5 797987 5 674521	6.481683
5.8	0 228637	0.946065	1 613641	2.274188	2 932193	3 588980	4 245089	4 900781	5 556199	6.211428
5.9	0 223238	0.926383	1.580437	2 227562	2 872177	3 515588	4 158327	4 800653	5 442707	6 084574
6.0	0 218072	0.907494	1 548563	2.182803	2.814563	3 445132	4 075036	4.704530	5 333756	5 962795
6.1	0 213123	0 889350	1.517943	2.139801	2.759210	3 377440	3.995012	4 612178	5 229077	5 845791
6.2	0.208379	0.871909	1 488502	2.098455	2 705987	3 312353	3 918066	4 523378	5 128425	5 733288
6.3	0 203827	0.855131	1 460175	2.058670	2 654773	3.249722	3 844025	4 437930	5 031572 4 938306	5 625031 5 520784
6.4	0 199456 0 195257	0.838978 0.823418	1.432900	2 020360 1.983445	2.605457 2.557935	3.189412 3 131295	3 772726 3.704021	4 355646 4 276355	4 848431	5 420328
6.6	0.191218	0.808417	1 381278	1 947849	2.512111	3 075255	3.637770	4.199897	4 761767	5 323459
6.7	0 187332	0.793946	1.356829	1.913504	2.467896	3 021181	3.573844	4 126121	4 678144	5 229990
6.8	0.183591	0 779978	1.333225	1.880344	2.425207	2.968973	3 512123	4 054890	4 597405	5 139744
6.9	0 179985	0 766487	1 310423	1 848310	2.383965	2 918536	3.452494	3 986074	4.519403	5 052558
7.0	0 176510	0 753449	1 288383	1 817344	2 344099	2.869780	3 394854	3 919552	4 444002	4 968278
7.1	0.169920	0.740842 0.728645	1.267068 1 246442	1.787396 1 758414	2.305541	2 822623 2 776988	3 339104 3.285153	3 855212 3 792947	4 371073 4.300497	4 886762 4 807875
7.3	0.166794	0.716838	1.226472	1.730353	2.232100	2.732802	3.2329143	3 732659	4 232161	4 731493
7.4	0 163774	0.705402	1 207129	1 703171	2.197101	2.689998	3.182309	3 674256	4 165961	4 657498
7.5	0 160854	0 694322	1.188382	1.676826	2.163180	2.648511	3.133261	3 617650	4 101799	4 585780
7.6	0 158029	0 683580	1 170204	1 651280	2 130288	2 608282	3 085700	3 562759	4 039581	4 516235
7.7	0 155295	0 673161	1 152571	1 626497	2 098378	2 569254	3 039559	3 509508	3 979220	4 448767
7.8	0 152648 0 150083	0 663051 0.653237	1 135458 1.118842	1 602445 1.579091	2 067408 2 037335	2 531374 2.494593	2 994775 2 951290	3 457823 3.407636	3 920635 3 863748	4 383283
8.0	0.147598	0.633237	1 102702	1.556404	2 008123	2 458864	2 909047	3 358883	3 808487	4 257929
8.1	0 145188	0 634445	1 087019	1 534358	1 979734	2 424141	2.867995	3 311504	3 754783	4 197900
8.2	0 142851	0 625443	1 071772	1.512925	1 952134	2.390383	2 828084	3 265441	3 702570	4 139539
8.3	0 140582	0.616690	1 056944	1.492080	1.925291	2.357550	2 789266	3 220641	3 651789	4 082777
8.4	0 138380	0.608176	1.042519	1.471799	1 899174	2 325605	2.751497	3 177051 3 134625	3 602380 3 554289	4.027550
8.5 8.6	0 136241 0 134163	0.599891 0.591826	1 028479	1 452060 1.432841	1 873754	2 294513 2 264239	2 714736 2 678943	3 093315	3 507463	3 973795 3 921455
8.7	0 132144	0.583972	1 001496	1 414121	1 824896	2 234751	2.644080	3 053078	3 461854	3 870475
8.8	0 130180	0 576321	0 988526	1 395883	1 801407	2 206021	2 610111	3 013873	3 417414	3 820802
8.9	0 128270	0 568866	0.975885	1.378107	1 778514	2 178017	2 577002	2.975660	3 374100	3 772386
9.0	0 126412	0.561599	0 963560	1.360776	1 756193	2 150715	2.544721	2 938404	3 331869	3 725181
9.1	0 124603	0,554513	0 951541	1 343874	1.734424	2 124086	2 513238	2 902067	3 290681 3 250497	3 679142 3 634226
9.2	0 122842 0 121127	0.547601 0.540857	0 939817 0 928375	1 327384 1 311293	1 713187	2 098108 2.072756	2 482522 2 452547	2 866617 2 832021	3 211282	3 590393
9.4	0 119455	0.534275	0.917207	1.295585	1.672230	2 048008	2 423286	2 798249	3 173001	3 547603
9.5	0 117827	0.527850	0 906303	1.280247	1.652475	2 023842	2 394714	2 765272	3 135620	3 505820
9.6	0 116239	0 521575	0 895653	1.265267	1 633179	2 000239	2 366806	2 733062	3 099109	3 465009
9.7	0 114691	0.515446	0.885249	1 250632	1 614328	1 977179	2 339540	2 701593	3 063438	3 425136
9.8	0 113181	0.509458 0.503605	0 875082 0 865145	1.236330	1.595906	1.954643	2.312894 2 286847	2 670839 2 640777	3 028577 2 994500	3 386169 3 348078
10	0 110269	0.497884	0.855429	1.208680	1 560290	1 911074	2 261380	2 611382	2 961180	3 310834
20	0 046509	0 231750	0 401603	0.569335	0.736222	0 902664	1 068834	1 234825	1 400691	1 566465
30	0 028650	0 150333	0.261673	0 371642	0 481061	0 590186	0 699128	0 807947	0 916678	1 025345
40	0 020448	0.111032	0 193820	0 275607	0 356993	0 438163	0 519199	0 600143	0 681020	0 761849
50	0.015789	0 087928	0 153807	0 218902	0 283685	0 348300	0 412809	0 477246	0 541631	0 605976 0 502988
60 70	0 012804	0 072735 0 061992	0 127434 0 108750	0 181491 0.154968	0.235295 0 200972	0 288961 0 246862	0 342542 0 292679	0.338447	0 449542	0 429882
80	0 009224	0 053997	0 094826	0 135188	0.175366	0.215446	0 255464	0 295440	0 335385	0 375306
90	0.008072	0 047817	0 084050	0.119872	0 155533	0 191109	0.226630	0 262115	0 297572	0 333009
100	0 007167	0 042899	0.075464	0.107663	0 139720	0.171701	0 203634	0 235534	0 267410	0 299268
200	0 003304	0.021082	0 037254	0.033255	0 069191	0.085093	0 100974	0.116840	0 132696	0 148544
300 400	0.002112	0 013944 0 010407	0.018459	0.035338	0.045938	0 056517 0 042295	0.050211	0 077641	0 088191	0 098737 0 073927
500	0.001340	0 008297	0.018433	0 021102	0 027450	0 033785	0.040114	0 046437	0 052757	0 059074
600	0 000990	0 006896	0.012254	0.017560	0 022846	0 028123	0 033394	0 038661	0 043925	0 049187
700	0.000837	0.005899	0.010489	0.015034	0 019563	0 024085	0 028601	0.033114	0 037625	0 042133
800	0 000724	0 005152	0 009167	0 013143	0 017104	0 021059	0 025010	0 028958	0 032903	0 036847
900	0 000637	0 004573	0 008140	0 011673	0 015194	0 018708	0 022219	0.025727	0 029234	0.032739
1000 2000	0 000569 0 000270	0 004111	0.007320 0.003643	0.010499 0.005230	0 013667	0.008391	0 019988	0 023145 0.011545	0.013122	0 029454 0 014697
3000	0.000175	0 002041	0.002423	0.003480	0 004534	0.008391	0 006638	0.007689	0.013122	0 009789
4000	0 000129	0 001014	0.001814	0.002607	0 003397	0 004186	0 004975	0.005762	0 006550	0 007337
5000	0.000101	0 000810	0.001450	0.002084	0 002716	0 003347	0 003978	0.004608	0 005238	0 005867
6000	0 000084	0.000674	0.001207	0.001735	0 002262	0 002788	0 003313	0.003838	0 004363	0 004888
7000 8000	0 000071 0 000062	0 000577	0.000904	0.001487	0 001938	0 002389	0.002839	0.003289	0 003739	0 004189
9000	0 000054	0.000303	0.000904	0.001300	0 001506	0 002089	0 002207	0 002557	0 003271	0 003257
10000	0 000049	0.000403	0.000723	0 001040	0 001355	0 001671	0.001986	0 002301	0 002616	0 002931
	•				•		•	•	•	

Примечание. Значения корней рассчитаны на программе MAPLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Гамма-функция $\Gamma(u)$

Функции:
$$\Gamma(u) = \int_{0}^{\infty} \tau^{u-1} \exp(-\tau) d\tau$$
; $\Gamma(u+1) = u!$; $\Gamma(u) = (u-1)!$.

Разложение в ряд: $\frac{1}{\Gamma(u)} = \sum_{n=0}^{\infty} c_n u^n$, где

n	c_n	n	c_n	n	c_n	n	c_n
1	1.00000 00000 000000	8	0.00721 89432 466630	15	-0.00000 02056 338417	22	0.00000 00000 005100
2	0.57721 56649 015329	9	-0.00116 51675 918591	16	0.00000 00061 160950	23	-0.00000 00000 000206
3	-0.65587 80715 202538	10	-0.00021 52416 741149	17	0.00000 00050 020075	24	-0.00000 00000 000054
4	-0.04200 26350 340952	11	0.00012 80502 823882	18	-0.00000 00011 812746	25	0.00000 00000 000014
5	0.16653 86113 822915	12	-0.00002 01348 547807	19	0.00000 00001 043427	26	0.00000 00000 000001
6	-0.04219 77345 555443	13	-0.00000 12504 934821	20	0.00000 00000 077823		
7	-0.00962 19715 278770	14	0.00000 11330 272320	21	-0.00000 00000 036968		

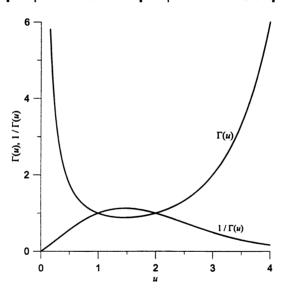


Рис. П40. Зависимости функции от аргумента.

Аппроксимация:

Диапазон	Зависимость
$0 \le u \le 1$	$\Gamma(u+1) = \begin{pmatrix} 1 - 0.577191652u + 0.988205891u^2 - 0.897056937u^3 + \\ + 0.918206857u^4 - 0.756704078u^5 + 0.482199394u^6 - \\ - 0.193527818u^7 + 0.035868343u^8 \end{pmatrix}$
u >> 1	$\Gamma(u+1) = \sqrt{\frac{2\pi}{e}} \exp(-u)[u(u+1)]^{z/2+0.25}$

Значения функций $\Gamma(u)$ и $1/\Gamma(u)$ для аргумента $u=0.005\div 4$

	Γ(μ)	1/Γ(<i>u</i>)	u	Γ(u)	1/Γ(<i>u</i>)		Γ(μ)	1/T(u)	"	Γ(<i>u</i>)	1/Γ(<i>u</i>)	M	Γ(u)	1/ Г (и)
0.005	199 427707	0 005014	0.435	2 036574	0 491021	0.865	1 098559	0 910283	1.295	0 898243	1 113284	1.725	0 913613	1 094555
0.010	99 432585	0 010057	0.440	2 013193	0 496723	0.870	1 094069	0 914019	1.300	0 897471	1 114243	1.730	0 914665	1 093296
0.015	66 104086	0.015128	0.445	1 990387	0 502415	0.875	1 089652	0 917724	1.305	0 896724	1 115170	1.735	0 915736	1 092018
0.020	49 442210	0 020226	0.450	1 968136	0 508095	0.880	1 085308	0 921398	1.310	0 896004	1 116066	1.740	0 916826	1 090719
0.025	39 446959	0 025350	0.455	1 946422	0 513763	0.885	1 081034	0 925040	1.315	0 895310	1 116932		0 917935	1 089402
0.030	32 784998	0 030502	0.460	1 925227	0 519419	0.890	1 076831	0 928651		0 894640	1 117767	1.745	0 919063	1 088065
0.035	28 027759	0 030302	0.465	1 904533	0 525063				1.320			1.750	0 920209	1 086709
0.040	24 460955	0 033879		1 884326		0.895	1 072696	0 932231	1.325	0 893997	1 118572	1.755		1 085335
			0.470		0 530694	0.900	1 068629	0 935779	1.330	0 893378	1 119347	1.760	0 921375	1 083941
0.045	21 687762	0 046109	0.475	1 864588	0 536311	0.905	1 064628	0 939295	1.335	0 892784	1 120091	1.765	0 922560	
0.050	19 470085	0 051361	0.480	1 845306	0 541915	0.910	1 060693	0 942780	1.340	0 892216	1 120805	1.770	0 923763	1 082529
0.055	17 656410	0 056637	0.485	1 826465	0 547506	0.915	1 056823	0 946233	1.345	0 891671	1 121490	1.775	0 924986	1 081098
0.060	16 145727	0 061936	0.490	1 808051	0 553082	0.920	1 053016	0 949654	1.350	0 891151	1 122144	1.780	0 926227	1 079649
0.065	14 868107	0 067258	0.495	1 790052	0 558643	0.925	1 049271	0 953043	1.355	0 890656	1 122768	1.785	0 927488	1 078181
0.070	13 773601	0 072603	0.500	1 772454	0 564190	0.930	1 045588	0 956400	1.360	0 890185	1 123363	1.790	0 928767	1 076696
0.075	12 825578	0 077969	0.505	1 755245	0 569721	0.935	1 041966	0 959724	1.365	0 889737	1 123927	1.795	0 930066	1 075192
0.080	11 996566	0 083357	0.510	1 738415	0 575237	0.940	1 038403	0 963017	1.370	0 889314	1 124463	1.800	0 931384	1 073671
0.085	11 265559	0 088766	0.515	1 721951	0 580736	0.945	1 034899	0 966278	1.375	0 888914	1 124969	1.805	0 932720	1 072133
0.090	10 616217	0 094196	0.520	1 705844	0 586220	0.950	1 031453	0 969506	1.380	0 888537	1 125445	1.810	0 934076	1 070576
0.095	10 035639	0 099645	0.525	1 690082	0 591687	0.955	1 028064	0 972702	1.385	0 888184	1 125893	1.815	0 935451	1 069003
0.100	9 513508	0 105114	0.530	1 674656	0 597138	0.960	1 024732	0 975865	1.390	0 887854	1 126311	1.820	0 936845	1 067412
0.105	9 041468	0 110602	0.535	1 659556	0 602571	0.965	1 021455	0 978996	1.395	0 887548	1 126700	1.825	0 938258	1 065805
0.110	8 612686	0 116108	0.540	1 644773	0 607986	0.970	1 018232	0 982095	1.400	0 887264	1 127060	1.830	0 939690	1 064180
0.115	8 221516	0 121632	0.545	1 630299	0 613384	0.975	1 015063	0 985160	1.405	0 887003	1 127392		0 941142	1 062539
0.120		0 127174										1.835		
0.125	7 863252 7 533942	0 132733	0.550 0.555	1 616124	0 618764	0.980	1 011947	0 988194	1.410	0 886765	1 127695	1.840	0 942612	1 060881
					0 624126	0.985	1 008884	0 991194	1.415	0 886549	1 127969	1.845	0 944102	
0.130	7 230242	0 138308	0.560	1 588641	0 629469	0.990	1 005872	0 994162	1.420	0 886356	1 128215	1.850	0 945611	1 057517
0.135	6 949304	0 143899	0.565	1 575318	0 634793	0.995	1 002911	0 997098	1.425	0 886185	1 128433	1.855	0 947139	1 055811
0.140	6 688686	0 149506	0.570	1 562263	0 640097	1.000	1 000000	1 000000	1.430	0 886036	1 128622	1.860	0 948687	1 054088
0.145	6 446284	0 155128	0.575	1 549469	0 645382	1.005	0 997139	1 002870	1.435	0 885910	1 128783	1.865	0 950254	1 052350
0.150	6 220273	0 160765	0.580	1 536930	0 650648	1.010	0 994326	1 005707	1.440	0 885805	1 128917	1.870	0 951840	1 050597
0 155	6 009065	0 166415	0 585	1 524639	0 655893	1.015	0 991561	1 008511	1.445	0 885722	1 129022	1.875	0 953446	1 048827
0.160	5 811269	0 172079	0.590	1 512590	0 661118	1.020	0 988844	1 011282	1.450	0 885661	1 129100	1.880	0 955071	1 047043
0.165	5 625665	0 177757	0.595	1 500776	0 666322	1.025	0 986174	1 014020	1.455	0 885622	1 129150	1.885	0 956715	1 045243
0.170	5 451174	0 183447	0.600	1 489192	0 671505	1.030	0 983550	1 016725	1.460	0 885604	1 129172	1.890	0 958379	1 043428
0.175	5 286842	0 189149	0.605	1 477832	0 676667	1.035	0 980972	1 019398	1.465	0 885608	1 129168	1.895	0 960063	1 041599
0.180	5 131821	0 194863	0.610	1 466690	0 681808	1.040	0 978438	1 022037	1.470	0 885633	1 129136	1.900	0 961766	1 039754
0.185	4 985354	0 200588	0.615	1 455760	0 686926	1.045	0 975949	1 024643	1 475	0 885679	1 129077	1 905	0 963488	1 037895
0.190	4 846763	0 206323	0.620	1 445038	0 692023	1.050	0 973504	1 027217	1.480	0 885747	1 128991	1.910	0 965231	1 036022
0.195	4 715442	0 212069	0.625	1 434519	0 697098	1.055	0 971103	1 029757	1.485	0 885836	1 128878	1.915	0 966993	1 034134
0.200	4 590844	0 217825	0.630	1 424197	0 702150	1.060	0 968744	1 032265	1.490	0 885945	1 128738	1.920	0 968774	1 032232
0.205	4 472474	0 223590	0.635	1 414068	0 707179	1.065	0 966427	1 034739	1.495	0 886076	1 128572	1.925	0 970576	1 030316
0.210	4 359888	0 229364	0.640	1 404128	0 712186	1.070	0 964152	1 037181	1.500	0 886227	1 128379	1.930	0 972397	1 028387
0.215	4 252680	0 235146	0.645	1 394372	0 717169	1.075	0 961918	1 039589	1 505	0 886399	1 128160	1.935	0 974238	1 026443
0.220	4 150482	0 240936	0.650	1 384795	0 722128	1.080	0 959725	1 041965	1.510	0 886592	1 127915	1.940	0 976099	1 024486
0.225	4 052958	0 246733	0.655	1 375394	0 727064	1.085	0 957573	1 044307	1.515	0 886805	1 127644	1.945	0 977980	1 022516
0.230	3 959804	0 252538	0.660	1 366164	0 731976	1.090	0 955459	1 046617	1.520	0 887039	1 127346	1.950	0 979881	1 020532
0.235	3 870738	0 258349	0.665	1 357102	0 736864	1.095	0 953386	1 048893	1.525	0 887293	1 127023	1.955	0 981802	1 018536
0 240	3 785504	0 264166	0.670	1 348204	0 741728	1.100	0 951351	1 051137	1.530	0 887568	1 126675	1.960	0 983743	1 016526
0.245	3 703867	0 269988	0.675	1 339466	0 746566	1.105	0 949354	1 053348	1.535	0 887863	1 126300	1 965	0 985704	1 014504
0 250	3 625610	0 275816	0.680	1 330884	0 751380	1.110	0 947396	1 055525	1.540	0 888178	1 125901	1 970	0 987685	1 012469
0.255	3 550532	0 281648	0.685	1 322455	0 756169	1 115	0 945474	1 057670	1.545	0 888513	1 125476	1.975	0 989687	1 010421
0.260	3 478450	0 287484	0 690	1 314177	0 760933	1 120	0 943590	1 059782	1.550	0 888868	1 125026	1 980	0 991708	1 008361
0.265	3 409194	0 293325	0.695	1 306044	0 765671	1.125	0 941743	1 061861	1.555	0 889244	1 124551	1 985	0 993751	1 006289
0.270	3 342604	0 299168	0 700	1 298055	0 770383	1.130	0 939931	1 063907	1.560	0 889639	1 124051	1.990	0 995813	1 004204
0.275	3 278535	0 305014	0.705	1 290207	0 775070	1.135	0 938156	1 065921	1.565	0 890055	1 123527	1 995	0 997896	1 002108
0.280	3 216852	0 310863	0 710	1 282495	0 779730	1.140	0 936416	1 067901	1 570	0 890490	1 122978	2.000	1 000000	1 000000
0.285	3 157427	0 316714	0 715	1 274918	0 784364	1.145	0 934711	1 069849	1.575	0 890945	1 122404	2.005	1 002124	0 997880
0.290	3 100143	0 322566	0.720	1 267473	0 788971	1.150	0 933041	1 071764	1.580	0 891420	1 121806	2.010	1 004269	0 995749
0.295	3 044892	0 328419	0 725	1 260157	0 793552	1.155	0 931405	1 073647	1.585	0 891914	1 121184	2 015	1 006435	0 993606
0.300	2 991569	0 334273	0.730	1 252966	0 798106	1.160	0 929803	1 075497	1.590	0 892428	1 120538	2.020	1 008621	0 991453
0.305	2 940080	0 340127	0 735	1 245900	0 802633	1.165	0 928235	1 077314	1 595	0 892962	1 119868	2.025	1 010828	0 989288
0.310	2 890336	0 345981	0.740	1 238954	0 807132	1.170	0 926700	1 079098	1 600	0 893515	1 119175	2 030	1 013056	0 987112
0.315	2 842253	0 351834	0.745	1 232127	0 811604	1.175	0 925197	1 080850	1.605	0 894088	1 118458	2 035	1 015306	0 984925
0.320	2 795751	0 357686	0.750	1 225417	0 816049	1.180	0 923728	1 082570	1 610	0 894681	1 117717	2.040	1 017576	0 984923
0.325	2 750759	0 363536	0.755	1 218820	0 820466	1.185	0 922290	1 084257	1615	0 895292	1 116953	2.045	1 01/3/6	0 982728
0.330	2 707206	0 369384	0.760	1 212335	0 824854	1.190	0 920885	1 085912	1.620	0 895924	1 116167	2.050		0 978302
0.335	2 665028	0 375231	0.765	1 205960	0 829215	1.195	0 919511	1 087534	1.625	0 896574	1 115357	2.055	1 022179 1 024513	0 976073
0.340	2 624163	0 381074	0.770	1 199692	0 833547	1.200	0 918169	1 089124	1.630	0 897244	1 114524	2.060	1 026868	0 973835
0.345	2 584554	0 386914	0.775	1 193530	0 837851	1.205	0 916857	1 090682	1.635	0 897933	1 113668	2.065		0 971586
0.350	2 546147	0 392750	0.780	1 187471	0 842126	1.210	0 915576	1 092208	1.640	0 898642	1 112790		1 029245 1 031643	0 969328
0.355	2 508890	0 398583	0.785	1 181513	0 846372	1.215	0 914326	1 093702	1.645	0 899370	1 111890	2.070 2.075	1 034062	0 967060
0.360	2 472735	0 404411	0.790	1 175655	0 850590	1.220	0 913106	1 095163	1.650	0 900117				
0.365	2 437636	0 410234	0.795	1 169894	0 854778	1.225	0911916	1 096593	1.655	0 900883	1 110967 1 110022	2.085	1 036503	0 964782 0 962495
0.370	2 403550	0 416051	0.800	1 164230	0 858937		0 910755	1 097990						
0.375	2 370436	0 421863	0.805	1 158659	0 863067	1.230	0 909623	1 09/990	1.660	0 901668	1 109055	2 090	1 041451	0 960199
0.380	2 338256	0 427669	0.805	1 153181	0 863067	1.235	0 909623	1 100690	1.665	0 902473	1 108067	2.095 2.100	1 043957	0 957894
0.385	2 306972	0 433469	0.815	1 147793	0 871237	1.245	0 907447	1 101992	1.675	0 903296	1 10/036	2.100	1 046486 1 049036	0 955579 0 953256
0.390	2 276549	0 439261	0.820	1 142494	0 875278	1.245	0 907447	1 103263	1.680	0 904139	1 104971			
0.395	2 246956	0 445047	0.825	1 137283	0 879289	1.255	0 905386	1 103263	1.685	0 905882		2.110	1 051609	0 950924
0.400	2 218160	0 450824	0.830	1 132157	0 883270	1.260	0 904397	1 104302	1.690	0 905882	1 103897	2.115	1 054204	0 948583 0 946234
0.405	2 190131	0 456594	0.835	1 127116	0 887220	1.265	0 904397	1 106885	1.695	0 907701	1 102801	2.120	1 059461	0 948234
0.410	2 162841	0 462355	0.840	1 122158	0 891140	1.263	0 902503	1 108029	1.700	0 908639	1 100547	2.125	1 062123	0 9438//
0.415	2 136263	0 468107	0.845	1 117281	0 895030	1.275	0 901597	1 109143	1.705	0 909596	1 099390	2.135	1 062123	0 939137
0.420	2 110371	0 473850	0.850	1 112484	0 898890	1.280	0 900718	1 110225	1.710	0 910572	1 098211	2 140	1 067514	0 936756
0.425	2 085141	0 479584	0 855	1 107765	0 902718	1.285	0 899867	1 111276	1.715	0 911567	1 097013	2.145	1 070244	0 934366
0.430	2 060549	0 485307	0.860	1 103124	0 906516	1.290	0 899042	1 112296	1.720	0 912581	1 095794	2 150		0 931969
											. 372.74			

