

**ИНЖЕНЕРНАЯ
ГИДРОГЕОЛОГИЯ**

**МЕТОДЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД**

МОСКВА — 1962

АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ВОДОСНАБЖЕНИЯ,
КАНАЛИЗАЦИИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ
ГИДРОГЕОЛОГИИ (ВОДГЕО)

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Н. Н. ВЕРИГИН



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ, АРХИТЕКТУРЕ
И СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ
Москва—1962

В книге излагаются методы определения фильтрационных свойств горных пород. В ней описываются конструкции опытных установок для откачек, нагнетаний и налива, которые применяются для определения водопроницаемости, водоотдачи, трещиноватости горных пород. Приводятся способы фильтрационных расчетов.

Книга рассчитана на инженеров-проектировщиков, изыскателей гидротехнического строительства, а также может быть полезна для студентов вузов гидротехнической и гидрогеологической специальностей.

ВНИИ ВОДГЕО
МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

* * *

Госстройиздат
Москва, Третьяковский проезд, д. 1

* * *

Редактор издательства *Г. М. Виноградова*
Технический редактор *Д. Я. Касимов*
Корректор *Л. М. Шустова*

Сдано в набор 30-VIII 1961 г. Подписано к печати 3, I 1962 г.
Т 01304 Бумага 60×90₁₆=5,625 бум. л. 11,25 печ. л.
(10,56 уч. изд.-л.) Тираж 2500 экз. Изд. № VIII-6071
Зак. № 2102 Цена 74 коп. + переплет № 5—10 коп.

Типография № 1 Государственного издательства литературы
по строительству, архитектуре и строительным материалам,
г. Владимир

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы было опубликовано много научных работ по теории движения подземных вод и, в частности, по вопросам действия скважин при откачках и нагнетаниях.

Результаты этих работ могут быть успешно применены для определения различных физических характеристик (параметров) горных пород и грунтов, необходимых для проектирования гидротехнических сооружений, водоснабжения, мелиорации, осушения горных разработок. В частности, на основе новых решений для действия скважин при откачках и нагнетаниях, а также для фильтрации воды при наливах в шурфы могут определяться водопроницаемость пород, пьезопроводимость водоносных пластов, трещиноватость и свободная пористость пород, капиллярность грунтов и другие их водные свойства.

В практике изысканий для строительства новые методы и решения подземной гидродинамики используются далеко не полно и не всегда правильно.

В большинстве случаев на практике применяются способы и приемы, разработанные еще Дюпюи, Тимом, Форхгеймером, Козени, А. К. Болдыревым и другими исследователями в период, когда еще только закладывались основы подземной гидродинамики. В настоящее время часть этих способов полностью устарела, другая — сохранила свое значение, но лишь при определенных условиях.

Вместе с тем в ряде случаев физические свойства пород, в частности пьезопроводимость водоносных пластов, могут быть определены только с помощью методов, разработанных за последние 10 лет и опубликованных в различных периодических изданиях и книгах, затрагивающих более общие вопросы.

Одной из причин недостаточного использования новых методов и решений в практике полевых опытных работ является отсутствие каких-либо сводных пособий и руководств, содержащих систематическое изложение этих методов применительно к оценке фильтрационных свойств пород и грунтов.

Настоящая работа является попыткой устранить этот пробел. В ней описываются конструкции опытных установок для откачек, нагнетаний и наливов, их оборудование, основные вопросы

методики проведения опытов и способы расчета фильтрационных характеристик горных пород. При этом в целях компактности изложения теоретическое обоснование расчетных зависимостей приводится в книге в кратком виде, но с соответствующими ссылками на литературные источники, где дан вывод этих зависимостей. Главы первая — восьмая написаны проф. Н. Н. Веригиным; § 4 главы второй — инж. Р. А. Кицисом; § 11 главы третьей, § 17 главы четвертой и § 24 главы пятой — инж. Б. И. Жигалиным.

Расчеты для таблиц и графиков выполнены и. о. инженера М. В. Афиногеновой и частично инж. Р. А. Кицисом. Примеры расчета составлены М. В. Афиногеновой, Б. И. Жигалиным и Р. А. Кицисом.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД

Определение фильтрационных характеристик (параметров) горных пород в условиях их естественного залегания и структуры имеет важное значение для гидротехнического строительства, водоснабжения, ирригации, дренажа и горного дела.