	Γ(ν)	1/Γ(ω)		Γ(u)	1/Γ(w)		Γ(ν)	1/ Γ (<i>u</i>)		Γ(μ)	1/ Г (#)	"	Γ(μ)	
2.155	1 075773	0 929564	2.525	1.353122	0 739032	2,895	1 819319	0 549656	3.265	2 588548	0 386317	3.635	3 868500	1/Γ(ω) 0 258498
2.160	1.078572	0 927152	2.530	1 357978	0 736389	2.900	1 827355	0 547239	3.270	2 601826	0 384345	3.640	3 890761	0 257019
2.165	1 081393	0 924733	2.535	1 362869	0 733746	2.905	1.835446	0 544827	3.275	2 615195	0.382381	3.645	3 913181	0 255547
2.170	1 084239	0 922306	2.540	1 367794	0 731104	2.910	1.843591	0 542420	3.280	2 628657	0 380422	3.650	3 935761	0 254080
2.175	1 087107	0 919873	2.545 2.550	1.372753	0 728463 0.725823	2.915 2.920	1 851791 1 860047	0 540018 0 537621	3.285 3.290	2 642211 2 655859	0 378471 0.376526	3.655	3 958502 3.981407	0 252621
2.185	1 092914	0 914985	2,555	1.382774	0.723184	2.925	1.868358	0 535229	3.295	2 669601	0.374588	3.665	4 004475	0 249721
2.190	1 095853	0 912531	2.560	1 387837	0 720546	2.930	1 876726	0 532843	3.300	2 683437	0 372656	3.670	4 027709	0 248280
2.195	1.098816	0 910071	2.565	1 392935	0 717908	2.935	1 885150	0.530462	3.305	2 697370	0 370732	3.675	4 051109	0 246846
2.200	1 101802	0 907604 0 905131	2.570	1.398069	0 715272 0 712637	2.940	1 893632 1 902171	0,528086 0 525715	3.310 3.315	2 711398 2 725524	0 368813 0 366902	3.680 3.685	4 074677 4 098414	0 245418
2.205	1 104813	0 902651	2.575 2.580	1 408443	0 710004	2.950	1 910767	0 523350	3.320	2 739747	0 364997	3.690	4 122321	0 243997 0 242582
2.215	1.110906	0 900166	2.585	1 413684	0 707372	2.955	1 919422	0 520990	3.325	2 754069	0 363099	3.695	4.146400	0 241173
2.220	1 113989	0 897675	2.590	1 418961	0 704741	2.960	1 928135	0 518636	3.330	2 768489	0 361208	3.700	4 170652	0 239771
2.225	1 117097	0 895178	2.595	1 424274	0.702112	2.965	1.936908	0 516287	3.335	2 783010	0 359323 0 357445	3.705	4 195078	0 238375
2.230	1 120228 1 123385	0 892675 0 890167	2.600	1 429625 1 435012	0 696858	2.970	1 945739 1.954631	0 513943 0 511606	3.340 3.345	2 797631 2 812353	0 355574	3.710 3.715	4 219680 4 244459	0 236985 0 235601
2.240	1 126566	0 887653	2.610	1 440436	0 694234	2.980	1 963583	0 509273	3.350	2 827178	0 353710	3.720	4 269417	0 234224
2.245	1 129772	0 885134	2.615	1 445897	0 691612	2.985	1 972595	0 506946	3.355	2 842105	0 351852	3.725	4 294554	0 232853
2.250	1 133003	0 882610	2.620	1 451396	0 688992	2.990	1 981668	0 504625	3.360	2 857136	0.350001	3.730	4 319873	0 231488
2,255	1 136259 1.139540	0 880081 0 877547	2.625	1.462508	0 686373 0 683757	2.995 3.000	1.990803 2 000000	0 502310 0 500000	3,365	2 872272 2 887512	0 348156 0 346319	3.735 3.740	4 345374 4 371060	0 230130 0 228777
2.265	1 142847	0 875008	2.635	1 468121	0 681143	3.005	2 009259	0 497696	3.375	2 902858	0 344488	3.745	4 396931	0 227431
2.270	1 146179	0 872464	2.640	1 473773	0 678531	3.010	2 018581	0 495398	3.380	2 918311	0 342664	3.750	4.422988	0 226091
2.275	1 149536	0 869916	2.645	1.479463	0 675921	3.015	2 027966	0 493105	3,385	2 933872	0 340847	3.755	4 449235	0 224758
2.280	1 152920 1 156329	0 867363 0 864806	2.650	1 485193	0 673313 0 670708	3.020 3.025	2 037415 2 046927	0 490818 0 488537	3,390 3,395	2 949541 2 965319	0 339036 0 337232	3.760 3.765	4 475671 4 502298	0 223430
2.285 2.290	1.159764	0 862245	2.655	1 496769	0 668106	3.025	2 056505	0 486262	3,395	2 981206	0 335435	3.770	4 502298	0 222109
2.295	1 163225	0 859679	2.665	1 502617	0 665505	3.035	2 066147	0 483993	3.405	2 997205	0 333644	3.775	4 556133	0 219484
2,300	1 166712	0 857110	2.670	1 508505	0 662908	3.040	2 075854	0 481729	3.410	3 013315	0 331860	3.780	4 583343	0 218181
2.305	1 170225	0 854536	2.675	1 514433	0 660313	3.045	2 085628	0 479472	3.415	3 029537	0 330083	3.785	4 610751	0 216884
2.310	1 173765 1 177332	0 851959 0 849378	2.680	1.520402	0 657721 0 655132	3.050	2 095468	0 477220	3.420 3.425	3 045873 3 062323	0 328313 0 326550	3.790 3.795	4 638358 4 666165	0 215594
2,320	1 180925	0 846794	2.690	1 532461	0 652545	3.060	2 115349	0 472735	3.430	3 078887	0 324793	3.800	4 694174	0 213030
2,325	1 184546	0 844206	2.695	1 538553	0 649961	3.065	2 125390	0 470502	3.435	3 095568	0 323043	3.805	4 722387	0 211757
2.330	1 188193	0 841614	2.700	1 544686	0 647381	3.070	2 135500	0 468274	3.440	3 112365	0 321299	3.810	4 750805	0 210491
2.335	1 191867 1 195569	0 839020 0 836422	2.705 2.710	1 550861	0.644803	3.075	2 145679 2 155927	0 466053 0 463838	3.445 3.450	3 129279 3.146312	0 319562 0 317832	3.815 3.820	4 779430 4 808264	0 209230 0 207975
2,345	1 199298	0 833821	2.715	1 563337	0.639657	3.085	2 166245	0 461628	3.455	3 163464	0 316109	3.825	4 837307	0 206727
2.350	1 203054	0 831218	2.720	1 569639	0 637089	3.090	2 176632	0 459425	3.460	3.180737	0 314393	3.830	4 866563	U 205484
2.355	1 206839	0 828611	2.725	1 575983	0 634525	3.095	2 187091	0 457228	3.465	3 198130	0 312683	3.835	4 896031	0 204247
2.360 2.365	1 210651	0 826002 0 823390	2.730 2.735	1.582371	0 631963 0 629405	3.100 3.105	2 197620 2 208222	0 455038 0 452853	3.470 3.475	3 215645 3.233284	0 310980	3.840 3.845	4 925715 4.955616	0 203016 0 201791
2.370	1 218360	0 820776	2.740	1 595277	0 626850	3.110	2 218895	0 450675	3.480	3 251046	0 307593	3.850	4.935016	0 200572
2.375	1 222256	0 818159	2.745	1 601796	0.624299	3.115	2 229641	0 448503	3.485	3 268933	0 305910	3.855	5 016074	0 199359
2.380	1 226181	0 815540	2,750	1 608359	0 621752	3.120	2 240461	0 446337	3.490	3 286945	0 304234	3.860	5 046636	0 198152
2.385	1 230135 1 234117	0 812919 0 810296	2.755 2.760	1.614967	0 619208 0 616667	3.125 3.130	2 251354 2 262321	0 444177 0 442024	3.495 3.500	3 305084 3 323351	0 302564	3.865 3.870	5 077421 5 108431	0 196950 0 195755
2.395	1 238129	0 807670	2.765	1,628318	0 614131	3.135	2 273363	0 439877	3.505	3 341746	0 299245	3.875	5 139669	0 194565
2.400	1 242169	0 805043	2.770	1 635061	0 611598	3.140	2.284481	0 437736	3.510	3 360271	0 297595	3.880	5 171136	0 193381
2.405	1 246239	0 802414	2.775	1 641850	0 609069	3.145	2 295674	0 435602	3.515	3 378927	0 295952	3.885	5 202833	0 192203
2.410 2.415	1 250338 1 254467	0 799784 0 797151	2.780 2.785	1 648685 1 655566	0 606544 0 604023	3.150 3.155	2 306944 2 318290	0 433474 0 431352	3.520 3.525	3 397713 3 416633	0 294316 0 292686	3.890 3.895	5 234764 5 266928	0 191031 0 189864
2.420	1 258625	0 794518	2.790	1.662494	0 601506	3.160	2 329715	0 431332	3.530	3 435686	0 291063	3.900	5 299330	0 188703
2.425	1 262813	0 791883	2.795	1 669469	0 598993	3.165	2 341217	0 427128	3.535	3 454873	0 289446	3.905	5 331969	0 187548
2.430	1.267032	0 789246	2.800	1 676491	0 596484	3.170	2 352798	0 425026	3.540	3 474196	0 287836	3.910	5 364849	0 186399
2.435	1 271280	0 786609 0 783970	2.805 2.810	1 683560 1 690678	0 593979	3.175 3.180	2 364458	0 422930 0 420840	3.545 3.550	3 493655 3 513252	0 286233 0 284637	3.915 3.920	5 397971 5 431336	0 185255 0 184117
2.445	1 279869	0 781330	2.810	1 697844	0 588982	3.185	2 388018	0 418757	3.555	3 532988	0 283047	3.925	5 464948	0 182984
2.450	1 284209	0 778689	2.820	1 705058	0.586490	3.190	2 399918	0 416681	3.560	3 552863	0 281463	3.930	5 498807	0 181858
2.455	1 288580	0 776048	2.825	1 712321	0 584003	3.195	2 411901	0 414611	3.565	3 572879	0 279886	3.935	5 532917	0 180737
2.460	1 292982 1 297416	0 773406	2.830	1.719633	0 581519 0 579040	3.200 3.205	2 423965 2.436113	0 412547 0 410490	3.570 3.575	3 593037 3 613338	0 278316 0 276752	3.940	5 567278 5 601893	0 179621
2.465 2.470	1 301881	0 770763 0 768120	2,835 2.840	1 734407	0 576566	3.210	2.436113	0 408439	3.580	3 633783	0 275195	3.950	5 636763	0 177407
2.475	1 306377	0 765476	2.845	1.741868	0 574096	3.215	2 460657	0 406395	3.585	3 654373	0 273645	3.955	5 671892	0 176308
2.480	1 310906	0 762831	2.850	1 749381	0 571631	3.220	2 473056	0 404358	3.590	3 675109	0 272101	3.960	5 707281	0 175215
2.485	1 315466	0 760187	2.855	1.756944	0.569170	3.225	2 485540	0 402327	3.595	3 695992	0 270563	3.965	5 742931	0 174127
2.490 2.495	1.320058 1.324683	0.757542 0 754898	2.860 2.865	1 764558	0 566714 0 564263	3.230	2 498109 2 510765	0 400303 0 398285	3.600 3.605	3 717024 3 738205	0 269032 0 267508	3.970 3.975	5 778846 5 815027	0 173045 0 171968
2.495	1 324683	0 752253	2.865	1 779941	0.561816	3.240	2 523508	0 396274	3.610	3.759537	0 265990	3.980	5 851476	0 170897
2.505	1 334030	0.749608	2.875	1 787711	0 559375	3.245	2 536338	0 394269	3.615	3 781021	0 264479	3.985	5 888196	0 169831
2.510	1 338753	0 746964	2.880	1 795533	0 556938	3.250	2 549257	0 392271	3.620	3.802658	0 262974	3.990	5 925188	0 168771
2.515	1 343510	0 744319	2.885	1 803408	0 554506 0 552078	3.255	2 562264 2 575361	0 390280 0 388295	3.625 3.630	3 824450 3.846396	0 261476 0 259984	3.995 4.000	5 962456 6 000000	0 167716
2.520	1 348299	0 741675	2.890	1.811337	0.3320/8	3.400	4 3/3361	U 366293	3.030	3.640396	U 239984	4.000	0.000000	0 10000/

Примечание. Значения функций рассчитаны на программе MAPLE7.

<u>Литература:</u> Справочник..., 1979; Баренблатт и др., 1972.

ПРИЛОЖЕНИЕ 41

Корни уравнения $J_1(\alpha_n)Y_1(c\alpha_n)-Y_1(\alpha_n)J_1(c\alpha_n)=0$

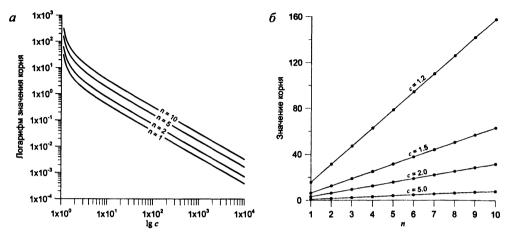


Рис. П41. Зависимости логарифма значения корня (1-й, 2-й, 5-й и 10-й) от логарифма величины c (a) и зависимости значения корня от его номера при различных величинах c (1.2, 1.5, 2.0 и 5.0) (б).

Условные обозначения:

 $\overline{J_1(\beta), Y_1(\beta)}$ – функции Бесселя (Приложения 2);

 α_n – значение n-го корня;

C — постоянное значение;

n – номер корня.

Значения первых десяти корней для $c = 1.1 \div 10000$

				- ,,						
c	a a	4	Ø6	a,	æ	a.	Ot Ot	4	a ,	a.
1,1	31 426761	62 837277	94 251396	125.666419	157 081803	188.497368	219 913036	251 328769	282 744545	314 160351
1.2	15 727745	31 425859	47.130517	62 836825	78 543794	94 251095	109.958585	125 666193	141 373880	157 081622
1.3	10 499199	20 957683	31 425096	41.894783	52.365384	62 836443	73.307763	83.779247	94 250840	104 722509
1.4	7.887433	15 724931	23 573288	31.424442	39 276724	47 129571	54 982742	62 836115	70 689623	78 543226
1.5	6 321872	12 586120	18.862775	25 142670	31 423875	37 705738	43 987978	50 270454	56 553087	62 835831
1.6	5.279092	10 494135	15 722817	20.955113	26 188877	31 423379	36 658304	41 893494	47 128861	52 364352
1.7	4.534833	9 000240	13 480257	17 964205	22 449757	26.936117	31 422941	35 910055	40 397363	44 884808
1.8	3 977004	7.880085	11.798528	15 721172	19 645536	23.570771	27 496504	31 422551	35 348807	39 275210
1.9	3.543361	7 009045	10 490657	13 976699	17 464565	20 953354	24 442674	27 932327	31 422203	34 912235
2.0	3 196578	6 312350	9 444465	12 581203	15 719854	18 859477	21.999658	25 140190	28 280957	31 421889
2.1	2 912915	5.742426	8.588568	11 439496	14 292416	17 146348	20.000865	22 855748	25 710877	28 566179
2.2	2 676555	5 267562	7 875381	10 488123	13.102924	15 718776	18 335234	20 952073	23 569168	26 186441
2.3	2 476554	4.865806	7 271961	9 683152	12 096463	14 510857	16 925877	19 341292	21 756970	24 172834
2.4	2 305101	4.521480	6 754780	8.993208	11.233807	13.475520	15.717876	17 960639	20 203673	22 446899
2.5	2.156472	4.223091	6 306583	8 395280	10 486193	12.578245	14 670958	16 764087	18 857495	20 951099
2.6	2 026377	3 962016	5.914432	7.872112	9 832047	11.793145	13 754917	15 717115	17 679599	19 642284
2.7	1 911537	3.731667	5 568433	7.410509	9 254873	11 100420	12 946656	14.793326	16 640288	18 487455
2.8	1 809403	3 526917	5.260890	7.000206	8 741840	10 484675	12.228210	13 972188	15 716463	17 460946
2.9	1 717965	3 343720	4 985729	6.633104	8 282820	9.933754	11 585398	13 237492	14 889888	16 542497
3.0	1 635616	3.178841	4.738091	6 302719	7 869709	9.437931	11 006873	12.576271	14 145976	15 715897
3.1	1 561054	3 029660	4.514041	6 003805	7 495948	8 989335	10.483450	11 978028	13 472917	14 968024
3.2	1 493217	2 894034	4 310363	5.732070	7 156170	8.581525	10 007616	11 434175	12 861048	14 288144
3.3	1 431227	2 770194	4 124397	5 483968	6 845942	8 209180	9 573162	10.937616	12 302389	13 667386
3.4	1.374352	2 656664	3 953928	5 256543	6 561569	7 867868	9.174916	10.482441	11 790287	13 098361
3.5	1.321977	2 552208	3 797096	5 047315	6 299949	7 553863	8 808532	10 063681	11 319156	12 574859
3.6	1 273585	2 455775	3 652327	4.854182	6 058455	7 264015	8 470333	9 677137	10 884267	12 091629
3.7	1.228732	2 366475	3.518279	4 675356	5 834852	6 995638	8 157188	9 319226	10 481594	11 644195
3.8	1 187040	2 283543	3.393804	4 509303	5.627221	6 746433	7 866412	8 986883	10 107685	11 228722
3.9	1 148183	2 206318	3 277910	4 354702	5 433910	6 514415	7 595691	8 677461	9 759564	10 841904
4.0	1 111876	2 134230	3 169740	4.210407	5.253488	6 297867	7 343019	8 388668	9 434652	10 480875
4.1	1 077875	2 066782	3 068544	4 075421	5 084705	6 095290	7 106650	8 118508	9 130703	10 143138
4.2	1 045963	2 003537	2 973670	3 948871	4 926472	5 905374	6 885054	7 865233	8 845752	9 826511
4.3	1 015951	1 944114	2 884541	3 829989	4 777828	5.726969	6 676888	7 627309	8 578071	9 529074
4.4	0 987673	1 888176	2 800652	3 718098	4 637928	5 559058	6 480968	7 403382	8 326137	9 249134

4.5 0 900000	<u> </u>		<u> </u>		g. 1		<u>"</u> 1			<u>~</u> 1	
4.6 095100 1795500 2 246842 312300 4 251500 4 251500 5 201500 4 556522 6 20200 7 20200 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2		0.960980									8 985191
4.7 09/1012 7/16488 2-2/1616 14/1070 4-2/6559 3/09704 4-60220 7-6/5046 14/1070											8 735912
4.4 0 889163 097379 239928 1339211 415929 497579 380007 642550 745005 1											8 500108
4.0 0.807613 1.613100 2.446575 3.146400 4.446600 5.26070 6.45990 7.260265 7.46040 7.260265 7.46040 7.260265 7.46040 7.260265 7.46040 7.260265 7.46040											8 276715
\$5.1 0.837644 1 327278 232798 1 0.07646 1 8.089004 4 6.1022 3.37331 6 1.4747 8 0.087310 7 1.555 7 1.555 0 0.080645 1 3.05221 237373 1 0.04147 8 0.087310 7 1.555 1 0.086412 1 3.05221 2 3.04731 1 0.04147 1 0.087310 1 0.04147 1 0											8 064778
\$1.0 0.000016 1536221 2273300 3104731 3798351 4590476 5798476 5798471 6.025590 7.5 \$1.5 0.071202 1.01010 122000 2.045200 1.010101 4.01020 1.010101 4.01020 1.010101 4.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010 1.010101 4.01010101 4.010101 4.010101 4.010101 4.010101 4.010101 4.01010101 4.01	5.0	0 847150	1 611072	2 385316	3 164208	3 945411	4 727899	5 511168	6 294945	7 079068	7 863439
Section Company Comp	5.1	0 827644	1 572738	2 327898		3 849694	4 613022		6 141747	6 906710	7 671920
5.6 0.774003 1.64038 2.17277 2.51541 1.509379 4.24050 4.99279 3.501573 5.259380 6.486402 7.55000 7.574000 4.04533 2.17272 2.51541 1.509379 4.24050 4.04535 3.57400 4.05000 4	5.2		1 536221	2 273209	3 014731	3 758535	4 503615	5 249476	5 995843	6 742559	7 489522
5.5 0.738003 1.636352 213700 2.751414 1.500959 4.204602 4.900531 5.97504 0.204502 6.56 5.6 0.7045404 1.646541 0.704502 2.751440 1.01521 4.101551 4.704505 5.47505 7.70510 6.5 5.6 0.7045405 1.646541 0.704502 2.751440 1.01521 1.10155 4.704505 5.47505 7.704500 5.5 0.0046064 1.101504 1.704500 2.504600 2.751410 1.004500 2.751400 5.5 0.0046064 1.101504 1.704500 2.504500 2.751410 1.004500 2.75140 5.5 0.0046064 1.101504 1.704500 2.504500 2.75140 1.004500 2.75140 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 2.504500 2.75140 2.75140 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 2.75140 2.75140 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 2.75140 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 2.75140 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 5.5 0.0046064 5.5 0.0046064 1.101500 2.75140 5.5 0.0046064			1 501393	2 221060		3 671614		5 127758			7 315608
5.6 0.74549 1.69540 2.791492 2.791492 3.794576 3.160570 4.005710 5.495570 5.193573 6.005557 5.005570 5.005											7 149599
\$5.7 0.727469 1379618 2009610 2009620 3.00000 4.026600											6 990968
\$5.0 0.99326 0.099026 0.12008											6 839234
5.9 0.0999026 1132210N 19227R1 228759F 128707F 248707 4891727 5141750N 5.78110N 6 6.0 0.00141 1271054 1177547 2487075 700922 1775000 4325401 420007 177500 6.1 0.00177 177507 2487075 700922 1775000 4325401 420007 5554677 6 6 6.1 0.00177 177507 1775											6 693957
6.0 0.64612 1.966718 1.91610 2.31611 1.04672 7.78588 4.412569 0.09176 3.665729 6. 6.1 0.67714 1.277515 1.277515 2.477575 2.477575 3.09828 3.077502 4.275540 4.09175 4.27575 6. 6.2 0.66515 1.27751 1.481610 2.31610 3.94113 3.07751 4.27575 4.27575 4.27575 6. 6.2 0.6746 1.18167 1.27571 1.481610 2.31610 3.94113 3.94771 4.27575 4											6 554733 6 421192
6.1 0.637341 1270554 127773 148101 2.49712 1.09723 1.29255 4.64567 4.29250 6.64575 1.29270 1.09273 1.09723 1.09723 1.29255 4.64567 4.29250 5.646272 0.666274 1.192701 1.19270 1.292712											6 292993
6.21 0.661525 1.287871 1.841510 2.49711 1.097221 1.649977 4.242951 4.845448 5.443292 6. 6.3. 0.649756 1.222481 1.8197071 2.319724 3.197257 3.097258 4.061776 4.664673 5.319725 5.319725 5.007258 4.061776 4.664673 5.319725 5.319725 5.319725 5.007258 4.061776 4.664673 5.319725											6 169820
6.3 0.669756 1226981 1807001 2394132 3962754 1575702 4 161877 4750231 3,543726 5 4.6 0.63441 181707 174600 231000 2907575 15007578 0 1600757 15007578 4 518708 5 3,540760 5 5 6.6 0.634460 1181707 174600 2310702 2310702 2430707 243011											6 051385
6.4 0.03841 120931 174600 239500 297895 340317 4 008315 4 408475 2 408695 5 40800 6 6.0 0.016004 116170 1712292 2207152 2207152 230800 3 182162 3 96981 4 500321											5 937419
6.5 0.022466 1181677 174291 207942 2875029 343117 401218 451898 513785 5.6											5 827674
6.6 0.016900 116170 1712292 2267152 236900 338242 396900 4509023 5060008 5. 6.7 0.066664 1141387 104224 1227727 2774858 3223112 3872113 426161 4774652 5. 6.8 0.056210 1122274 104212 105604 271506 2727162 2716017 380516 424610 4774652 5. 6.8 0.056210 1122274 104212 105604 271506 2727162 2716017 380516 424610 4774652 5. 6.8 0.056210 110222 105604 271506 2727162 2716017 380516 424610 4774652 5. 6.8 0.056210 105604 271506 2727162 2716017 380516 424610 477465 477471 470714 4			1 181678								5 721920
6.7 0.060694 1141377 1642244 2227792 274658 3323112 337211 422101 4771452 56.68 0.998310 1122224 1564212 211976 2727152 1266117 1805616 4371452 472147 472		0 616900				2 824050					5 619943
6.9 0.587289 1 103802 1 626641 2 155008 2 648174 2 231051 3 74171 4 272187 4 801344 5 7.0 0.578057 1 0.596118 1 0.056659 1.574208 2 0.081216 1.55920 2 1.27571 2 0.506138 1 0.056659 1.574208 2 0.081216 2 554209 1 1.06140 1 0.161205 4 1.13561 4 4.646259 5 7.2 0.506148 1 0.056659 1 0.57208 2 0.081216 2 554209 1 1.06140 1 0.161205 4 1.13561 4 4.646259 5 7.2 0.506148 1 0.056659 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051 1 0.05720 1 0.056051		0 606694	1 141387	1 682744	2 227792	2 774858	3 323112	3 872113	4 421610	4 971452	5 521543
7.0 0.579657 1085941 1.599900 2117571 2.671715 3.157924 3.07271 4.291210 4.2234971 5.7 7.1 0.569118 1.0066597 1575208 2.059007 2165266 1.056515 1.056215 1.0	6.8	0 596830	1 122274	1 654212	2 189786	2 727362	3 266117	3 805616	4 345610	4 885949	5 426537
7.1 0.596118 1.066659 1.574208 2.083216 2.394209 1.106140 3.612205 4.13261 4.664259 5. 7.2 0.506326 1.051303 1.542254 2.059007 2.525066 3.056515 3.561073 4.061279 4.4 4061275 4.75127 5. 7.3 0.552065 1.0513720 1.525089 2.017811 2.512480 3.008272 3.504701 4.001799 4.4 499147 4. 7.5 0.550029 1.004708 1.501676 1.906658 2.475129 2.651313 1.459261 1.904701 4.001799 4.4 499147 4. 7.5 0.550029 1.004708 1.475041 1.906658 2.475129 2.651313 1.459261 1.904701 4.001799 4.4 499147 4. 7.5 0.550029 1.004708 1.475041 1.904658 2.475129 2.501531 1.459202 1.451017 4. 7.6 0.550029 1.004708 1.475041 1.904658 1.475041 2.2415776 2.916256 3.704211 3.87002 4.451017 4. 7.7 0.550029 0.975097 1.445614 1.804704 2.25509 2.20400 3.004704 1.804702 4.451017 4. 7.8 0.51087 0.961781 1.444861 1.877130 2.20472 2.78832 1.248194 1.70840 4.402721 4. 7.8 0.51087 0.961781 1.448614 1.877130 2.259172 2.78832 1.248194 1.70840 4.402721 4. 8.0 0.409822 0.915129 1.175190 1.818292 2.254171 2.709141 1.158816 3.054907 4.4094048 4. 8.1 0.449137 0.90200 1.1550178 1.792992 2.251507 2.671232 3.111578 3.552407 1.993570 4.4 8.2 0.446701 0.909400 1.117070 1.706190 1.20090 1.200607 2.906141 3.158816 3.002035 1.903571 4. 8.2 0.446701 0.909400 1.117070 1.7764191 2.200817 2.461455 1.006588 3.50235 1.908271 4.00000 1.997888 1.117070 1.7764190 1.27090 2.29000 1.405707 1.00209 1.271240 2.46400 1.002774 1.40600 2.908014 3.400010 1.405717 4.40000 2.20000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.400000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.4000000 1.40000000000											5 334750
7.2 0 590458 1 051930 1 540254 2 059007 2 552060 1 1056515 1 561076 4 006125 4 571517 5 7.3 0 552065 1 015720 1 1525000 2 017811 2 512400 3 0 105720 1 105720 1 105720 1 1525000 2 017811 2 512400 3 0 105720 1 10											5 246024
7.3 0.552065 1.035720 1.252500 2.01781											5 160206
7.4 0.54926 1.020021 1.501676 1.986685 2.47529 2.961535 1.450266 1.97482] 4.429079 4.6752 6.95026 1.97482] 4.429079 4.6762 1.476801 1.97462 1.476801 1.97462 1											5 077156
7.5 0 530039 1 004798 1 476981 1 956431 2 245776 2 916216 3 1079417 1 370002 4 16007 7 6 0 520363 0 990029 1 456071 1 4257142 2 399160 2 272009 3 146109 1 320513 4 295195 4 7 7 7 0 520919 0 975607 1 435614 1 809714 2 361047 2 8259002 1 296651 3 7 7 161001 4 211209 4 7 7 8 0 511607 0 961781 1 414681 1 871120 2 129072 2 784038 1 748194 1 708540 4 110221 4 8 0 900057 0 946781 1 414681 1 871120 2 129072 2 784038 1 784194 1 708540 4 110221 4 8 0 900057 0 948204 1 1394750 1 844324 2 2395005 2 748132 2 301136 1 565907 4 1108775 4 108948 4 8 0 949052 0 945129 1 175190 1 1844324 2 2395005 2 748102 3 301136 1 565907 4 1108775 4 108948 4 8 0 949052 0 945129 1 175190 1 1844324 2 2395005 2 748102 3 301136 1 565907 4 1108775 4 108948 4 1 108											4 996743
7.6 0 528363 0 999029 1 456771 1927142 2 399160 2 872100 3 1346160 4 231200 4 4 277.0 520190 4 7.7 0 520190 0 975670 1 415614 1898714 2 2264727 2 788728 1 726451 1761600 4 231200 4 4 7.8 0 511667 0 946741 1 414881 1871120 2 129172 2 788128 1 228194 3 1705610 4 201200 4 8 1 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9											4 918842
7.7 0.529919 0.975507 1.415614 1.898714 2.366487 2.825002 1.294617 1.715601 4.211209 4.7.8 0.511687 0.961781 1.414881 1.871120 2.219202 2.23167 2.748182 1.301316 1.565987 4.118875 4.8.0 0.49852 0.975129 1.715190 1.814324 2.255059 2.748182 1.301316 1.565987 4.118875 4.8.0 0.49852 0.975129 1.715190 1.814324 2.255059 2.748182 1.301316 1.565987 4.118875 4.059484 4.4 0.471209 0.99940 1.356178 1.792992 2.23167 2.67172 3.3111576 1.565987 4.999484 4.4 0.471209 0.99940 1.376618 1.706491 1.7064											4 770123
7.8 0 511667 0 948754 1 344759 1 344759 1 374759 2 378478 1 3248194 3 169297 4 418875 4 7.9 0 506657 0 948254 1 3344759 1 344326 1 2256074 2 2784182 2 323167 2 370141 3 155816 3 659875 4 418875 4 8.1 0 491737 0 922360 1 356178 1 782992 2 226171 2 709141 3 1155816 3 659875 4 908487 4 8.2 0 486701 0 999940 1 137691 1 768391 2 220817 2 261875 2 614355 1 068568 3 159233 1 918270 4 4 8.3 0 480401 0 898758 1 119708 1 7744466 2 170494 2 290837 2 644355 1 068568 3 159233 1 918270 4 8.5 0 468292 0 878466 1 228574 1 608552 2 1211549 2 240857 1 025765 3 1455446 1 884488 4 4 647269 0 878667 1 102209 1 721184 2 141867 2 561606 2 980014 3 3408910 1 812157 4 8.5 0 468292 0 878466 1 285764 2 121559 2 259466 2 940617 3 340654 3 778122 4 8.5 0 468292 0 878466 1 285765 4 1767444 2 208599 2 2405579 2 9077442 3 340654 3 778122 4 8.5 0 468292 0 878466 1 255855 1 676744 2 208599 2 2405579 2 9077442 3 340654 3 778122 4 8.8 0 4045269 0 852265 0 852265 1 6554958 2 2095472 2 404570 2 387050 3 3276610 1 668320 4 8.8 0 404527 0 852650 0 852265 0 155495 2 2007480 2 240570 2 907744 3 3130570 1 668320 4 8.8 0 404577 0 852661 3 19550 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155514 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155512 1 155514 1 1 155512 1 155512 1 155514 1 1 155512 1 155514 1 1 155512 1 155514 1 1 155512 1 155514 1 1 155512 1 155514 1 1 155514											4 699092
7.9 0.506657 0.048/264 1.344/50 1.844/24 2.295/959 2.748/162 3.2013/16 1.654987 4.1087/75 4 8.0 0.4988/2 0.951/20 1.375/90 1.818/20 2.261/73 2.7091/41 1.358/16 3.02945 4.019/30 4.018/30											4 630151
8.0 0.499822 0.931229 1.375199 1.818292 2.26.173 2.709.141 1.155816 1.602965 4.050448 4.8.1 0.491137 0.922360 1.356178 1.792992 2.231567 2.671223 1.311578 1.555207 1.993570 4.8.3 1.0450471 0.097385 1.197080 1.756391 2.203877 2.674155 1.068568 1.501231 1.938271 1.745466 1.814670 2.274549 0.886097 1.102209 1.721184 2.141867 2.598406 2.298406 1.3460417 3.161654 7.781222 4.8.5 0.466229 0.874646 1.285174 1.608552 2.211559 2.539646 2.2984074 3.346634 7.8146848 4.4 8.4 0.474269 0.886097 1.102209 1.721184 2.141867 2.598406 2.2986014 3.408030 1.872157 4.4 8.5 0.466229 0.874646 1.285174 1.608552 2.211559 2.539646 2.2984074 3.346634 7.87222 4.4 8.5 0.466229 0.874646 1.285174 1.608552 2.211559 2.259646 2.2984074 3.346634 7.87222 4.4 8.5 0.466229 0.874646 1.285174 1.608552 2.211559 2.246470 2.207840 2.2078											4 563207
8.1 0 45173 0 922360 1336178 179292 223367 2671232 1311578 1352407 1993570 4 8.2 0.486701 0.099990 1317691) 1768391 2200837 26613125 1093271 4 8 8.3 0 480401 0.09990 1317691 1768391 2200837 2 26613125 1093271 4 8 8 4 0 474269 0.886097 1302209 1721184 2141867 2 5661360 2 986014 3 480401 1832157 4 8 8.5 0 466292 0.876466 1285174 1696522 211559 259366 2 986417 3 1361654 1781222 4 8 8.6 0 460248 0.861491 266858 1 1676648 1 2085996 2 2496579 2 907842 3 131707 1771627 4 8 8.7 0 455789 0.55266 1252424 1.65958 2 2013786 2 2496579 2 907842 3 131707 1771627 4 8 8.8 0 451251 0.842014 1216676 1614012 2 0123986 2 4496579 2 207842 3 131707 1771627 4 8 8.9 0 455789 0.55266 1252424 1.65958 2 2059147 2 449579 2 207842 3 131707 1771627 1 4 9 8 9 0 445549 0.811706 1221231 1.613594 2 2072986 2 417986 2 2797974 1194011 1.590374 3 9 0 445549 0.811706 1221231 1.613594 2 2007886 2 247296 2 797974 1194011 1.590374 3 9 0 445549 0.811706 1.22051 1.591664 1.982621 2 1772570 1.271631 0.81201 1.590374 1.5903											4 498176
8.8 0.480401 0.897658 1.19708 1.744466 21.70940 2.98460 1.026736 1.455466 3.884488 4.474569 0.886007 1.002207 1.721184 2.141867 2.664666 2.986101 3.489201 3.182167 4.86.5 0.466229 0.884604 2.88596 2.486575 2.946417 3.364654 3.781222 4.86.6 0.466266 0.864393 1.266585 1.676484 2.08596 2.496575 2.946417 3.364654 3.185206 3.171627 4.86.8 0.466268 0.864393 1.266585 1.676484 2.08596 2.496575 2.946407 2.870260 3.276610 1.683320 4.8888 0.451251 0.842034 1.216676 1.614012 2.0159147 2.464780 2.870260 3.276610 1.683320 4.8888 0.451251 0.842034 1.216676 1.614012 2.0159147 2.464780 2.870260 3.276710 1.663314 3.90 0.440577 0.821613 1.206351 1.591646 0.198262 2.0159147 2.464780 2.870260 3.276710 3.545941 3.90 0.440577 0.821613 1.206351 1.591646 0.198262 2.075946 2.492596 2.775774 3.194011 3.590374 3.90 0.440577 0.821613 1.206351 1.591646 0.198262 2.075946 2.494780 2.775948 3.115470 3.502017 3.90 0.440577 0.821613 1.206351 1.59161 1.554268 1.982671 2.115889 2.444798 2.729248 3.115470 3.502017 3.90 0.440570 0.784708 1.150591 1.554268 1.984701 2.115889 2.444798 2.729248 3.115470 3.502017 3.90 0.425948 0.402701 0.784708 1.150591 1.554811 1.91622 2.287400 2.663812 0.040713 3.417917 3.90 0.416016 0.802215 1.17590 1.556811 1.51478 1.880908 2.260161 0.104699 3.794708 1.150591 1.150591 1.554871 1.880908 2.260161 0.104699 3.794708 1.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.784708 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.150591 0.050591 0.050591 0.050591 0.050591 0.050											4 434977
8.4 0.474269 0.886077 1302209 1721184 2 141867 2 261606 2 286014 3.408910 1.812157 4 8.5 0.4663292 0.878646 1.28517 4 1.608522 2 113559 2 5.290666 2 286014 3.408910 1.712184 8.6 0.462468 0.861493 1.266551 1.60852 2 113559 2 5.290666 2 286077 2 290742 1.3119570 1.711627 4 8.7 0.456789 0.85266 1.252424 1.65493 2 0.808906 2.246679 2.907424 1.3119570 1.711627 4 8.7 0.456789 0.85266 0.1525244 1.654938 2.059147 2.246170 2.90742 1.3119570 1.711627 4 8.8 0.465789 0.85266 1.252424 1.654938 2.059147 2.246170 2.246170 1.3119570 1.711627 1.4 1.24676 1.64612 2.013906 2.241906 2.813658 3.244791 1.654951 1.4 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	8.2	0 486703	0 909940	1 337691	1 768393	2 200837	2 634355	3 068568	3 503253	3 938271	4 373533
8.5 0.468292 0.874646 0.861491 1.286174 1.698522 2.113559 2.529646 2.94417 3.161654 3.781222 4 8.6 0.662468 0.861491 1.268585 1.676444 2.085994 2.496780 2.907842 3.119570 3.711627 4 8.7 0.455789 0.852566 1.552424 1.654958 2.059147 2.464170 2.870269 3.72640 3.681370 4 8.8 0.451251 0.840044 1.216676 1.64012 2.012486 2.464170 2.870269 3.72640 3.681370 1.364521 4 8.9 0.445849 0.811706 1.221321 1.615504 2.007486 2.402396 2.492396 2.279744 3.194011 3.900374 3 9.0 0.445577 0.821613 1.208383 1.591686 1.082663 2.761382 2.761382 3.154570 3.545641 3 9.0 0.445577 0.821613 1.080383 1.591686 1.082663 2.761382 2.761382 3.15250 3.545641 3 9.1 0.415411 0.811806 1.191750 1.574268 1.558172 2.141479 2.729248 1.115470 3.50217 3 9.2 0.410406 0.002215 1.17550 1.555122 1.14471 2.151508 2.06141 1.077616 3.455454 3 9.3 0.425498 0.792852 1.165593 3.58641 1.11622 2.887400 2.663872 3.040713 3.417917 3 9.4 0.420701 0.787708 1.150014 1.518778 1.889080 2.260361 2.652291 3.040476 3.177508 3.797618 3.947618 3.948669 3.777508 3.797618 3.948669 3.777508 3.797618 3.948669 3.777508 3.797618 3.948669 3.777508 3.797618 3.948669 3.777508 3.797618 3.948669 3.777777 3.79771 3.79771 3.79777 3.79771	8.3	0 480403	0 897858	1 319708	1 744466	2 170949	2 598496	3 026736	3 455446	3 884488	4 313772
8.6 0.462468 0.864493 1.268585 1.676444 2.085996 2.496579 2.907842 3.1319570 3.711627 4.8 8.7 0.455799 0.855056 1.554244 1.654988 2.059147 2.464579 2.4702789 3.776101 3.6831201 4.8 8.8 0.451251 0.842034 1.216676 1.614012 2.012986 2.412986 2.813658 3.24791 3.66251 4.8 8.9 0.445549 0.811706 1.221231 1.614012 2.012986 2.412986 2.813658 3.24791 3.66251 4.8 9.0 0.445577 0.821673 1.206555 1.515466 1.982672 2.712579 2.761782 1.154250 3.543641 3.9 9.1 0.440577 0.821673 1.206555 1.515466 1.982672 2.712579 2.761782 1.154250 3.543641 3.9 9.2 0.434046 0.002215 1.177501 1.5555122 1.414711 2.115094 2.096141 1.077616 3.459454 3.9 9.3 0.425498 0.792852 1.163591 1.5555122 1.414711 2.115094 2.606181 3.006171 3.417917 3.450017 3.9 9.4 0.420701 0.781708 1.150014 1.518778 1.880980 2.207400 2.663812 3.006711 3.417917 3.47917 3.9 9.5 0.416016 0.774777 1.817930 1.867608 2.278157 2.011492 2.906471 3.177738 3.9 9.5 0.416016 0.774777 1.4819300 1.867608 1.80068 2.278157 2.011492 2.906471 3.177737 3.9 9.7 0.466956 0.755522 1.111178 1.845508 2.182969 2.542017 2.901507 3.161141 3.9 9.8 0.402575 0.749184 1.098765 4.50660 1.800627 2.158270 2.455757 2.905197 3.161314 3.9 9.9 0.198288 0.741011 0.86666 1.40660 1.800627 2.158270 2.455757 2.865862 2.248175 3.15999 3.159998 3.10099894 0.313075 0.748818 4.48864 1.764311 2.115096 2.14270 2.485512 2.865862 2.248157 3.0009778 3.159998 3.1599											4 255626
8.7 0.456789 0.852626 1352424 1654958 2.059147 2.464710 2.47056 3.276610 3.681320 4											4 199031
8.8 0.451251 0.842034 1.216676 1.014012 2.012986 2.412986 2.412986 2.707974 1.194011 3.590374 3.9491 9.96 0.440577 0.821631 1.216.0531 1.591686 1.982.031 2.702986 2.707974 1.194011 3.590374 3.941 0.415811 0.811806 1.91750 5.754268 1.982.031 2.72150 2.761182 3.154250 3.545641 3.91 0.415811 0.811806 1.91750 5.754268 1.982.031 2.72150 2.761182 3.154250 3.545641 3.93 0.425498 0.792852 1.163591 1.5551322 1.914713 2.72948 1.115470 3.502017 3.94 0.425498 0.792852 1.163591 1.5551322 1.914713 2.2151008 2.606141 0.07616 3.459454 3.93 0.425498 0.792852 1.163591 1.516831 1.911622 2.287400 2.605812 0.40660 1.777568 3.95 0.416016 0.774777 1.16752 1.501150 1.867068 2.210576 2.601291 0.004660 1.777568 3.95 0.416016 0.774777 1.16752 1.501150 1.867068 2.210576 2.571400 2.95095 7.99909 3.98 0.02575 0.737522 1.11113 1.467104 1.824558 2.182969 2.452017 2.915073 7.361314 3.99 0.98288 0.402575 0.739184 0.98756 4.50660 1.804072 2.154270 2.485213 2.485213 2.885213 3.18290 3.0198288 0.741031 0.86668 1.434584 1.781956 2.134270 2.485213 2.885213 3.18290 3.019828 0.741031 0.86668 1.434584 1.781956 2.134270 2.485213 2.885213 3.18290 3.019818 0.02575 0.73918 0.080023 0.841177 1.006748 1.790097 0.873798 0.949918 1.090987 0.090975 0.17978 0.255555 0.0500023 0.841177 1.006748 0.734979 0.521589 0.521589 0.55559 0.056638 0.090974 0.877198 0.048918 1.006748 0.006975 0.076773 0.006636 0.000023 0.0000573 0.046650 0.0000573 0.046650 0.0000573 0.046650 0.0000573 0.											4 143925
89											4 090250
9.0 0 440577 0 821613 1 206551 1591686 1982621 2 172570 2 761182 3 154250 3 345643 3 9.1 0 415431 0 811806 191750 1574268 1988737 2 34479 2 729248 3 115470 3 50207 3 1 9.2 0 430406 0 802215 1 177501 1 555122 1 914711 2 315098 2 6 6141 3 077616 3 459454 3 9.3 0 425498 0 792852 1 163593 1 516831 1 911622 2 287400 2 66382 3 040713 3 417917 3 1 75768 3 1 9.4 0 420701 0 783708 1 150014 5 158778 1 1880980 2 266161 2 63221 3 040669 3 377568 1 3 9.5 0 416016 0 774777 1 116752 1 501150 1 887068 2 233957 2 601492 2 969473 3 137773 3 9.5 0 416016 0 774777 1 116752 1 501150 1 887068 2 233957 2 601492 2 969473 3 137773 3 9.5 0 416016 0 774777 1 116752 1 501150 1 887068 2 233957 2 601492 2 969473 3 137773 3 9.7 0 406956 0 757522 1 1111138 1 467104 1 824558 2 182969 2 542017 2 901507 3 261314 3 9.8 0 402575 0 749144 1 098765 1 4516600 1 804027 2 154341 2 513292 2 86862 1 224387 3 3 9.9 0 398288 0 741031 1 086668 1 434584 1 784956 2 114270 2 488213 2 81694 3 188290 3 10 0 1394094 0 773057 1 074838 1 418864 1 764331 2 110731 2 2457757 2 805219 3 152994 3 10 0 1394094 0 773057 1 074838 1 418864 1 764331 2 110731 2 2457757 2 805219 3 152994 3 10 0 128154 0 255224 0 341869 0 448623 0 555556 0 662688 0 769974 0 877398 0 984938 1 4 0 0 095975 0 175978 0 255555 0 313050 0 0 44605 0 404400 0 574192 0 65406 0 743000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0											4 037951
9.1 0 435431 0 811866 1 191750 1 574268 1 958372 2 143479 2 729248 3 115470 1 502017 3 9.2 0 430406 0 802215 1 175701 1 555522 1 914713 2 131089 2 9.6414 1 307766 1 436954 3 8 9.3 0 425498 0 792852 1 163591 1 536871 1 911622 2 287300 2 663872 1 000711 3 417917 3 1 9.4 0 420701 0 778778 1 150014 1 5187778 1 889000 2 2661872 2 60221 1 000609 3 177368 3 1 150016 0 774777 1 116752 1 501150 1 867068 2 234757 2 601492 2 966471 3 137778 3 1 9.5 0 416016 0 774777 1 116752 1 501150 1 867068 2 234757 2 601492 2 966471 3 137777 3 1 9.6 0 411413 0 766051 1 123797 1 483930 1 845586 2 208167 2 571409 2 935095 1 299099 3 1 9.8 0 402575 0 749184 1 098765 1 450660 1 804027 2 158141 2 513292 2 868682 1 224887 3 1 9.8 0 402578 0 749184 1 098765 1 450660 1 804027 2 158141 2 513292 2 868682 1 224887 3 1 10 0 394094 0 733057 1 074838 1 418864 1 764331 2 110731 2 457577 2 805219 3 152994 3 1 0 0 394094 0 733057 1 074838 1 418864 1 764331 2 110731 2 457757 2 805219 3 152994 3 1 0 0 128154 0 235227 0 51765 0 680023 0 843177 1 1066734 1 170606 1 34725 1 499038 1 1 40 0 095975 0 175978 0 255555 0 135509 0 448623 0 555556 0 662688 0 769974 0 887798 0 988498 1 4 0 095975 0 175978 0 255555 0 135509 0 448652 0 494450 0 0574192 0 654065 0 734009 0 6 0 05976 0 117104 0 169923 0 222676 0 275439 0 138280 0 047519 0 054586 0 076728 0 140616 0 204094 0 267518 0 030845 0 048457 0 048459 0 054519 0 054509 0 004599 0 004259 0 007804 0 113149 0 148227 0 183288 0 245344 0 252581 0 058665 0 0067628 0 007750 0 018155 0 103154 0 104827 0 104848 0 025597 0 054866 0 005979 0 018556 0 007674 0 010023 0 104556 0 002595 0 003083 0 00077 0 066666 0 002388 0 002597 0 005880 0 000779 0 0008770 0 0127324 0 166810 0 026684 0 002599 0 002459 0 007804 0 101494 0 005809 0 002559 0 007804 0 101494 0 005809 0 002559 0 007804 0 101494 0 005809 0 002559 0 007804 0 101494 0 005809 0 002559 0 007879 0 006666 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 000580 0 0005											3 986976 3 937275