Как известно, лабораторные исследования фильтрационных свойств пород во многих случаях не могут дать достоверной характеристики этих свойств, так как в малых образцах пород не находят полного отражения их неоднородность в отношении механического и минералогического составов, физико-химических свойств поверхности пор, размеров и распределения трещиноватости. Кроме того, при лабораторных исследованиях некоторых видов грунтов (например, песков, гравия, гальки, обломочных пород) оказывается крайне затруднительным сохранить естественную структуру пород. Вследствие этого в ряде случаев фильтрационные характеристики грунтов, определенные в лаборатории и полевых условиях, различаются между собой во много раз, что неоднократно отмечалось, например, при исследованиях на Москва-Волгострое и других строительствах.

Вместе с тем некоторые физические характеристики зависят не только от свойств пород, но также и от условий их залегания, газового фактора и минерализации воды. К числу таких параметров относится, например, пьезопроводность водоносных пластов, определяющая скорость распространения давления в них и зависящая от комплекса различных свойств пласта. Такие параметры в лабораторных условиях вообще не могут быть определены или требуют при их оценке устройства специальных моделей пласта, для чего необходимы данные полевых исследований. Поэтому полевые определения фильтрационных свойств грунтов необходимы в такой же мере, как и лабораторные исследования.

В настоящей работе рассматриваются основные виды полевых опытных работ для определения фильтрационных характеристик пород: опытные откачки из скважин, опытные нагнетания в скважины, опытные наливов в скважины, опытные наливов в шурфы.

С помощью опытных откачек, а также нагнетаний и наливов в скважины могут определяться коэффициент фильтрации k , величина проницаемости c , коэффициент пьезопроводности a и свободная пористость (или трещиноватость) пород n . Посредством наливов в шурфы в неводоносных породах могут определяться коэффициент фильтрации k , дефицит насыщения пород μ и капиллярный вакуум h_k .

В зависимости от методики опыта и последующего расчета находятся либо все три указанных параметра (k , a , n или k , μ , h_k), либо только часть их. Так, по данным опытных откачек можно определять k и a . Величина n может находиться посредством запуска индикатора (например, красящих веществ) в контрольную скважину и улавливания его в центральной скважине при откачке.

По данным нагнетаний и наливов в скважины в неводоносных породах находятся величины k и n ; величина a определяется с помощью специального, более длительного опыта.

По данным наливов в шурфы могут определяться либо величины k , μ , h_k , либо только k и h_k , если величина μ может быть достаточно обосновано принята по результатам лабораторных исследований, либо, наконец, только k и μ , если величина h_k определена с помощью отдельного опыта в лабораторных или полевых условиях.

Оценка проницаемости горных пород путем откачек из скважин и колодцев впервые начала применяться для водоснабжения за счет подземных вод.

Это имело место в 60—80-е годы прошлого столетия после опубликования работ Дюпюи [31] и А. Тима [63], использовавших теорию потенциального движения жидкости для изучения фильтрации и получивших первые теоретические формулы для определения притока воды к колодцам и скважинам. А. Тим впервые применил формулы Дюпюи для определения коэффициента фильтрации по данным откачек [63]. В 80-х годах прошлого столетия для тех же целей оригинальные методы были предложены Н. Е. Жуковским.

С начала XX столетия этот способ определения проницаемости пород стал широко применяться при изысканиях для гидротехнических сооружений (плотин, шлюзов, гидростанций, каналов), а также для сельскохозяйственной мелиорации и горного дела.

В СССР опытные откачки для указанных целей начали применяться в 1910—1914 гг. А. А. Краснопольским [42] и др. Особенно широкое распространение на изысканиях для гидротехни-

ческого строительства эти методы получили с 1926—1928 гг. В 1928—1955 гг. различные новые способы определения водопроницаемости пород по данным откачек были предложены Н. М. Победоносцевым [52], Н. К. Гириным [24—26], Н. Н. Биндеманом [9—11], Н. Н. Веригиным [14—21], В. Д. Бабушкиным [4—7], М. Ф. Бурлаем [13], Е. Е. Керкисом [35, 36], В. М. Григорьевым [28], В. М. Шестаковым, Б. С. Шержуковым [8, 69] и др.

В начале 30 гг. в нефтяной промышленности по инициативе Л. С. Лейбензона и В. Н. Щелкачева [70, 71] в СССР и М. Маскета [45] в США получили распространение различные способы определения параметров пласта (в том числе и его проницаемости), основанные на использовании данных эксплуатации нефтяных скважин (особенно данных о восстановлении пластового давления при выключении скважин).