9.2 0 430406 0 802215 1177501 1555322 131508 2 696141 3 077616 1459458 3 3 0.34988 0 79252 1165593 153681 1911622 2287400 2 6603812 3 1040713 1417917 3 9.4 0 420703 0 783708 1150014 1518778 1889080 2 260361 2 632291 3 004669 3 377368 3 9.5 0 416016 0 774777 1 136752 1501150 1 1867068 2 233579 2 601492 2 969473 3 377736 3 9.6 0 414015 0 7660515 1123797 1 448930 1 1845566 2 238167 2 571409 2 935005 3 296090 3 9.7 0 406956 0 757522 1 111118 1 467104 1 824558 2 182969 2 542017 2 901507 3 261314 3 9.8 0 402575 0 749184 1 098705 1 4450600 1 1804027 2 151843 2 151292 2 8686682 1 224187 3 9.9 0 198288 0 741031 1 086668 1 434584 178395 2 1318290 2 485213 2 835594 3 188290 3 10 0 394094 0 773057 1 074818 1 148664 1 1764331 2 110731 2 2485737 2 2805219 3 1182994 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2											3 888801
9.3 0.425498 0.792852 1.163593 1.516831 1.911622 2.287400 2.663812 3.040713 3.1417917 3. 9.4 0.420703 0.783708 1.150014 1.518778 1.889080 2.260361 2.612291 3.004669 3.377368 3. 9.5 0.416016 0.774777 1.16752 1.501150 1.867068 2.283957 2.601492 2.969473 3.337773 3. 9.6 0.414155 0.7666151 1.123797 1.483930 1.845566 2.08167 2.571409 2.935005 3.299099 3. 9.7 0.406956 0.757522 1.111138 1.467104 1.824558 2.08167 2.571409 2.935005 3.299099 3. 9.8 0.402575 0.749184 1.098705 1.450600 1.804027 2.158343 2.513292 2.866862 1.22487 3. 9.9 0.398288 0.740131 1.086668 1.436540 1.784331 2.110731 2.457575 2.805219 3.185294 3. 10 0.394094 0.733057 1.074838 1.418864 1.76431 2.110731 2.457575 2.805219 3.152994 3. 20 0.197016 0.355227 0.517365 0.680023 0.843177 1.006734 1.170606 1.334725 1.499038 1. 30 0.128154 0.235224 0.341869 0.448623 0.555564 0.662688 0.769974 0.877198 0.984938 1.49903											3 841509
9.4 0.420703 0.784708 1.150014 1.518778 1.889080 2.260161 2.612291 1.004660 3.177368 3.1 9.5 0.416016 0.774777 1.136752 1.501150 1.867068 2.218967 2.601492 2.960477 3.137773 3.9 9.6 0.411435 0.766051 1.123797 1.483930 1.845566 2.208167 2.571409 2.935095 3.299099 3. 9.7 0.406956 0.7575522 1.111138 1.467104 1.824558 2.182969 2.542017 2.901507 3.261314 3. 9.8 0.402575 0.749184 1.008765 1.458660 1.804027 2.182409 2.542017 2.901507 3.261314 3. 9.9 0.198288 0.741031 1.086668 1.434584 1.783956 2.118270 2.485213 2.85694 3.188290 3. 10 0.194094 0.733057 1.074838 1.418864 1.76433 1.2110731 2.457757 2.805219 3.152994 3. 20 0.193016 0.355227 0.517365 0.680023 0.843177 1.006734 1.176666 1.334725 1.499038 1. 3.0 0.128154 0.235224 0.341869 0.448623 0.555556 0.662688 0.766974 0.877398 0.984938 1. 4.0 0.095975 0.175978 0.255535 0.335079 0.414695 0.494400 0.574192 0.654165 0.734009 0. 5.0 0.076728 0.140616 0.204094 0.222676 0.275429 0.378604 0.386023 0.371402 0.45400 0.574192 0.654165 0.734009 0. 5.0 0.076728 0.140616 0.204094 0.222676 0.275429 0.235882 0.281044 0.362223 0.371422 0.416641 0.406799 0.004773 0.100335 0.145567 0.190729 0.235882 0.281044 0.362223 0.371422 0.416641 0.406799 0.008779 0.054737 0.100335 0.145567 0.190729 0.235882 0.281044 0.362223 0.371422 0.416641 0.008779 0.008779 0.075803 0.008770 0.127334 0.166810 0.206280 0.08380 0.047919 0.087770 0.127334 0.166810 0.206280 0.08380 0.038329 0.070955 0.10815 0.13337 0.066636 0.082380 0.09817 0.054886 0.325569 0.090599 0.0042591 0.075640 0.008383 0.050877 0.066636 0.082380 0.09817 0.054880 0.056959 0.007580 0.008770 0.066636 0.082380 0.09817 0.054880 0.05597 0.064676 0.072627 0.004491 0.008779 0.017540 0.005481 0.000888 0.004799 0.009759 0.017540 0.002481 0.002481 0.003597 0.005481 0.											3 795356
9.5 0.416016 0774777 1136752 1501150 1867068 2231577 2601492 2.964473 3.377773 3. 9.6 0.411475 0.766651 1.127397 1.483930 1.845566 2.281870 2.971699 2.935095 3.290999 3. 9.7 0.406956 0.757522 1.111138 1.467104 1.824558 2.182969 2.542017 2.901507 3.261314 3. 9.8 0.402575 0.749184 1.098765 1.450660 1.804027 2.158143 2.513292 2.868682 3.224187 3. 9.9 0.198288 0.741031 1.086668 1.451660 1.804027 2.158143 2.513292 2.868682 3.224187 3. 10 0.194094 0.733057 1.074838 1.418864 1.76431 2.110731 2.457757 2.805219 3.152994 3. 10 0.194094 0.733057 1.074838 1.418864 1.76431 2.110731 2.457757 2.805219 3.152994 3. 10 0.191016 0.0355227 0.517365 0.680023 0.843177 1.006734 1.170606 1.334725 1.499918 1. 13 0.0128154 0.235224 0.341869 0.448623 0.555564 0.66288 0.769974 0.877398 0.984918 1. 14 0.095975 0.175978 0.255535 0.335079 0.414695 0.494400 0.574192 0.654065 0.734009 0.50600 0.067628 0.140616 0.204094 0.267518 0.310000 0.944457 0.457999 0.521589 0.585225 0. 0.0076728 0.140616 0.204094 0.267518 0.310000 0.944457 0.457999 0.521589 0.585225 0. 0.0076728 0.140616 0.169203 0.222676 0.275429 0.328204 0.381009 0.433844 0.486709 0. 0.053916 0.017104 0.169923 0.222676 0.275429 0.328204 0.381009 0.433844 0.486709 0. 0.0047919 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.24553 0.285236 0.324732 0.316424 0. 0.0038329 0.070195 0.101815 0.133171 0.164913 0.169431 0.169423 0.228866 0.323579 0.201079 0. 0.0038729 0.070195 0.101815 0.133171 0.164913 0.169431 0.169431 0.22886 0.258341 0.288486 0.323569 0.001973 0.003882 0.007195 0.011815 0.013311 0.041810 0.093914 0.095917 0.005877 0.066636 0.082310 0.098117 0.113850 0.125583 0.145315 0.0038117 0.014180 0.009517 0.005879 0.005879 0.007195 0.014813 0.003484 0.045910 0.005817 0.005879 0.007185 0.003814 0.002048 0.002048 0.002048 0.003517 0.006662 0.002351 0.008135 0.003817 0.006662 0.002351 0.008135 0.003817 0.006662 0.002351 0.003051 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003518 0.003519 0.003518 0.003518 0.003518 0.003517 0.006662 0.008251 0.000879 0.003518 0.003518											3 750303
9.7 0.406956 0.755222 1.11118 1.467104 1.824558 2.182969 2.542017 2.901507 3.261314 3 9.8 0.402575 0.749184 1.098765 1.450660 1.804027 2.158141 2.513292 2.868682 3.224187 3 9.9 0.398288 0.741031 1.086668 1.434584 1.78395 2.114270 2.485213 2.816594 3.188290 3 10 0.394094 0.733057 1.074838 1.418864 1.764331 2.110731 2.457757 2.805219 3.152994 3 20 0.191016 0.355227 0.517365 0.680023 0.84317 1.006734 1.170606 1.334725 1.499018 1 30 0.128154 0.235224 0.341869 0.448623 0.555564 0.662688 0.769974 0.877398 0.984918 1 40 0.095975 0.175578 0.255535 0.335079 0.414695 0.494800 0.574192 0.654065 0.734009 0.0076728 0.140616 0.204094 0.267518 0.330955 0.394457 0.457999 0.521589 0.885225 0.0076728 0.140616 0.204094 0.267518 0.330955 0.394457 0.457999 0.521589 0.885225 0.0076728 0.170104 0.169923 0.222676 0.275429 0.328044 0.386223 0.33104 0.4886709 0.094773 0.00335 0.145567 0.190729 0.235882 0.281044 0.326223 0.371422 0.416641 0.80 0.9054773 0.100335 0.145567 0.190729 0.235882 0.281044 0.326223 0.371422 0.416641 0.90 0.90 0.042591 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.245753 0.285236 0.324712 0.436424 0.90 0.902591 0.078004 0.113149 0.148227 0.181288 0.228343 0.28343 0.288486 0.323569 0.90 0.042591 0.078004 0.113149 0.148227 0.181288 0.228348 0.228343 0.288486 0.323569 0.00 0.002773 0.023387 0.033915 0.044417 0.054910 0.065397 0.056907 0.056907 0.056907 0.075803 0.058077 0.066636 0.082380 0.098117 0.113850 0.125958 0.145315 0.00000000000000000000000000000000000	9.5	0 416016	0 774777	1 136752		1 867068					3 706309
9.8 0.402575 0.749184 1.098765 1.450660 1.804027 2.158141 2.513292 2.868682 3.224187 3. 9.9 0.398288 0.741031 1.086668 1.434584 1.784313 2.110731 2.457757 2.805219 3.152994 3. 10 0.394094 0.733057 1.074838 1.418864 1.764331 2.110731 2.457757 2.805219 3.152994 3. 20 0.1931016 0.355227 0.517365 0.680023 0.843177 1.006734 1.170606 1.334725 1.499038 1. 30 0.128154 0.253224 0.341869 0.448623 0.555546 0.662688 0.769974 0.877398 0.984938 1. 40 0.095975 0.175978 0.255535 0.335079 0.414695 0.494400 0.574192 0.654065 0.734009 0. 50 0.076728 0.140616 0.204094 0.2675318 0.330965 0.394457 0.457999 0.521589 0.885225 0. 60 0.059316 0.117104 0.169923 0.222676 0.275429 0.318009 0.438630 0.355546 0.005316 0.005316 0.117104 0.169923 0.222676 0.275429 0.381009 0.43844 0.486709 0. 70 0.054773 0.100335 0.145567 0.190729 0.215882 0.281044 0.381009 0.431844 0.486709 0. 80 0.047919 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.245753 0.285236 0.374722 0.416641 0. 80 0.047919 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.245753 0.285236 0.324732 0.346242 0. 90 0.04591 0.078004 0.113144 0.148227 0.183288 0.218348 0.253431 0.288486 0.323569 0. 100 0.038329 0.070195 0.101815 0.113377 0.164913 0.196448 0.227986 0.259529 0.291079 0. 200 0.019160 0.035083 0.050877 0.066636 0.062380 0.098117 0.113850 0.125838 0.145315 0.0 0.005640 0.010331 0.020348 0.026648 0.032934 0.098117 0.113850 0.125883 0.145315 0.0 0.005640 0.010331 0.020348 0.026648 0.032934 0.035234 0.035523 0.085182 0.086865 0.096847 0. 0.005640 0.005640 0.014031 0.020348 0.026648 0.032934 0.035234 0.035523 0.03315 0.044417 0.054910 0.065397 0.075882 0.086665 0.096847 0.000662 0.000548 0.000662 0.000333 0.000667 0.000439 0.0005690 0.000457 0.000534 0.0000587 0.000662 0.002334 0.000597 0.006467 0.000599 0.000564 0.014031 0.020348 0.026648 0.032934 0.035234 0.035234 0.035235 0.003381 0.036310 0.000662 0.000332 0.000662 0.000333 0.000662 0.000333 0.0006662 0.000235 0.0006662 0.000235 0.000355 0.000355 0.000358 0.000587 0.000665 0.000235 0.000659 0.000355 0.000381 0.000665 0.000335 0.000666 0.000354 0.0	96	0.411435	0.766051	1 123797	1 483930	1 845566	2 208167	2 571409	2 935095	3 299099	3 663338
9.9 0 398288 0 74103											3 621354
10											3 580325
20 0 193016 0 355227 0 517765 0 680023 0 843177 1 0106734 1170600 1 334725 1 499938 1 1 30 0128154 0 2355224 0 341869 0 448623 0 555564 0 662688 0 769974 0 877398 0 948938 1 4 0 095975 0 175978 0 255535 0 335079 0 414600 0 574192 0 6554065 0 734009 0 5 0 076728 0 140616 0 204094 0 267518 0 310965 0 394457 0 457999 0 521589 0 585225 0 0 076728 0 140616 0 204094 0 267518 0 310965 0 394457 0 457999 0 521589 0 585225 0 0 076728 0 1017104 0 169923 0 222676 0 275429 0 318109 0 431844 0 486709 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0											3 540218
30 0 128154 0 235224 0 341869 0 448623 0 555564 0 66268K 0 769974 0 87779K 0 98491K 1 40 0 095975 0 17597K 0 255535 0 335079 0 414695 0 494400 0 574192 0 654065 0 734009 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0											3 501001
40 0 095975 0 175978 0 255535 0 335079 0 414695 0 494400 0 574192 0 654065 0 734009 0 60 0 75728 0 140616 0 204094 0 267518 0 330965 0 394457 0 457999 0 521589 0 585225 0 60 0 063916 0 117104 0 169923 0 222676 0 275429 0 1326204 0 381009 0 431844 0 486709 0 70 0 054773 0 100335 0 145567 0 190729 0 215882 0 281044 0 336009 0 431844 0 486709 0 0 0 004791 0 0087770 0 127324 0 166810 0 200260 0 245575 0 285236 0 337422 0 416641 0 0 0 004799 0 0087770 0 127324 0 166810 0 200260 0 245575 0 285236 0 337472 0 346242 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0											1 663505 1 092575
50 0 076728 0 140616 0 204094 0 267518 0 310965 0 394457 0 457999 0 521589 0 585225 0 60 0 063916 0 117104 0 169923 0 222676 0 275429 0 128204 0 381009 0 437844 0 486709 0 70 0 054773 0 100335 0 145567 0 190729 0 21882 0 281044 0 326221 0 371422 0 416641 0 80 0 047919 0 087770 0 127324 0 166810 0 206280 0 245753 0 288236 0 324712 0 164242 0 90 0 442591 0 078004 0 113149 0 148227 0 181348 0 223546 0 324712 0 164848 0 323569 0 100 0 038329 0 079195 0 101815 0 133377 0 164911 0 196448 0 227986 0 259529 0 291079 0 200 0 19160 0 035083 0 050877 0 066366 0 082380 0 098117 0 113850 0 129583 0 145315											0 814016
60											0 648903
70 0.054773 0.100335 0.145567 0.190729 0.23582 0.281044 0.326221 0.371422 0.416641 0.080 0.047919 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.245753 0.285236 0.324732 0.364242 0.0008291 0.078004 0.113149 0.148227 0.183288 0.218348 0.253343 0.288486 0.323569 0.000 0.0008329 0.078004 0.113149 0.148227 0.183288 0.218348 0.25343 0.288486 0.323569 0.000 0.0019160 0.035083 0.050877 0.056636 0.082380 0.098170 0.10815 0.133373 0.164913 0.196448 0.227986 0.259529 0.291079 0.0019160 0.035083 0.050877 0.056636 0.082380 0.082380 0.098170 0.113850 0.129583 0.145315 0.000 0.0019160 0.035083 0.050877 0.056636 0.082380 0.098170 0.113850 0.129583 0.145315 0.000 0.0019160 0.005599 0.018410 0.058977 0.056636 0.082380 0.098187 0.108580 0.129583 0.145315 0.000 0.0008173 0.023387 0.033915 0.044417 0.054910 0.065397 0.075882 0.086365 0.096847 0.00009579 0.017540 0.022435 0.0133311 0.041180 0.0499044 0.056907 0.064767 0.072627 0.00009579 0.00009579 0.017540 0.020448 0.026648 0.032943 0.039234 0.045523 0.051812 0.058099 0.000000000000000000000000000000000											0.539602
80 0.047919 0.087770 0.127324 0.166810 0.206280 0.245755 0.285236 0.324732 0.344242 0 90 0.042591 0.078004 0.113149 0.148227 0.181288 0.218348 0.253413 0.288486 0.323569 0 100 0.038329 0.070195 0.101815 0.113377 0.164317 0.194484 0.223486 0.259529 0.291079 0 200 0.019160 0.035083 0.058077 0.066636 0.082380 0.098117 0.113850 0.12588 0.186565 0.096847 0 400 0.009579 0.017540 0.025435 0.033111 0.04118 0.049044 0.056907 0.064767 0.076627 0.07664 0.01031 0.020348 0.026648 0.012943 0.03925 0.04118 0.044767 0.067667 0.064767 0.0762627 0.058007 0.064767 0.0762627 0.058009 0.005386 0.011693 0.016956 0.022207 0.027452 0.032694 0.037935 0.04									0 371422		0 461880
100	80	0 047919	0 087770	0 127324	0 166810	0 206280	0 245753	0 285236	0 324732		0 403765
200 0 191400 0 035083 0 050877 0 066636 0 082380 0 098117 0 113850 0 129583 0 145315 0 300 0 12773 0 23387 0 033915 0 044417 0 054910 0 065397 0 075882 0 086165 0 096847 0 400 0 009579 0 017540 0 022543 0 033311 0 041180 0 049044 0 056907 0 064767 0 072627 0 500 0 007664 0 14031 0 020148 0 026648 0 012943 0 03224 0 045521 0 051812 0 058099 0 600 0 06366 0 011693 0 016956 0 022207 0 027452 0 032264 0 037935 0 043175 0 048144 0 700 0 005474 0 010022 0 014534 0 019034 0 023509 0 032266 0 022707 0 27452 0 032516 0 037007 0 041447 0 800 0 04790 0 008770 0 012717 0 016655 0 020589 0 024520 0 022841 0 032381	90			0 113149		0 183288	0 218348		0 288486	0 323569	0 358662
300 0.012773 0.023387 0.033915 0.044417 0.054910 0.065397 0.075882 0.086465 0.096847 0.090579 0.017540 0.025435 0.033311 0.041180 0.049044 0.056907 0.064767 0.072627 0.005600 0.007664 0.014031 0.020448 0.026648 0.012943 0.039234 0.045523 0.051812 0.058099 0.005600 0.006386 0.011693 0.016956 0.022207 0.027452 0.032549 0.037935 0.043175 0.048144 0.005674 0.010022 0.014534 0.019034 0.025394 0.032516 0.037007 0.041497 0.005674 0.010022 0.014534 0.019034 0.025390 0.028024 0.032516 0.037007 0.041497 0.08600 0.004790 0.008770 0.012717 0.016655 0.020589 0.024520 0.028451 0.032381 0.036310 0.028024 0.003251 0.007095 0.007095 0.01304 0.014804 0.018301 0.021796 0.025290 0.028783 0.032275 0.007095 0.007095 0.011304 0.014804 0.018301 0.021796 0.025290 0.028783 0.032275 0.00000 0.00332 0.007016 0.010174 0.013324 0.016471 0.019616 0.022760 0.025904 0.029047 0.029047 0.029047 0.00000 0.001916 0.003508 0.005087 0.006662 0.008235 0.009808 0.011380 0.012952 0.014523 0.00000 0.001277 0.002339 0.003391 0.004441 0.005490 0.006590 0.006590 0.006690 0.007660 0.006590 0.006590 0.007660 0.007660 0.006590 0.007660 0.006590 0.007660 0.006590 0.007660 0.006590 0.006590 0.006590 0.007660 0.006590 0.006590 0.006590 0.007660 0.006590											0 322637
400 0.009579 0.017540 0.025435 0.013311 0.041180 0.049044 0.056907 0.064767 0.072627 0.500 0.007664 0.014031 0.020148 0.026648 0.012943 0.032934 0.045523 0.051812 0.058099 0.00580 0.006386 0.011693 0.016456 0.022207 0.027452 0.032694 0.037935 0.043175 0.048414 0.05800 0.004790 0.00627 0.014534 0.019034 0.023530 0.028024 0.032516 0.037007 0.041497 0.04655 0.020802 0.028451 0.032318 0.036310 0.00802 0.004790 0.008770 0.012717 0.016655 0.020580 0.024520 0.028451 0.033218 0.036310 0.00900 0.004257 0.007795 0.011304 0.014804 0.018301 0.021796 0.025290 0.028783 0.032275 0.009332 0.007016 0.010174 0.013324 0.016471 0.019516 0.022500 0.028783 0.032275 0.009332 0.007016 0.010174 0.013324 0.016471 0.019516 0.022500 0.028783 0.032275 0.009808 0.001370 0.001277 0.00339 0.003391 0.004441 0.005490 0.006539 0.007587 0.006559 0.007587 0.006662 0.008444 0.005490 0.006539 0.007587 0.008615 0.009802 0.0007587 0.000359 0.000359 0.000359 0.0005890 0.0007587 0.006615 0.002549 0.003249 0.003249 0.000392 0.004552 0.005181 0.005809 0.00766 0.001764 0.000359 0.000766 0.001764 0.000359 0.000589											0 161047
500 0.007664 0.014031 0.020348 0.026648 0.012943 0.032943 0.045523 0.051812 0.058099 0.006600 0.006386 0.011693 0.016956 0.022207 0.027452 0.032694 0.037935 0.043755 0.048144 0.005476 0.005474 0.010022 0.014534 0.019034 0.023530 0.028024 0.032316 0.037007 0.041497 0.006600 0.004579 0.001717 0.016655 0.020589 0.024520 0.028451 0.032381 0.032381 0.036310 0.006600 0.004257 0.007795 0.011304 0.014804 0.018038 0.021596 0.022560 0.022590 0.02883 0.022575 0.007900 0.004257 0.007795 0.011044 0.014804 0.018301 0.021796 0.022590 0.02883 0.022904 0.022904 0.029047 0.006600 0.006383 0.005087 0.006662 0.008235 0.009808 0.011380 0.012576 0.025904 0.005908 0.001587 0.00865 0.005808 0.005087 0.006662 0.008235 0.009808 0.011580 0.012587 0.008682 0.005804 0.005908 0.001574 0.002541 0.003331 0.004118 0.004904 0.005690 0.005690 0.005690 0.007662 0.005809 0.006590 0.0065											0 107329
											0 080487
700 0 005474 0 010022 0 014534 0 019034 0 023510 0 028024 0 032516 0 037007 0 041497 0 800 0 004790 0 008770 0 012771 0 016655 0 020589 0 024520 0 028451 0 032381 0 036310 0 900 0 04257 0 007795 0 011304 0 014804 0 101801 0 022590 0 028783 0 032275 0 1000 0 03832 0 007016 0 010174 0 013324 0 016471 0 019616 0 022760 0 025904 0 029047 0 2000 0 001916 0 003380 0 005087 0 006662 0 008215 0 009808 0 011380 0 012952 0 014521 0 3000 0 001277 0 003339 0 003391 0 003441 0 003313 0 004118 0 00599 0 007587 0 008655 0 0095862 0 4000 0 000558 0 001754 0 002541 0 003313 0 004118 0 004590 0 005590 0 005590 0 005690 0 007662											0.064386
800 0.004790 0.008770 0.012717 0.016655 0.02088 0.024520 0.028451 0.032381 0.032381 0.036310 0 900 0.004257 0.007795 0.011304 0.014804 0.018301 0.021796 0.025290 0.028783 0.032975 0 1000 0.003832 0.007016 0.010174 0.013324 0.016471 0.019616 0.022760 0.025904 0.0229047 0 2000 0.001916 0.003508 0.005087 0.006662 0.008235 0.009808 0.011380 0.012952 0.014523 0 3000 0.001277 0.003339 0.003319 0.004414 0.005988 0.01587 0.006813 0.005682 0 4000 0.000958 0.001754 0.002541 0.003313 0.004118 0.004904 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690 0.005690											0 053653
900 0 004257 0 007795 0 011304 0 014804 0 018301 0 021796 0 025290 0 028783 0 032275 0 0 1000 0 003832 0 007016 0 010174 0 013324 0 016471 0 019616 0 022760 0 025904 0 029047 0 029047 0 00000 0 001916 0 0003508 0 005087 0 006662 0 000235 0 0009808 0 011380 0 012952 0 014523 0 0 0 00000 0 0000000000000000000											0 040239
1000 0.003832 0.007016 0.010174 0.013324 0.016471 0.019416 0.022760 0.022904 0.022904 0.029047 0.02000 0.001916 0.003508 0.005087 0.006662 0.008235 0.009808 0.01180 0.012952 0.014523 0.003000 0.001277 0.002339 0.003391 0.004441 0.005490 0.006539 0.007587 0.008635 0.009682 0.004404 0.005490 0.006539 0.007587 0.008635 0.009682 0.00569 0.007584 0.002541 0.003331 0.004118 0.004904 0.005690 0.005690 0.005690 0.007662 0.005690 0.00766 0.001403 0.002541 0.003331 0.004118 0.004904 0.005690 0.005690 0.007662 0.005690 0.007660 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.005690 0.007662 0.005690 0.0056											0 035767
2000 0 001916 0 003508 0 005087 0 006662 0 008235 0 009808 0 011380 0 012952 0 014521 0 3000 0 001277 0 002339 0 003391 0 004441 0 005490 0 006539 0 007587 0 008535 0 009682 0 4000 0 000958 0 001754 0 002541 0 003311 0 004118 0 008909 0 007660 0 007660 0 000766 0 001491 0 002665 0 003294 0 003291 0 004552 0 005181 0 008809 0 6000 0 000639 0 00169 0 001696 0 002261 0 002740 0 0013791 0 001317 0 008481 0 7000 0 000477 0 001695 0 001493 0 001493 0 001903 0 002531 0 001841 0 001841 0 8000 0 000477 0 001082 0 001453 0 001903 0 002531 0 002802 0 003251 0 001701 0 004150 900 0 000426 0 000780 0 001665 0 002599 0 002452 <											0 032190
3000 0 001277 0 002339 0 003391 0 004441 0 005490 0 006539 0 007587 0 008635 0 009682 0 004404 0 005490 0 006539 0 007587 0 008635 0 009682 0 005490 0 000958 0 001754 0 002541 0 003331 0 004118 0 004904 0 005690 0 005690 0 00760 0 00760 0 000401 0 002635 0 0005690 0 000760 0 001401 0 002035 0 002650 0 000324 0 000452 0 001818 0 008809 0 0 000000 0 000639 0 001169 0 001696 0 002221 0 002745 0 003269 0 003793 0 004317 0 004841 0 0 0000000000000000000000000000000											0 016095
4000 0.000958 0.001754 0.002541 0.003331 0.004118 0.004904 0.005690 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.007662 0.005690 0.005762 0.005690 0.005762 0.005763 0.											0 010730
5000 0 000766 0 001403 0 002035 0 002665 0 003294 0 003923 0 004552 0 005181 0 005809 0 0 6000 0 000639 0 001169 0 001696 0 002221 0 00745 0 001369 0 003793 0 004317 0 004841 0 7000 0 000547 0 001002 0 001453 0 001903 0 002353 0 002802 0 003251 0 003251 0 003318 0 003238 0 003248 0 003238 0 003318 0 003268 0 003278 0 003278 0 003277 0 003272 0 001480 0 001830 0 002180 0 002529 0 002878 0 003227 0		0 000958	0 001754	0 002543	0 003331		0 004904	0 005690	0.005690	0 007262	0 008047
7000 0 000547 0 001002 0 001455 0 001903 0 002355 0 002802 0 003251 0 003701 0 004150 0 8000 0 000479 0 000877 0 001272 0 001665 0 002059 0 002452 0 002845 0 003231 0 003331 0 9000 0 000426 0 000780 0 001130 0 001480 0 001830 0 002180 0 002329 0 002878 0 003227								0 004552		0 005809	0 006438
8000 0 000479 0 000877 0 001272 0 001665 0 002059 0 002452 0 002845 0 003238 0 003631 0 9000 0 000426 0 000780 0 001130 0 001480 0 001830 0 002180 0 002529 0 002878 0 003227 0											0 005365
9000 0 000426 0 000780 0 001130 0 001480 0 001830 0 002180 0 002529 0 002878 0 003227 0 0											0 004599
											0 004024
											0 003577
	10000	0.000383	0 000/02	0.001017	0 001332	0 001647	0.001962	0 002276	0 002590	0 002905	0 003219

Примечание. Значения корней рассчитаны на программе МАРLE7.

Литература: Справочник..., 1979.

Вспомогательные функции

Функции учитывают влияние плановых или профильных границ. Условные обозначения приводятся в соответствующих разделах.

Вспомогательные функции к разделу 2

$$f^{I}(r,\rho,t)$$
 – для границы I рода, см. уравнение (2.2.4): $f^{I}(r,\rho,t) = W\left(\frac{r^{2}}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho^{2}}{4at}\right)$;

$$f^{II}(r,\rho,t)$$
 – для границы II рода, см. уравнение (2.2.22): $f^{II}(r,\rho,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + W\left(\frac{\rho^2}{4at}\right)$;

 $f^{I-I}ig(r,
ho,tig)$ – для параллельных границ I рода, см. уравнение (2.3.6):

$$f^{I-I}(r, \rho_i^j, t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{\left(\rho_i^j\right)^2}{4at}\right];$$

 $f^{I-II}\left(r,
ho_{i}^{\ j},t
ight)$ – для параллельных границ I и II рода, см. уравнение (2.3.45):

$$f^{I-II}\left(r,\rho_{i}^{j},t\right) = \left[W\left(\frac{r^{2}}{4at}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{\left(\rho_{i}^{j}\right)^{2}}{4at}\right) + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{\left(\rho_{i}^{j}\right)^{2}}{4at}\right)\right];$$

 $f^{II-II}ig(r,
ho_i^{\ j},tig)$ – для параллельных границ II рода, см. уравнение (2.3.28):

$$f^{II-II}(r, \rho_i^j, t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right];$$

 $f_A^{I-I}(r,\rho_j,t)$ – для пересекающихся границ I рода, см. уравнение (2.5.15):

$$f_A^{I-I}(r,\rho_j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right);$$

 $f_A^{I-II}ig(r,
ho_j,tig)$ — для пересекающихся границ I и II рода, см. уравнение (2.5.57):

$$f_A^{I-II}(r,\rho_j,t) = \sum_{j=0,2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \left[W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right) + W\left(\frac{\rho_{j+1}^2}{4at}\right) \right];$$

 $f_{A}^{II-II}ig(r,
ho_{j},tig)$ — для пересекающихся границ II рода, см. уравнение (2.5.34):

$$f_A^{II-II}(r,\rho_j,t) = W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n W\left(\frac{\rho_j^2}{4at}\right).$$

Вспомогательные функции к разделу 3

 $f_P^I(d, \rho, t, a)$ – для границы I рода, см. уравнение (3.2.6):

$$f_P^I(d, \rho, t, a) = \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} - \frac{1}{\rho} \operatorname{erfc} \frac{\rho}{2\sqrt{at}};$$

 $f_P^{II}(d, \rho, t, a)$ – для границы II рода, см. уравнение (3.2.30):

$$f_P^{II}(d,\rho,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \frac{1}{\rho}\operatorname{erfc}\frac{\rho}{2\sqrt{at}};$$

 $f_P^{I-I}\!\left(\!d, \!
ho_i^{\,j}, \! t, \! a \!
ight)$ – для параллельных границ I рода, см. уравнение (3.3.10):

$$f_P^{I-I}(d, \rho_i^j, t, a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_P^{I-II}ig(d,
ho_i^{\ I},t,aig)$ – для параллельных границ I и II рода, см. уравнение (3.3.58):

$$f_P^{I-II}(d,\rho_i^j,t,a) = \left[\frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2}\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}}\right];$$

 $f_P^{II-II}\!\left(\!d,\!
ho_i^{\,j},\!t,\!a\!
ight)$ – для параллельных границ II рода, см. уравнение (3.3.34):

$$f_P^{II-II}(d, \rho_i^j, t, a) = \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_i^j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_{PA}^{I-I}ig(d,
ho_j,t,aig)$ — для пересекающихся границ I рода, см. уравнение (3.6.12):

$$f_{PA}^{I-I}(d, \rho_j, t, a) = \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \frac{1}{\rho_j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_{PA}^{I-II}ig(d,
ho_j,t,aig)$ – для пересекающихся границ I и II рода, см. уравнение (3.6.16):

$$f_{PA}^{I-II}(d,\rho_j,t,a) = \sum_{j=0,2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \left(\frac{1}{\rho_j} \operatorname{erfc} \frac{\rho_j}{2\sqrt{at}} + \frac{1}{\rho_{j+1}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{j+1}}{2\sqrt{at}} \right);$$

 $f_{PA}^{II-II}(d, \rho_i, t, a)$ — для пересекающихся границ II рода, см. уравнение (3.6.14):

$$f_{PA}^{II-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\rho_i}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_{PQ}^{I-I}ig(d,
ho_j,t,aig)$ – для перпендикулярных границ I рода: см. уравнение (3.4.20):

$$f_{PQ}^{I-I}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{3} \frac{n_j}{\rho_j}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_{PQ}^{I-II}ig(d,
ho_{j},t,aig)$ — для перпендикулярных границ I и II рода, см. уравнение (3.4.74):

$$f_{PQ}^{I-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^{3} \frac{n_j}{\rho_i}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}};$$

 $f_{PQ}^{II-II}ig(d,
ho_j,t,aig)$ – для перпендикулярных границ II рода, см. уравнение (3.4.44):

$$f_{PQ}^{II-II}(d,\rho_j,t,a) = \frac{1}{d}\operatorname{erfc}\frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{\rho_i}\operatorname{erfc}\frac{\rho_j}{2\sqrt{at}}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 43

СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Коэффициенты перевода единиц коэффициента фильтрации и проводимости

	м/с	м/мин	м/ч		м ² /с	м ² /мин	м ² /ч
м/сут	86400	1440	24	м²/сут	86400	1440	24

Соотношения между единицами измерения проницаемости и коэффициента фильтрации:

 $1 \text{ m/cyt} \approx 1.18 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2;$

1 дарси ≈ 18.2 мейнцер = $0.987 \cdot 10^{-8}$ см² = $0.987 \cdot 10^{-12}$ м² = $1.062 \cdot 10^{-5}$ кв. фут;

 $10^{-12} \text{ м}^2 \approx 0.85 \text{ м/сут} \approx 1.013 \text{ дарси};$

1 мейнцер = 0.134 фут/сут = $4.72 \cdot 10^{-5}$ см/с ≈ 0.055 дарси (при ≈ 15.5 °C).

Соотношения между единицами давления:

 $1 \text{ arm} = 101325 \text{ H/m}^2 = 1013250 \text{ дин/см}^2 = 1.01325 \text{ бар} = 760 \text{ мм рт. ст.;}$

 $1 \Pi a = 1 H/M^2$;

 $1 \text{ H/m}^2 = 10 \text{ дин/cm}^2 = 10^{-5} \text{ бар} = 10^{-3} \text{ пз (пьеза)} = 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.} = 0.10197 \text{ кгс/ м}^2$

(килограмм-сила на кв. метр);

 $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ H/m}^2 = 10^6 \text{ дин/cm}^2 = 0.986923 \text{ атм.}$

Коэффициенты перевода единиц измерения расхода

	м ³ /с	м³/мин	м ³ /ч	м³/сут	л/с	л/мин	л/ч	л/сут
м ³ /сут	86400	1440	24	1	86.4	1.44	0.024	0.001
л/сут	86.4	1.44	0.024	0.001	86400	1440	24	1

 Π р и м е ч а н и е . 1 литр (л) = 10^{-3} м³.

Значения параметров для воды в зависимости от температуры (при давлении 1 атм)

• •				-	• • •		•
Температура, °С	0	4	20	40	60	80	100
Плотность, кг/м3	999.87	1000.00	998.23	992.25	983.2	971.8	958.4
Вязкость динамическая, сП	1.7865	1.5138	1.0019	0.6540	0.4674	0.3554	0.3829
Сжимаемость, 1/атм	52.5·10-6		49.1.10-6				

 Π р и м е ч а н и е . 1.5138 — значение вязкости для 5°C.

Соотношения между единицами вязкости:

динамическая вязкость, пуаз (Пз):

 $1 \text{ H·c/m}^2 = 1 \text{ кг/м·c} = 10 \text{ г/см·c} = 10 \text{ дин·c/см}^2 = 1000 \text{ сантипуаз (сПз);}$

кинематическая вязкость (отношение динамической вязкости к плотности), стокс (Ст): $1 \text{ m}^2/\text{c} = 10^4 \text{ cm}^2/\text{c} = 10^6 \text{ сантистокс (сСт)}.$

Ускорение свободного падения в зависимости от широты, м/с²

Широта, градус	0	15	30	45	60	90
Ускорение свободного падения, м/с ²	9.78048	9.78394	9.79338	9.80629	9.81924	9.83221

П р и м е ч а н и е . Стандартное ускорение свободного падения 9.80665 м/c^2 .

Английские единицы измерения

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Метрический эквивалент		
Галлон (американский)	галл (U.S.gal)	3.785 л		
Галлон (британский)	галл (Imp.gal)	4.5459 л		
Дарси		0.987·10 ⁻⁸ м²		
Дюйм	дюйм (inch)	2.54 см		
Дюйм ртутного столба		25.4 мм рт. ст. = 0.033421 атм		
Миля (статутная)		1.60934 км		
Морская миля		1.853 км		
Фунт	lb	0.45359 кг		
Фут	фут (ft)	0.30479 м		
Унция	oz	28.35 г		
Ярд	ярд (yd)	0.9144 м		

Математические постоянные:

 $\pi = 3.141592653589793238462643$;

e = 2.718281828459045235360287;

ln10 = 2.3025 85092 99404 56840 17991;

 $\lg e = 0.434294481903251827651128$;

$$\gamma = 0.5772\,15664\,90153\,28606\,06512\,$$
 – постоянная Эйлера $\gamma = \lim_{n \to \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n\right).$

Таблица математических функций, которые используются в Справочнике

Функция	Обозначение	Р ав енство	Эквивалент	Производная	u=0	u = -u
Синус	sin u			cosu	0	-sin u
Косинус	cosu			-sin u	1	cosu
Тангенс	tan u	$\frac{\sin u}{\cos u}$		sec ² u	0	– tan <i>u</i>
Котангенс	_cotanu	$\frac{1}{\tan u} = \frac{\cos u}{\sin u}$		- cosec ² u	8	-cotan u
Секанс	sec u	$\frac{1}{\cos u}$		sec u tan u	1	sec u
Косеканс	cosec u	$\frac{1}{\sin u}$		-cosec u cotan u	∞	-cosec u
Обратный синус	arcsin u		$\arctan \frac{u}{\sqrt{-u^2+1}}$	$\frac{1}{\sqrt{1-u^2}}$	0	-arcsin u
Обратный косинус	arccos u		$\arctan \frac{-u}{\sqrt{-u^2+1}} + 2\arctan 1$	$-\frac{1}{\sqrt{1-u^2}}$	$\pi/2$	π – arccos u
Обратный тангенс	arctan u			$\frac{1}{1+u^2}$	0	-arctan u
Обратный котангенс	arccotan u	$\arctan \frac{1}{u}$		$-\frac{1}{1+u^2}$	π/2	π – arccotan u
Обратный секанс	arcsec u	$\arccos \frac{1}{u}$		$\frac{1}{u\sqrt{u^2-1}}$	œ	π – arcsec u

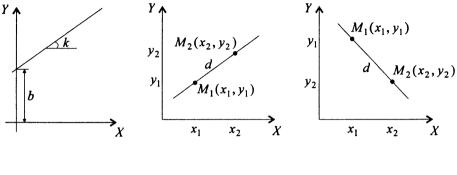
Функция	Обозначение	Равенство	Эквивалент	Производная	u = 0	u = -u
Обратный косеканс	arccosec u	$\arcsin \frac{1}{u}$		$-\frac{1}{u\sqrt{u^2-1}}$		-arccosec u
Гиперболический синус	sinh u		$\frac{e^{u}-e^{-u}}{2}$	cosh u	0	-si nh u
Гиперболический косинус	cosh u		$\frac{e^{u}+e^{-u}}{2}$	sinh u	1	cosh <i>u</i>
Гиперболический тангенс	tanh u	$\frac{\sinh u}{\cosh u}$	$\frac{e^{u}-e^{-u}}{e^{u}+e^{-u}}$	$1 - \tanh^2 u$	0	– tanh u
Гиперболический котангенс	cotanh u	cosh u sinh u	$\frac{e^{u}+e^{-u}}{e^{u}-e^{-u}}$	- cosech ² u	œ	- cotanh u
Гиперболический секанс	sech u	$\frac{1}{\cosh u}$		-sech u tanh u	1	sech u
Гиперболический косеканс	cosech u	$\frac{1}{\sinh u}$		-cosech u cotanh u	8	-cosech u
Обратный гиперболический синус	arcsinh u		$\ln\!\left(u+\sqrt{u^2+1}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{1+u^2}}$	0	-arcsinh u
Обратный гиперболический косинус	arccosh u		$ \ln\left(u+\sqrt{u^2-1}\right), $ $ u\geq 1 $	$\frac{1}{\sqrt{u^2-1}}$		arccosh u
Обратный гипербо- лический тангенс	arctanh u		$\frac{1}{2}\ln\frac{1+u}{1-u},$ $0 \le u^2 < 1$	$\frac{1}{1-u^2}$	0	-arctanh u
Обратный гипербо- лический котангенс	arccotanh u	arctanh $\frac{1}{u}$	$\frac{1}{2}\ln\frac{u+1}{u-1},$ $u^2 > 1$	$\frac{1}{1-u^2}$		- arccotanh u
Обратный гипербо- лический секанс	arcsech u	$\operatorname{arccosh} \frac{1}{u}$	$\ln\left(\frac{1}{u} + \sqrt{\frac{1}{u^2} - 1}\right)$ $0 < u \le 1$	$\mp \frac{1}{u\sqrt{1-u^2}}$	80	
Обратный гипербо- лический косеканс	arccosech u	$\operatorname{arcsinh} \frac{1}{u}$	$\ln\left(\frac{1}{u} + \sqrt{\frac{1}{u^2} + 1}\right)$	$\mp \frac{1}{u\sqrt{1+u^2}}$	8	-arccosech u
Натуральный логарифм	ln u	$\ln 10 \cdot \lg u \approx$ $\approx 2.3026 \lg u$		$\frac{1}{u}$		
Десятичный логарифм	lg <i>u</i>	$ \lg e \cdot \ln u \approx \approx 0.43429 \ln u $		$\frac{1}{u \ln 10}$		
Показательная функция (экспонента)	exp u; e ^u			e ^u	1	$\frac{1}{e^u}$
Показательная функция	10 ^u	exp(u ln 10)		10" ln 10	1	$\frac{1}{10^u}$

 $[\]Pi$ римечание. «-» ставится при u>0, «+» – при u<0.

Выборочные формулы аналитической геометрии

Уравнение прямой: y = kx + b,

где k – угловой коэффициент; b – величина отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат.



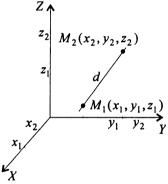


Рис. П43, А. Графики прямой линии.

Уравнение прямой, проходящей через точки $M_1(x_1, y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$:

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \, .$$

Определение ординаты точки, лежащей на прямой, по известному значению абсциссы:

$$y = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) + y_1.$$

Расстояние между точками $M_1(x_1, y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$ в двухмерном пространстве:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Расстояние между точками $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$ в трехмерном пространстве:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Формулы решения треугольников

Формулы решения прямоугольных треугольников:

$$a=c\sin\alpha$$
, $b=c\cos\alpha$, $a=b\tan\alpha$, $b=a\cot\alpha\alpha$; $a=c\cos\beta$, $b=c\sin\beta$, $a=b\cot\alpha\beta$, $b=a\tan\beta$; $\sin\alpha=\cos\beta$; $\tan\alpha=\cot\alpha\beta$; $a^2+b^2=c^2$ (теорема Пифагора); $a^2+\beta=\frac{\pi}{2}=90^\circ$.

Формулы решения произвольных треугольников:

$$c^{2} = a^{2} + b^{2} - 2ab\cos\gamma$$
 (теорема косинусов);

$$a = b\cos\gamma + c\cos\beta$$
:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$
 (теорема синусов);

$$\alpha+\beta+\gamma=\pi=180^{\circ}\,.$$

$$\alpha$$
, β , γ — значения углов в градусах: $360^{\circ} = 2\pi$ рад (радиан); $1^{\circ} = \frac{\pi}{180}$ рад.

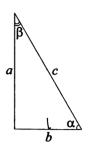


Рис. П43, Б. Прямоугольный треугольник.

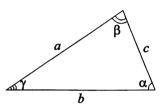


Рис. П43, В. Произвольный треугольник.

<u>Литература:</u> Кей, Лэби, 1962; Янке и др., 1964; Таблицы..., 1976; Справочник..., 1979.

Список основных условных обозначений

a – пьезопроводность (уровнепроводность) водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;

B – параметр перетекания, м;

d – расстояние между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин, м;

f – вспомогательная функция;

H – напор, м;

k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;

m — мощность водоносного пласта или начальная обводненная мощность безнапорного пласта, м;

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

r – горизонтальное расстояние от опытной скважины до наблюдательной, м;

 r_w – радиус опытной скважины, м;

S – упругая водоотдача водоносного пласта;

 S_s – удельная водоотдача водоносного пласта, 1/м;

 S_y — гравитационная водоотдача водоносного пласта;

s – понижение (повышение) уровня, м;

- s_m понижение уровня на период стационара, м;
- s, восстановление уровня, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;
- T проводимость водоносного пласта, $M^2/\text{сут}$;
- t время, сут;
- t_{r} время от начала восстановления, сут;
- z вертикальное расстояние, м;
- θ величина угла, градус;
- ρ горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной, м;
- τ переменная интегрирования;
- χ коэффициент анизотропии водоносного пласта.

Нижний индекс:

- A относится к угловому пласту;
- $a \kappa$ анизотропному пласту;
- $m \kappa$ стационарному периоду;
- P -к точечному источнику;
- p-к параметрам наблюдательной скважины или пьезометра; может относиться к значениям в точке на графике;
- Q к пласту-квадранту;
- r к восстановлению:
- S к наклонному пласту или пласту переменной мощности;
- $U \kappa U$ -образному пласту;
- w к параметрам опытной скважины;

штрих, два штриха относятся к свойствам слабопроницаемых слоев (например, k' или k'' – коэффициенты фильтрации слабопроницаемых слоев); штрих может означать приведенный параметр (например, r' – приведенное расстояние).

ЛИТЕРАТУРА

Аравин В.И., *Нумеров С.Н.* Теория движения жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953.

Бабушкин В.Д. Определение водопроницаемости анизотропных пород методом опытных откачек // Разведка и охрана недр. 1954а. № 6. С. 50–53.

Бабушкин В.Д. Определение водопроницаемости горных пород под руслом рек // Разведка и охрана недр. 1954б. № 4. С. 45–53.

Бабушкин В.Д., *Плотников И.И.*, *Чуйко В.М.* Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М.: Недра, 1974.

Баренблатт Г.И. К теории неустановившейся фильтрации при упругом режиме // Известия АН СССР. ОТН. 1954. № 9.

Баренблатт Г.И., *Ентов В.М.*, *Рыжик В.М.* Теория нестационарной фильтрации жидкости и газов. М.: Недра, 1972.

Белякова В.К. Неустановившийся приток грунтовых вод к скважинам // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. С. 109–115.

Биндеман Н.Н. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами и нагнетаниями. М.: Углетехиздат, 1951.

Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеолтехиздат, 1963.

Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973.

Бочевер Ф.М. Неустановившийся во времени приток грунтовых вод к скважине в долинах рек // Известия АН СССР. ОТН. 1959. № 5. С. 115–118.

Бочевер Ф.М. Расчет водозаборных и водопонизительных скважин в «закрытых пластах» // Вопросы гидрогеологических расчетов водозаборов и дренажей: Сб. статей. М.: ВОДГЕО, Госстройиздат, 1963. № 5. С. 65–94.

Бочевер Φ . M. Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. M.: Недра, 1968.

Бочевер Ф.М., *Веригин Н.Н.* Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М.: Госстройиздат, 1961.

Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969.

Бочевер Ф.М., *Гылыбов М.М.* Оценка заиленности и неоднородности русловых отложений по данным откачек // Разведка и охрана недр. 1966. № 2. С. 44—49.

Бочевер Φ .М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1979.

Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Хохлатов Э.М. Расчет притока подземных вод к скважинам в долинах рек // Разведка и охрана недр. 1968. № 9 С. 44—49.

Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости / А. Бан, А.Ф. Богомолова, В.А. Максимов, В.Н. Николаевский, В.Г. Оганджанянц, В.М. Рыжик. М.: Гостоптехиздат, 1962.

Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988.

Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Под ред. Н.Н. Веригина. М.: Недра, 1977.

Гиринский Н.К. Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившихся дебите и понижениях. М.: Госгеолиздат, 1950.

Гиринский Н.К. Полевые фильтрационные исследования водоносной толщи, сложенной тремя пластами // Разведка и охрана недр. 1954. № 6. С. 45–49.

Зеегофер Ю.О., Шестаков В.М. Методика обработки данных опытных откачек вблизи реки // Разведка и охрана недр. 1968. № 9. С. 38–44.

Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.

Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматтиз, 1962.

Керкис Е.Е. Определение коэффициента водопроницаемости горных пород комбинированным методом откачки-нагнетания // Советская геология. 1956. Сб. 56. С. 83–95.

Максимов В.А. О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде // ПМТФ. 1962. №3. С. 109–112.

Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1996.

Мироненко В.А., *Сердюков Л.И*. Обработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи // Разведка и охрана недр. 1968. №10. С. 34–38.

Мироненко В.А., *Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978.

Моркос Н.З., Шестаков В.М. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойного пласта по данным опытных откачек // Разведка и охрана недр. 1966. № 4. С. 48–52.

Опытно-фильтрационные работы / Под ред. В.М. Шестакова и Д.Н. Башкатова. М.: Недра, 1974.

Полубаринова-Кочина П.Я. О наклонных и горизонтальных скважинах конечной длины // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. С. 95–108.

Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977.

Проектирование водозаборов подземных вод / Под ред. Ф.М. Бочевера. М.: Стройиздат, 1976.

Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1973.

Романов А.В. Приток воды к водозаборам подземных вод и дренам // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений: Сб. статей. М.: Госстройиздат, 1952. С. 62–131.

Скабалланович И.А. Методика опытных откачек. М.: Госгеолтехиздат, 1960.

Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стеган. М.: Наука, 1979.

Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ (Методические рекомендации). М.: ВСЕГИНГЕО, 1969.

Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.; Л.: ОНТИ, 1930.

Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963.

Шестаков В.М. Определение коэффициентов фильтрации анизотропных пластов по данным опытных откачек // Разведка и охрана недр. 1955. № 6. С. 52–55.

Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. М.: Изд-во ВНИИ «ВОДГЕО», 1961.

Шестаков В.М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. М.: Изд-во МГУ, 1965.

Шестаков В.М. Неустановившаяся фильтрация при откачке из скважины в неограниченном безнапорном потоке // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1966. № 3. С. 145–147.

Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1973.

Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995.

Шестаков В.М. Вопросы терминологии в гидрогеодинамике // Водные ресурсы. 1984. № 5. C. 156—159.

Шестаков В.М. Оценка проницаемости разделяющего пласта по данным кратковременной опытной откачки // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2000. № 5. С. 73–74.

Шестаков В.М., Кравченко В.М., Пашковский И.С. Практикум по динамике подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1975.

Шестаков В.М., Невечеря И.К. Теория и методы интерпретации опытных откачек. М.: Издво МГУ, 1998.

Щелкачев В.Н. Избранные труды: В 2-х томах. М.: Недра, 1990.

Щелкачев В.Н. Применение операционных методов к решению задачи о движении упругой жидкости в упругом пласте // ДАН СССР. 1951. Т. 79. № 5. С. 751–754.

Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1949.

Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1964.

Abdul Khader M.H., Veerankutty M.K. Transient well-flow in an unconfined-confined aquifer system // Journal of Hydrology. 1975. Vol. 26. P. 123-140.

Abu-Zied M.A., Scott V.H. Nonsteady flow for wells with decreasing discharge // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1963. Vol. 89, N HY3. P. 119–132.

Aron G., Scott V.H. Simplified solution for decreasing flow in wells // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1965. Vol. 91, N HY5. P. 1–12.

Barker J.A., Black J.H. Slug tests in fissured aquifers // Water Resources Research. 1983. Vol. 19, N 6. P. 1558-1564.

Barry D.A., Parlange J.-Y., Li L. Approximations for the exponential integral (Theis well function) // Journal of Hydrology. 2000. Vol. 227. P. 287–291.

Bennett G.D., Patten E.P., Jr. Constant-head pumping test of a multiaquifer well to determine characteristics of individual aquifers // U.S. Geological Survey Water-Supply. 1962. Paper 1536-G.

Bohling G.C., McElwee C.D. SUPRPUMP: An interactive program for well test analysis and design // Ground Water. 1992. Vol. 30, N 2. P. 262-268.

Boreli M. Free-surface flow toward partially penetrating wells // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, N 4. P. 664-672.

Boulton N.S. The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1954a. Vol. 3, N 3. P. 564–579.

Boulton N.S. Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage // Association Internationale d'Hydrology Scientifique. Assemblee generale de Rome. 1954b. Tome II, publ. 37. P. 472–477.

Boulton N.S. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1963. Vol. 26. P. 469–482.

Boulton N.S. Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers // Journal of Hydrology. 1970. Vol. 10. P. 369–378.

Boulton N.S., Pontin J.M.A. An extended theory of delayed yield from storage applied to pumping tests in unconfined anisotropic aquifers // Journal of Hydrology. 1971. Vol. 14, N 1. P. 29-46.

Boulton N.S., Streltsova T.D. New equations for determining the formation constants of an aquifer from pumping test data // Water Resources Research. 1975. Vol. 11, N 1. P. 148–153.

Boulton N.S., Streltsova T.D. The drawdown near an abstraction well of large diameter under non-steady conditions in an unconfined aquifer // Journal of Hydrology. 1976. Vol. 30. P. 29–46.

Boulton N.S., Streltsova T.D. Unsteady flow to a pumped well in a two-layered water-bearing formation // Journal of Hydrology. 1977a. Vol. 35. P. 245–256.

Boulton N.S., Streltsova T.D. Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation // Journal of Hydrology. 1977b. Vol. 35. P. 257-270.

Boulton N.S., Streltsova T.D. Unsteady flow to a pumped well in a fissured aquifer with a free surface level maintained constant // Water Resources Research. 1978. Vol. 14, N 3. P. 527-532.

Boulton N.S., Streltsova-Adams T.D. Unsteady flow to a pumped well in an unconfined fissured aquifer // Journal of Hydrology. 1978. Vol. 37. P. 349–363.

Bouwer H. The Bouwer and Rice slug test – an update // Ground Water. 1989. Vol. 27, N 3. P. 304-309.

Bouwer H., Rice R.C. A slug test for determining conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells // Water Resources Research. 1976. Vol. 12, N 3. P. 423–428.

Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S. A method for determining the hydraulic properties of tight formations // Water Resources Research. 1980. Vol. 16, N 1. P. 233–238.

Brown D.L., Narasimhan T.N. An evaluation of the Bouwer and Rice method of slug test analysis // Water Resources Research. 1995. Vol. 31, N 5. P. 1239–1246.

Brown R.H. Drawdowns resulting from cyclic intervals of discharge // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 324–330. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.

Bukhari G.A., Vanden Berg A., Lennox D.H. Iterative analysis: bounded leaky artesian aquifer // Journal of the Irrigation and Drainage Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1969. Vol. 95, N IR1. P. 1–12.

Butler J.J., McElwee C.D., Liu W. Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests // Ground Water. 1996. Vol. 34, N 3. P. 480-490.

Case C.M., Addiego J.C. Note on a series representation of the leaky aquifer well function // Journal of Hydrology. 1977. Vol. 32. P. 393-397.

Case C.M., Pidcoe W.W., Fenske P.R. Theis equation analysis of residual Drawdown data // Water Resources Research. 1974. Vol. 10, N 6. P. 1253–1256.

Chow Ven Te. On the determination of transmissibility and storage coefficients from pumping test data // Transactions, American Geophysical Union. 1952. Vol. 33, N 3. P. 397-404.

Connell L.D. The importance of pulse duration in pulse test analysis // Water Resources Research. 1983. Vol. 30, N 8. P. 2403-2411.

Cooley R.L., Case C.M. Effect of a water table aquitard on drawdown in an underlying pumped aquifer // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 2. P. 434-447.

Cooper H.H. Type curves for nonsteady radial flow in an infinite leaky artesian aquifer // Shortcuts and special problems in aquifer tests / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 48–55. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1545-C.

Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water // Water Resources Research. 1967. Vol. 3, N 1. P. 263–269.

Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history // Transactions, American Geophysical Union. 1946. Vol. 27, N 4. P. 526-534.

Cox J.B. Discussion of «Free-surface flow toward partially penetrating wells» by M. Boreli // Transactions, American Geophysical Union. 1956. Vol. 37, N 5. P. 637–641.

Dagan G. A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1967a. Vol. 3, N 4. P. 1059–1071.

Dagan G. Two solutions of free-surface flow in porous media // Journal of the Engineering mechanics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1967b. Vol. 93, N EM4. P. 1–8.

Darcy H. Les fontaines publiques de la ville Dijon. Paris, 1856.

De Wiest R.J.M. On the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1961. Vol. 66, N 12. P. 4257-4262.

De Wiest R.J.M. Geohydrology. New York: John Wiley & Sons, 1965. Также: Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. Том 1. М.: Мир, 1969.

De Wiest R.J.M. Green's functions in the flow through porous media // Flow through porous media // Edited by R.J.M. De Wiest. New York; London: Academic Press, 1969. P. 401–454.

Don Kirkham. Exact theory of flow into a partially penetrating well // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64, N 9. P. 1317-1327.

Don Kirkham. Exact theory for the shape of the free water surface about a well in a semiconfined aquifer // Journal of Geophysical Research. 1964. Vol. 69, N 12. P. 2537-2549.

Dupuit J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. Paris, 1863.

Faust C.R., Mercer J.W. Evaluation of slug-tests in wells containing a finite-thickness skin // Water Resources Research. 1984. Vol. 20, N 4. P. 504-506.

Fenske P.R. Type curves for recovery of a discharging well with storage // Journal of Hydrology. 1977. Vol. 33. P. 341–348.

Fenske P.R. Unsteady drawdown in the presence of a linear discontinuity // Groundwater Hydraulics. 1984, N 9. P. 125–145.

Ferris J.G., Knowles D.B. The slug test for estimating transmissibility // U.S. Geol. Surv. Ground Water Note. 1954. N 26. P. 1–7.

Ferris J.G., Knowles D.B. The slug-injection test for estimating the coefficient of transmissibility of an aquifer // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 299–304. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.

Ferris J.G., Knowles D.B., Brown R.H, Stallman R.W. Theory of aquifer tests // U.S. Geological Survey Water-Supply. 1962. Paper 1536-E.

Glover R.E., Balmer G.G. River depletion resulting from pumping a well near a river // Transactions, American Geophysical Union. 1954. Vol. 35, N 3. P. 468–470.

Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974a. Vol. 14, N 4. P. 413-426.

Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974b. Vol. 14, N 4. P. 347–360.

Guyonnet D., Mishra S., Mccord J. Evaluating the volume of porous medium investigated during slug tests // Ground Water. 1993. Vol. 31, N 4. P. 627-633.

Halepaska J.C. Drawdown distribution around wells partially penetrating thick leaky artesian aquifers // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 5. P. 1332–1337.

Hantush M.S. Discussion of «River depletion resulting from pumping a well near a river» by R.E. Glover, G.G. Balmer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 35, N 2. P. 345-347.

Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers // Transactions, American Geophysical Union. 1956. Vol. 37, N 6. P. 702–714. Также: Хантуш М.С. Анализ данных опытных откачек из скважин в водоносных горизонтах с перетеканием // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 27–42.

Hantush M.S. Non-steady flow to a well partially penetrating an infinite leaky aquifer // Proceedings of the Iraqi scientific societies. 1957. Vol. 1. P. 10–19.

Hantush M.S. Analysis of data from pumping wells near a river // Journal of Geophysical Research. 1959a. Vol. 64, N 11. P. 1921–1932.

Hantush M.S. Nonsteady flow to flowing wells of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1959b. Vol. 64, N 8. P. 1043–1052.

Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65, N 11. P. 3713–3725. Также: Хантуш М.С. Новое в теории перетекания // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 43–60.

Hantush M.S. Aquifer tests on partially penetrating wells // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1961a. Vol. 87, N HY5, P. 171–195. Также: Хантуш М.С. Неустановившийся приток подземных вод к скважине, несовершенной по степени вскрытия // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 61–85.

Hantush M.S. Drawdown around a partially penetrating well // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1961b. Vol. 87, N HY4. P. 83–98.

Hantush M.S. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness. Part 1. Flow in a wedge-shaped aquifer // Journal of Geophysical Research. 1962a. Vol. 67, N 2. P. 703–709. Также: Хантуш М.С. Движение подземных вод в пластах переменной мощности // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 85–94.

Hantush M.S. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness. Part 2. Approximate theory // Journal of Geophysical Research. 1962b. Vol. 67, N 2. P. 711-720.

Hantush M.S. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness. Part 3. Flow to wells // Journal of Geophysical Research. 1962c. Vol. 67, N 4. P. 1527–1534.

Hantush M.S. Hydraulics of gravity wells in sloping sands // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1962d. Vol. 88, N HY4. P. 1–15.

Hantush M.S. Depletion of storage, leakage, and river flow by gravity wells in sloping sands // Journal of Geophysical Research. 1964a. Vol. 69, N 12. P. 2551–2560.

Hantush M.S. Drawdown around wells of variable discharge // Journal of Geophysical Research. 1964b. Vol. 69, N 20. P. 4221–4235.

Hantush M.S. Hydraulics of wells // Advances in Hydroscience / Edited by Ven Te Chow. New York; London: Academic Press, 1964c. Vol. 1. P. 281-432.

Hantush M.S. Wells near streams with semipervious beds // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70, N 12. P. 2829–2838. Также: Хантуш М.С. Скважины вблизи рек со слабопроницаемым ложем // Переводы статей по гидрогеологии и инженерной геологии. Динамика подземных вод. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1968. Вып. 8. С. 43–62.

Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers // Journal of Geophysical Research. 1966a. Vol. 71, N 2. P. 421-426.

Hantush M.S. Wells in homogeneous anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1966b. Vol. 2, N 2. P. 273–279.

Hantush M.S. Depletion of flow in right-angle stream bends by steady wells // Water Resources Research. 1967a. Vol. 3, N 1. P. 235–240.

Hantush M.S. Flow of groundwater in relatively thick leaky aquifers // Water Resources Research. 1967b. Vol. 3, N 2. P. 583-590.

Hantush M.S. Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer // Journal of Geophysical Research. 1967c. Vol. 72, N 6. P. 1709–1720.

Hantush M.S., Jacob C.E. Plane potential flow of ground water with linear leakage // Transactions, American Geophysical Union. 1954. Vol. 35, N 6. P. 917–936.

Hantush M.S., Jacob C.E. Non-steady Green's functions for an infinite strip of leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955a. Vol. 36, N 1. P. 101-112.

Hantush M.S., Jacob C.E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955b. Vol. 36, N 1. P. 95–100.

Hantush M.S., Jacob C.E. Steady three-dimensional flow to a well in a two-layered aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955c. Vol. 36, N 2. P. 286–292.

Hantush M.S., Jacob C.E. Flow to an eccentric well in a leaky circular aquifer // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65, N 10. P. 3425-3431.

Hantush M.S., Papadopulos I.S. Flow of ground water to collector wells // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1962. Vol. 88, N HY5. P. 221–244.

Hantush M.S., Papadopulos I.S. Flow of ground water to collector wells // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1963. Vol. 89, N HY4. P. 225–227.

Hantush M.S., Thomas R.G. A method for analyzing a drawdown test in anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1966. Vol. 2, N 2. P. 281–285.

Hunt B. Calculation of the leaky aquifer function // Journal of Hydrology. 1977. Vol. 33, N 1/2. P. 179–183.

Hvorslev M.J. Time lag and soil permeability in groundwater observations // U.S. Army Corps Eng, Waterways Station. Vicksburg, MS. 1951. Bull. 36.

International glossary of hydrology, Geneva: WMO-Unesco, 1974.

Jacob C.E. On the flow of water in an elastic artesian aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1940. Vol. 21, pt. 2. P. 574-586.

Jacob C.E. Effective radius of drawdown test to determine artesian well // Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1946a. Vol. 72, N 5. P. 629-646.

Jacob C.E. Radial flow in a leaky artesian aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1946b. Vol. 27, N 2. P. 198–205. Don Kirkham. Discussion. P. 206–208.

- Jacob C.E. Flow of ground water // Engineering Hydraulics / Edited by H. Rouse. New York; London: John Wiley & Sons, 1950. Chap. 5. P. 321-386.
- Jacob C.E. Determining the permeability of water-table aquifer // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963a. P. 245–271. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.
- Jacob C.E. The recovery method for determining the coefficient of transmissibility // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963b. P. 283-292. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.
- Jacob C.E., Lohman S.W. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1952. Vol. 33, N 4. P. 559–569.
- Jaeger J.C. Numerical values for the temperature in radial heat flow // Journal of Mathematics and Physics. 1956. Vol. 34, N 4. P. 316–321.
- Jaeger J.C. The analysis of aquifer test data or thermal conductivity measurements which use a line source. Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64, N 5. P. 561-564.
- Javandel I., Witherspoon P.A. Analytical solution of partially penetrating well in a two-layer aquifer // Water Resources Research. 1983. Vol. 19, N 2. P. 567-578.
- Jenkins D.N., Prentice J.K. Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (nonradial) flow conditions // Ground Water. 1982. Vol. 20, N 1. P. 12-21.
- Kabala Z.J., Pinder G.F., Milly P.C.D. Analysis of well-aquifer response to a slug test // Water Resources Research. 1985. Vol. 21, N 9. P. 1433-1436.
- Karasaki K., Long J.C.S., Witherspoon P.A. Analytical models of slug tests // Water Resources Research. 1988. Vol. 24, N 1. P. 115-126.
- Keller C.K., van der Kamp G. Slug tests with storage due to entrapped air // Ground Water. 1992. Vol. 30, N 1. P. 2-7.
- Kemblowski M.W., Klein G.L. An automated numerical evaluation of slug test data // Ground Water. 1988. Vol. 26, N 4. P. 435-438.
- Kipp K.L. Type curve analysis of inertial effects in the response of a well to a slug test // Water Resources Research. 1985. Vol. 21, N 9. P. 1397–1408.
- Kruseman G.P., Ridder N.A. Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen, The Netherlands. 1994.
- Lai R.Y.S., Chen-Wu Su. Nonsteady flow to a large well in a leaky aquifer // Journal of Hydrology. 1974. Vol. 22, N 3/4. P. 333-345.
- Lennox D.H. Analysis and application of step-drawdown test // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1966. Vol. 92, N HY6. P. 25–48.
- Lohman S.W. Ground-water hydraulic. 1972. U.S. Geological Survey. Professional paper 708.
- Marino M.A., Yeh W.W-G. Nonsteady flow in a recharge well-unconfined aquifer system // Journal of Hydrology. 1972. Vol. 16, N 2. P. 159–176.
- McElwee C.D., Bohling G.C., Butler J.J. Sensitivity analysis of slug-tests. Part 1. The slugged well // Journal of Hydrology. 1995. Vol. 164. P. 53-67.

McElwee C.D., Butler J.J. Bohling G.C., Lin W. Sensitivity analysis of slug-tests. Part 2. Observation wells // Journal of Hydrology. 1995. Vol. 164. P. 69–87.

Meinzer O.E., Fishel V.C. Test of permeability with low hydraulic gradients // National Research Council. Transactions of the American Geophysical Union, Fifteenth Annual Meeting. 1934. Part II. P. 405-409.

Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.

Moench A.F. Computation of type curves for flow to partially penetrating wells in water-table aquifers // Ground Water. 1993. Vol. 31, N 6. P. 966-971.

Moench A.F. Flow to a well in a water-table aquifer: an improved Laplace transform solution // Ground Water. 1996. Vol. 34, N 4. P. 593-596.

Moench A.F. Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer // Water Resources Research. 1997. Vol. 33, N 6. P. 1397–1407.

Moench A.F., Hsieh P.A. Comment on «Evaluation of slug tests in wells containing a finite-thickness skin» by C.R. Faust and J.W. Mercer // Water Resources Research. 1985. Vol. 21, N 9. P. 1459–1461.

Muskat M. The flow of homogeneous fluids in porous media. New York; London: McGraw-Hill Book Co., 1937. Также: Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Гостоптехнадзор, 1949.

Neuman S.P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 4. P. 1031–1045.

Neuman S.P. Supplementary comments on «Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response» // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 4. P. 1102–1103.

Neuman S.P. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // Water Resources Research. 1974. Vol. 10, N 2. P. 303-312.

Neuman S.P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers // Water Resources Research. 1975. Vol. 11, N 2. P. 329-345.

Neuman S.P. Perspective on «Delayed yield» // Water Resources Research. 1979. Vol. 15, N 4. P. 899-908.

Neuman S.P., Walter G.R., Bentley H.W., Ward J.J., Gonzalez D.D. Determination of horizontal aquifer anisotropy with three wells // Ground Water. 1984. Vol. 22, N 1. P. 66–72.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Theory of flow in aquicludes adjacent to slightly leaky aquifers // Water Resources Research. 1968. Vol. 4, N 1. P. 103-112.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Applicability of current theories of flow in leaky aquifers // Water Resources Research. 1969a. Vol. 5, N 4. P. 817–829.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Theory of flow in a confined two aquifer system // Water Resources Research. 1969b. Vol. 5, N 4. P. 803-816.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 5. P. 1284–1298.

Neuzil C.E. On conducting the modified «slug» test in tight formations // Water Resources Research. 1982. Vol. 18, N 2. P. 439-441.

Nguyen V., Pinder G.F. Direct calculation of aquifer parameters in slug test analysis // Groundwater Hydraulics. 1984. N 9. P. 222–239.

Novakovski K.S. Analysis of pulse interference tests // Water Resources Research. 1989. Vol. 25, N 11. P. 2377-2387.

Pandit N.S., Miner R.F. Interpretation of slug test data // Ground Water. 1986. Vol. 24. P. 743-749.

Papadopulos I.S. Nonsteady flow to multiaquifer wells // Journal of Geophysical Research. 1966. Vol. 71, N 2. P. 4791–4797.

Papadopulos I.S., Bredehoeft J.D., Cooper H.H. On the analysis of «slug-test» data // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 4. P. 1087–1089.

Papadopulos I.S., Cooper H.H. Drawdown in a well of large diameter // Water Resources Research. 1967. Vol. 3, N 1, P. 241-244.

Peres A.M., Onur M., Reynolds A.C. A new analysis procedure for determining aquifer properties from slug test data // Water Resources Research. 1989. Vol. 25, N 7. P. 1591–1602.

Peres A.M., Onur M., Reynolds A.C. A new general pressure-analysis procedure for slug tests // SPE Formation Evaluation. 1993. P. 292–297.

Picking L.W. Analyzing the recovery of a finite-diameter well after purging at an unknown rate – A substitute for slug-testing // Ground Water. 1994. Vol. 32, N 1. P. 91–95.

Poeter E.P., Hill M.C. Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations. 1998. Report 98-4080.

Remson I., Lang S.M. A pumping-test method for the determination of specific yield // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, N 2. P. 321–325.

Sageev A. Slug test analysis // Water Resources Research. 1986. Vol. 22, N 8. P. 1323-1333.

Salem Z.A., Jacob C.E. Drawdown distribution due to well fields in coupled leaky aquifers.

1. Infinite aquifer system // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 6. P. 1671–1678.

Salem Z.A., Jacob C.E. Drawdown distribution due to well fields in coupled leaky aquifers. 2. Finite aquifer system // Water Resources Research. 1974. Vol. 10, N 2. P. 336-342.

Selected contributions to groundwater hydrology by C.V. Theis, and a review of his life and work. 1994. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 2415.

Srivastava R., Guzman-Guzman A. Practical approximations of the well function // Ground Water. 1998. Vol. 36, N5. P. 844–848.

Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // Journal of Hydrology. 1969. Vol. 33, N 2. P. 158–166.

Streltsova T.D. Unsteady radial flow in an unconfined aquifer // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 4. P. 1059–1066.

Streltsova T.D. On the leakage assumption applied to equations of groundwater flow // Journal of Hydrology. 1973. Vol. 20, N 3. P. 237–253.

Streltsova T.D. Drawdown in compressible unconfined aquifer // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1974. Vol. 100, N HY11. P. 1601–1616.

Streltsova T.D. Well testing in heterogeneous formations. New York: John Wiley & Sons, 1988.

Streltsova T.D., Rushton K.R. Water table drawdown due to a pumped well in an unconfined aquifer // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 1. P. 236-242.

Theis C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35, pt. 2. P. 519–524.

Theis C.V. Drawdowns caused by a well discharging under equilibrium conditions from an aquifer bounded by a finite straight-line source // Shortcuts and special problems in aquifer tests / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 101–105. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1545-C.

Thiem G. Hydrologische methoden. Leipzig, 1906.

Van der Kamp G. Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: The underdamped case // Water Resources Research. 1976. Vol. 12, N 1. P. 71-77.

Van Poolen H.K. Drawdown curves give angle between intersecting faults // The Oil and Gas Journal. 1965. Vol. 63, N 51. P. 71–75.

Vandenberg A. Type curves for analysis of pump tests in leaky strip aquifers // Journal of Hydrology. 1977. Vol. 33, N 1/2. P. 15-26.

Walton W.C. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation // Illinois State Water Survey. 1962. Urbana, Bull. 49.

Walton W.C. Groundwater resource evaluation. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

Walton W.C. Analytical groundwater modeling with programmable calculators and hand-held computers // Groundwater Hydraulics. 1984. N 9. P. 298-312.

Warren A. Graphic shortcuts in applying the nonequilibrium formula to ground-water problems // Shortcuts and special problems in aquifer tests / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 19–28. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1545-C.

Weeks E.P. Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer-test analysis // Water Resources Research. 1969. Vol. 5, N 1. P. 196-214.

Wenzel L.K. Methods for determining permeability of water-bearing materials with special reference to discharging-well methods. 1942. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 887.

Weyer K.U., Horwood-Brown W.C. Program HVRL1 – Interactive determination of horizontal permeabilities within uniform soils from field tests using Hvorslev's formulae // Ground Water. 1982. Vol. 20, N 3. P. 289–297.

Wikramaratna R.S. An analytical solution for the effects of abstraction from a multiple-layered confined aquifer with no cross flow // Water Resources Research. 1984. Vol. 20, N 8. P. 1067–1074.

Wylie A., Wood T.R. Program to calculate hydraulic conductivity using slug test data // Ground Water. 1990. Vol. 28, N 5. P. 783–786.

Zlotnik V., Ledder G. Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1996. Vol. 32, N 4. P. 1119–1128.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамовиц М. 753 Аравин В.И. 393, 396, 751

Бабушкин В.Д. 250, 257, 300, 305, 308, 359, 360, 393, 405, 416, 751

Бан А. 300, 752

Баренблатт Г.И. 364, 740, 751

Башкатов Д.Н. 752

Белякова В.К. 338, 751

Биндеман Н.Н. 15, 68, 73, 125, 129, 323, 359, 360, 751

Богомолова А.Ф. 752

Боревский Б.В. 14, 23, 24, 25, 41, 54, 68, 80, 105, 125, 129, 345, 347, 579, 588, 589, 751

Бочевер Ф.М. 16, 41, 44, 53, 68, 72, 73, 78, 79, 84, 85, 125, 129, 131, 141, 300, 304, 313, 314, 317, 320, 354, 393, 396, 465, 466, 491, 495, 504, 584, 588, 648, 751, 752

Веригин Н.Н. 68, 72, 73, 78, 79, 84, 85, 125, 129, 131, 141, 393, 396, 465, 466, 491, 588, 751

Гавич И.К. 15, 16, 17, 24, 752 Гармонов И.В. 751 Гиринский Н.К. 250, 257, 266, 393, 396, 752 Гылыбов М.М. 354, 752

Де Уист Р. 756

Егер Д. 41, 44, 146, 592, 593, 596, 605, 615, 695, 699, 752

Ентов В.М. 751

Зеегофер Ю.О. 345, 346, 347, 752

Исаев Р.Г. 24, 105, 125, 298, 316, 317, 506, 753

Карслоу Г. 41, 44, 146, 592, 593, 596, 605, 615, 695, 699, 752

Кей Дж. 749, 752 Керкис Е.Е. 752

Кикоин И.К. 753

Кравченко В.М. 753

Лапук Б.Б. 105, 114, 125, 316, 317, 373, 753 Лапшин Н.Н. 752 Лебедев А.В. 751 Лёш Ф. 753

Лэби Т. 749, 752

Максимов В.А. 300, 302, 303, 304, 305, 752

Маскет М. 760

Мироненко В.А. 14, 15, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 41, 57, 68, 146, 250, 256, 258, 300, 323, 364, 365, 366, 381, 584, 752

Моркос Н.З. 752

Невечеря И.К. 250, 338, 340, 364, 447, 753 Николаевский В.Н. 752 Нумеров С.Н. 393, 396, 751

Оганджанянц В.Г. 752 Орадовская А.Е. 752

Пашковский И.С. 753 Плотников И.И. 751 Полубаринова-Кочина П.Я. 16, 17, 68, 73, 298, 300,

305, 323, 328, 341, 752 Πωχαчев Γ.Б. 24, 105, 125, 298, 506, 753

Романов А.В. 68, 73, 74, 753 Рыжик В.М. 752

Самсонов Б.Г. 751 Сердюков Л.И. 364, 365, 752 Скабалланович И.А. 41, 753 Стеган И. 753

Форхгеймер Ф. 57, 753

Хантуш М.С. 757 Хохлатов Э.М. 752

Чарный И.А. 105, 125, 753 Чуйко В.М. 751

Шестаков В.М. 14, 16, 17, 23, 25, 26, 41, 48, 57, 68, 132, 138, 146, 153, 250, 256, 258, 267, 300, 323, 338, 340, 345, 346, 347, 364, 366, 381, 393, 396, 405, 409, 447, 466, 579, 584, 653, 655, 751, 752, 753

Щелкачев В.Н. 105, 114, 125, 313, 316, 317, 373, 753

Эмде Ф. 753

Язвин Л.С. 751

Янке Е. 626, 630, 699, 749, 753

Abdul Khader M.H. 375, 627, 754 Abu-Zied M.A. 584, 754 Addiego J.C. 707, 755 Aron G. 579, 754

Balmer G.G. 353, 756, 757 Barker J.A. 592, 754 Barry D.A. 699, 754 Bennett G.D. 588, 754

Bentall R. 755, 756, 758, 759, 760, 762

Bentley H.W. 760 Black J.H. 592, 754

Boehmer W.K 563, 566, 567, 568 Bohling G.C. 592, 754, 759, 760 Boonstra J. 563, 566, 567, 568

Boreli M. 329, 754, 755

Boulton N.S. 323, 325, 335, 361, 550, 570, 637, 638, 754 Bourdet D. 544, 547

Bouwer H. 592, 595, 598, 600, 601, 755 Bredehoeft J.D. 592, 593, 594, 651, 755, 761

Brown D.L. 755

Brown R.H. 579, 582, 598, 755

Bukhari G.A. 468, 755

Butler J.J. 593, 609, 755, 759, 760

Case C.M. 41, 364, 368, 707, 755 Chen-Wu Su 393, 399, 759 Chow Ven Te 41, 755, 757 Connell L.D. 592, 755 Cooley R.L. 364, 368, 755

Cooper H.H. 41, 44, 45, 51, 393, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 606, 636, 651, 755, 761

Cox J.B. 329, 755

Dagan G. 323, 329, 755 Darcy H. 24, 756

De Wiest R.J.M. 15, 16, 17, 23, 41, 55, 57, 68, 105, 125, 491, 492, 756

Don Kirkham 250, 323, 756, 758

Dupuit J. 41, 47, 756

Faust C.R. 592, 603, 756 Fenske P.R. 300, 302, 303, 755, 756 Ferris J.G. 89, 105, 107, 232, 294, 592, 595, 756 Fishel V.C. 41, 760

Glover R.E. 353, 756, 757 Gonzalez D.D. 760 Gringarten A.C. 544, 547, 554, 556, 557, 558, 756 Guyonnet D. 608, 756 Guzman-Guzman A. 707, 761 Halepaska J.C. 447, 756

Hantush M.S. 23, 41, 53, 105, 125, 132, 134, 137, 250, 258, 278, 345, 349, 351, 352, 353, 364, 369, 393, 395,

396, 398, 401, 405, 407, 416, 418, 421, 424, 426, 427, 441, 452, 458, 459, 465, 468, 476, 480, 491, 494, 495,

496, 498, 502, 506, 513, 521, 524, 528, 530, 532, 537,

541, 542, 584, 614, 615, 618, 619, 620, 621, 626, 630, 638, 659, 660, 662, 664, 665, 667, 669, 670, 676, 695

638, 659, 660, 662, 664, 665, 667, 669, 670, 676, 685, 687, 693, 695, 701, 707, 708, 711, 722, 724, 757, 758

Hill M.C. 38, 761

Horwood-Brown W.C. 592, 762

Hsieh P.A. 592, 760

Hunt B. 707, 758

Hvorslev M.J. 592, 601, 602, 603, 758

Jacob C.E. 41, 44, 45, 48, 53, 55, 105, 110, 120, 125, 323, 369, 393, 395, 396, 465, 468, 476, 480, 491, 495, 496, 503, 579, 659, 660, 701, 707, 755, 758, 759, 761

Jacger J.C. 41, 47, 615, 759

Javandel I. 386, 759

Jenkins D.N. 559, 561, 759

Kabala Z.J. 452, 456, 593, 759

Karasaki K. 594, 605, 759

Kazemi H. 544, 548

Keller C.K. 603, 759

Kemblowski M.W. 592, 759

Kipp K.L. 593, 606, 759

Klein G.L. 592, 759

Knowles D.B. 592, 595, 756

Kruseman G.P. 23, 57, 68, 79, 89, 93, 132, 329, 333, 345, 349, 350, 452, 458, 468, 473, 506, 510, 511, 544, 547, 548, 554, 556, 557, 558, 563, 566, 567, 568, 569, 592,

644, 645, 658, 735, 759

Lai R.Y.S. 393, 399, 759

Lang S.M. 323, 761

Ledder G. 261, 693, 762

Lennox D.H. 579, 755, 759

Li L. 754

Lin W. 760

Liu W. 755

Lohman S.W. 41, 53, 659, 660, 759

Long J.C.S. 759

Marino M.A. 323, 327, 759

Mccord J. 756

McElwee C.D. 592, 593, 754, 755, 759, 760

Meinzer O.E. 41, 760

Mercer J.W. 592, 603, 756

Milly P.C.D. 759

Miner R.F. 761

Mishra S. 756

Moench A.F. 335, 592, 760

Muskat M. 125, 142, 144, 733, 760

Narasimhan T.N. 598, 755

Neuman S.P. 132, 329, 331, 332, 333, 334, 335, 427, 433, 437, 715, 719, 721, 760

Neuzil C.E. 592, 595, 761

Именной указатель

Nguyen V. 597, 761 Novakovski K.S. 593, 761

Prentice J.K. 559, 561, 759

Onur M. 761

Pandit N.S. 603, 761
Papadopulos I.S. 41, 51, 375, 532, 537, 541, 542, 592, 593, 594, 596, 636, 651, 685, 755, 758, 761
Parlange J.-Y. 754
Patten E.P., Jr. 588, 754
Peres A.M. 592, 595, 761
Picking L.W. 592, 596, 761
Pidcoe W.W. 755
Pinder G.F. 597, 759, 761
Poeter E.P. 38, 761
Pontin J.M.A. 323, 754

Ramey H.J., Jr. 554, 557, 558, 756 Remson I. 323, 761 Reynolds A.C. 761 Rice R.C. 592, 595, 598, 600, 601, 755 Ridder N.A. 23, 57, 68, 79, 89, 93, 132, 329, 333, 345, 349, 350, 452, 458, 468, 473, 506, 510, 511, 544, 547, 548, 554, 556, 557, 558, 563, 566, 567, 568, 569, 592, 644, 645, 658, 735, 759 Rouse H. 759 Rushton K.R. 323, 762

Sageev A. 592, 604, 761 Salem Z.A. 503, 761 Scott V.H. 579, 584, 754 Seth M.S. 544 Srivastava R. 707, 761 Stallman R.W. 756
Sternberg Y.M. 41, 44, 393, 396, 401, 402, 761
Streltsova T.D. 105, 323, 329, 335, 337, 361, 364, 570, 584, 754, 761, 762
Streltsova-Adams T.D. 550, 754

Theis C.V. 41, 44, 142, 733, 754, 755, 761, 762 Thiem G. 41, 47, 762 Thomas G.W. 544 Thomas R.G. 132, 137, 758

Van der Kamp G. 592, 603, 608, 759, 762 Van Poolen H.K. 105, 762 Vandenberg A. (Vanden Berg A.) 68, 79, 468, 473, 656, 658, 755, 762 Veerankutty M.K. 375, 627, 754

Walter G.R. 760
Walton W.C. 23, 89, 105, 142, 323, 393, 702, 707, 762
Ward J.J. 760
Warren A. 41, 45, 762
Weeks E.P. 250, 762
Wenzel L.K. 41, 699, 762
Weyer K.U. 592, 762
Wikramaratna R.S. 375, 762
Witherspoon P.A. 386, 427, 433, 437, 554, 556, 721, 759, 760
Wood T.R. 592, 603, 762
Wylie A. 592, 603, 762

Yeh W.W-G. 323, 327, 759

Zlotnik V. 261, 693, 762

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алгоритм определения параметров по точке перегиба 398, 511

- --- Шестакова 138
- --- Boehmer-Boonstra 567
- --- Boonstra-Boehmer 566, 568
- --- Bourdet-Gringarten 547
- --- Gringarten-Ramey 557
- --- Gringarten-Witherspoon 556
- --- Jenkins-Prentice 561
- --- Hantush 134, 351, 421, 426, 459
- --- Hantush-Thomas 137
- --- Kazemi 548
- --- Neuman 333
- --- Ramey-Gringarten 558

Вода грунтовая (гравитационная) 16

Водозабор лучевой 532

Водоотдача (упругая емкость пласта) 24

- гравитационная (гравитационная емкость) 25
- удельная (упругая емкость породы) 25

Водоупор 15

Восстановление уровня 15

Вязкость 24, 745

Граница гидравлическая 344

- гидрогеологическая 15
- круговая 123, 311, 340, 369, 488
- линейная
- две параллельные 68, 178, 272, 468
- -- две пересекающиеся 104, 196, 231, 281, 293, 476
- --одна 57, 165, 263, 319, 344, 352, 464, 515, 517, 524, 530, 538
- три пересекающиеся 89, 217, 285, 480
- непроницаемая, см. Граничные условия II рода
- обеспеченного питания, см. Граничные условия І рода
- плановая 16, 57, 68, 89, 104, 123, 142, 165, 178, 196, 217, 231, 263, 272, 285, 293, 300, 340, 344, 369, 462, 488, 515, 517, 524, 530, 538
- профильная 17, 165, 178, 196, 217, 231, 263, 272, 281, 285, 293, 298
- фактическая 344

Граничные условия 15

-- I рода 59, 71, 89, 109, 125, 142, 166, 180, 198, 217, 231, 268, 279, 281, 285, 293, 298, 316, 319, 359,

- 369, 464, 468, 476, 480, 491, 502, 515, 524, 530,
- -- II рода 63, 77, 89, 113, 129, 171, 185, 204, 217, 231, 264, 268, 272, 279, 281, 285, 293, 340, 464, 468, 476, 480, 495, 504, 517
- -- III рода (река) 344
- -- IV рода (планово-неоднородный пласт) 300
- -- смешанные (I и II рода) 83, 89, 119, 191, 211, 217, 231, 279, 281, 285, 293, 468, 476, 480

График временного прослеживания 33, 157

- комбинированного прослеживания 33, 157
- площадного прослеживания 33, 157
- эталонной кривой 30, 31, 157

Дайка 562

Единицы измерения английские 746

- -- атмосфера (атм) 745
- -- бар 745
- дарси 745
- -- дина (дин) 745
- – мейнцер 745
- -- миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.) 745
- Паскаль (Па) 745
- пьеза 745
- – радиан 749
- сантипуаз (сПз) 745
- сантистокс (сСт) 745

Емкостные свойства 16

Емкость пласта, см. Водоотдача

- породы, см. Водоотдача
- разделяющего слоя 418
- скважины 44, 51, 335, 340, 369, 399, 554, 593, 605

Задача обратная 38

- прямая 36

Закон Дарси (Darcy) 24

Зона неоднородности 300

Инфильтрация 16, 129, 340

Источник линейный 16, 250, 329, 335, 338, 361, 439, 452, 597, 598, 602

точечный 17, 146, 338

Коллектор 532

Комплекс (система) 15

- безнапорный 361, 363, 381, 382, 392, 419, 423, 442, 443, 445, 446, 448, 449, 450, 451, 527
- водоносный 15
- двухслойный 361
- слоистый 391
- трехслойный 340, 391

Коэффициент плановой анизотропии 26

- профильной анизотропии 25
- сжимаемости воды 25, 745
- породы 25
- фильтрации 23, 745
- эффективный 132

Метод наименьших квадратов 38 Модуль Юнга (упругости воды) 25

Нагнетание 22, 327

Напор 74, 352, 391, 590

- в смежном пласте меняется 374, 404
- гидродинамический 16
- гидростатический 16
- градиент 15

Начальные условия 16

Объемная масса жидкости 25

Опробование в пласте анизотропном 132, 146, 250,

329, 335, 361, 452, 458, 601

- --- безнапорном 74, 131, 140, 323, 340, 352, 354, 520, 527, 532, 550, 572, 598
- — двухслойном 361
- — наклонном 506
- --- напорном 41, 146, 250, 300, 508, 532, 544, 553, 574, 575, 577, 593
- — планово-неоднородном 300
- — с перетеканием 391
- в трещиновато-пористых породах 544, 605
- вблизи границы обеспеченного питания 59, 71, 89,
 109, 125, 142, 166, 180, 198, 217, 231, 268, 279,
 281, 285, 293, 298, 316, 319, 359, 369, 464, 468,
 476, 480, 491, 502, 515, 524, 530, 538
- -- непроницаемой границы 63, 77, 89, 113, 129, 171, 185, 204, 217, 231, 264, 268, 272, 279, 281, 285, 293, 340, 464, 468, 476, 480, 495, 504, 517
- реки 344
- -- смешанных границ 83, 89, 119, 191, 211, 217, 231, 279, 281, 285, 293, 468, 476, 480
- виды 21
- двух пластов 415, 432
- дуплетное 23, 55, 261, 456
- скважиной горизонтальной 532
- наклонной 298
- -- несовершенной 146, 250, 329, 335, 338, 361, 439, 452, 597, 598, 602
- опытно-фильтрационное 16
- Откачка 16, 21
- групповая 21, 577
- из скважины большого диаметра 51, 335, 399
- с переменным расходом 577

- с постоянным понижением 22, 53, 343, 401, 494, 498, 513, 588
- — расходом 21

Параметр перетекания 25

Пласт анизотропный 15, 132, 146, 250, 329, 335, 361, 452, 458, 601

- безнапорный 15, 74, 131, 140, 323, 340, 352, 354, 520, 527, 532, 550, 572, 598
- водоносный 15
- изотропный 16
- наклонный 520, 527
- напорно-безнапорный 141
- напорный 16, 41, 146, 250, 300, 508, 544, 532, 553, 574, 575, 577, 593
- неограниченный в плане 41, 132, 152, 165, 178, 255, 264, 272, 298, 300, 307, 312, 317, 323, 354, 361, 363, 374, 386, 391, 418, 439, 440, 447, 452, 520, 527, 534, 544, 550, 570, 590
- -- в разрезе 146, 165, 178, 198, 217, 233, 250, 268, 272, 281, 285, 293, 298
- неоднородный 16
- ограниченный в плане (пласт-полоса) 16, 68, 178, 272, 335, 468
- в разрезе 185, 217, 247, 272, 285, 293
- однородный 16
- переменной мощности 508
- планово-анизотропный 132, 458
- планово-неоднородный 300
- полузакрытый 141
- полуограниченный в плане 16, 57, 165, 263, 319, 335, 464, 515, 517, 524, 530, 538
- --в разрезе 171, 204, 217, 239, 264, 281, 285, 293, 298
- профильно-анизотропный 146, 250, 329, 335, 361, 452, 601
- с перетеканием 16, 328, 340, 391, 527
- угловой 17, 104, 231, 293, 335, 476
- U-образный 18, 89, 217, 285, 335, 480

Пласт-квадрант 16, 104, 196, 281, 476

Пласт-полоса, см. Пласт ограниченный в плане Плотность 24, 745

Понижение 17

- в пьезометре 256, 274, 331, 332
- в разделяющем слое 426, 432, 436, 570
- на контуре кругового пласта 130
- с учетом привлекаемых запасов 129, 340
- среднее 256, 276, 325, 332, 334
- уровня грунтовых вод 325, 334, 339

Пористость 25

Постоянная Эйлера 746

Поток подземных вод 17

Принцип суперпозиции 17

Проводимость 24, 745

- средняя 301
- эффективная 133, 453

Проницаемость 24, 745

Пьезометр 250

Пьезопроводность 24

Радиус влияния 17, 47

Расход из смежного пласта 374

- переменный 53, 402, 495, 499, 514, 577, 588, 609
- -- изменение ступенчатое 579
- --- функциональное 584
- потока 17
- скважины 17, 745

Режим гравитационный 325, 326, 333, 334

подземных вод 17

Решение Максимова 303

- Тейса (Theis) 44
- Щелкачева 312
- Boulton 325
- Bouwer и Rice 598
- Cooper 594
- Faust и Mercer 603
- Fenske 303
- Ferris 595
- Guvonnet 608
- Hantush 349
- Hyorsley 601
- Kamp 608
- Karasaki 605
- Kipp 606
- Moench 335
- Neuman 331
- Nguyen и Pinder 597
- Peres 595
- Picking 596
- Sageev 604
- Vandenberg 79, 473

Система трещин 544

Системы слоистые 327, 340, 360, 361, 391, 527, 570

Скважина большого диаметра 51, 335, 399

- горизонтальная 532
- наклонная 298
- несовершенная по степени вскрытия 146, 250, 329, 335, 338, 361, 439, 452, 597, 598, 602
- -- по характеру вскрытия 315, 603
- фиктивная (отраженная) 17

Скин-эффект, см. Скважина несовершенная по характеру вскрытия

Слой непроницаемый 15, 374

- разделяющий 17, 391
- слабопроницаемый 17, 361, 391

Сопротивление русла реки 26, 347

Способ обработки 26

- -- биссектрисы 34
- графоаналитический 27, 29
- отношения понижений 34, 35, 37

- по набору эталонных кривых 31
- подбор параметров 28, 36
- прямой линии 27, 32
- разности понижений 35
- схематизация 27
- точечный 28, 35
- характерных точек 47
- эталонной кривой 27, 29
- -- Jacob 45

Схема Тейса (Theis) 41

Теорема косинусов 749

- Пифагора 749
- синусов 749

Типизация 18

Трещина вертикальная 533

горизонтальная 544, 570

Трещиновато-пористые породы 544

Уровнепроводность 24

Ускорение свободного падения 24, 745

Фильтр 18

- Фильтрация 18
- параметры 23
- скорость 17, 24
- Формула Дюпюи (Dupuit) 47
- Тима (Thiem) 47
- Форхгеймера 60

Формулы аналитической геометрии 748

решения треугольников 749

Функции Бесселя 616, 671, 677, 680

- вспомогательные 743
- математические 746

Функция влияния скважины 696

- гамма 738
- для скважин большого диаметра 633
- --- с постоянным понижением 613, 722
- для экспресс-опробований 649
- интеграл вероятностей 628
- --- дополнительный 628
- - кратный 630
- ошибок 628
- интегральная показательная 696, 702
- пси 680
- расхода для скважин с постоянным понижением 659,661
- Boulton 637
- Vandenberg 656

Экспресс-опробование 23, 590

Научное издание

Леонид Наумович Синдаловский

Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований

Редактор Л.П. Макаренкова Рисунки выполнены Ю.В. Варнаковой Дизайн обложки Е.И. Егоровой

Лицензия ИД № 05679 от 24.08.2001

Подписано в печать 25.01.2006. Формат $70 \times 100^{-1}/_{16}$. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 62,73. Уч.-изд. л. 71,26. Заказ 3.

Издательство СПбГУ.

199004, Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 11/21. Тел. (812)328-96-17; факс (812)328-44-22

E-mail: editor@unipress.ru www.unipress.ru

Типография Издательства СПбГУ. 199061, С.-Петербург, Средний пр., 41.