После опубликования работ М. Маскета, В. Н. Щелкачева об упругом режиме фильтрации широкое распространение получает определение коэффициента пьезопроводности по данным эксплуатации нефтяных скважин. Различные способы определения этого коэффициента для проектирования разработки нефтяных месторождений были предложены С. Н. Назаровым [47], И. А. Чарным [68], А. Л. Хейном [66], Г. И. Баренблаттом, Ю. П. Борисовым, В. Я. Булыгиным и др.

Для проектирования водоснабжения и гидросооружений были предложены несколько иные способы, основанные на использовании результатов опытных откачек и описанные в работах Н. Н. Веригина [14—21], Н. Н. Биндемана [9—11], В. М. Шестакова [8, 69] и др.

Помимо указанных выше работ, непосредственно относящихся к определению характеристик пород и пластов, имеется весьма большое число исследований, посвященных расчету притока жидкости к скважинам, колодцам и определению понижения давления (напора) в пластах.

Результаты многих из этих работ могут быть широко использованы для оценки параметров пород и пластов.

К числу таких работ относятся весьма ценные исследования по теории действия скважин М. Маскета [45], П. Я. Полубариновой — Кочиной [54], И. А. Чарного [67, 68], М. М. Глаговского, Б. Б. Лапука, В. Н. Щелкачева [70, 71], В. М. Насберга [48], А. Л. Хейна [66] и других авторов.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве работ методы определения параметров основаны на линейном законе фильтрации.

Методы оценки этих параметров при нелинейной фильтрации рассматривались в работах А. А. Краснопольского [42], В. Н. Щелкачева [70], В. М. Насберга [48] и И. А. Чарного [68].

Способ оценки водопроницаемости и мощности заиленной зоны в руслах рек и водоемов по данным откачек предложен

В. Д. Бабушкиным [6]. Ему же принадлежит и ряд приемов для определения водопроницаемости в неоднородных пластах [4].

Несмотря на большое число теоретических исследований действия скважин вообще и, в частности, при опытных откачках, нагнетаниях и наливах, использование этих исследований на практике является неудовлетворительным. В большинстве случаев определяется не весь комплекс фильтрационных характеристик пород, необходимый для инженерных расчетов и проектирования сооружений, а только водопроницаемость пород. При этих определениях до сих пор в основном пользуются методами Дюпюи — Тима для откачек и наливов в совершенные скважины и А. К. Болдырева (или Болдырева — Нестерова) при наливах в шурфы, которые относятся к установившемуся режиму фильтрации в однородных грунтах. Эти методы не могут охватить всего многообразия состава и свойств пород, а также режимов фильтрации, требующих использования различных схем опытов, а также разной методики их проведения и расчета.

Например, при откачках небольшой длительности, когда режим фильтрации имеет резко выраженный неустановившийся характер, формулы Дюпюи — Тима неприменимы.

Равным образом при откачках в пластах, питающихся через слабопроницаемые водоупоры за счет соседних водоносных слоев, а также в пластах, граничащих с более проницаемыми водоносными породами, формулы Дюпюи — Тима не применимы при любой длительности откачек (т. е. при вполне установившемся режиме фильтрации).

При наливах в шурфы в случае малой мощности зоны насыщения, когда градиент потока существенно больше единицы, нельзя пользоваться методом А. К. Болдырева. В этих и многих других случаях необходимы иные схемы опытов и иные методы расчета.

При проведении опытных нагнетаний в большинстве случаев определяется только так называемое удельное водопоглощение, равное расходу воды на 1 м длины опытного интервала и на 1 м повышения давления в опытной скважине. Удельное водопоглощение является лишь относительной характеристикой проницаемости пород, так как оно в значительной мере зависит от размеров опытного интервала (его длины и диаметра) и потому может служить сравнительной характеристикой проницаемости лишь при одинаковых размерах опытных интервалов. В последние годы были указаны и получили некоторое распространение способы определения водопроницаемости пород по данным нагнетаний, основанные на уравнениях установившегося режима фильтрации [1, 9]. Но эти способы применимы только при нагнетаниях в водоносные породы и только при достаточной длительности нагнетаний. За редкими исключениями, вплоть до настоящего времени водопроницаемость пород по данным откачек, нагнетаний и наливов определяется в предположении, что

фильтрация во время опытов является установившейся, при которой все гидродинамические элементы потока (напоры, давления, скорости) со временем не меняются и являются постоянными. В соответствии с этим расчет водопроницаемости производится по уравнениям установившегося движения.

В действительности же фильтрация при опытных откачках, нагнетаниях и наливах является неустановившейся, при которой все гидродинамические характеристики потока изменяются со временем, стремясь к некоторой, относительно стабильной величине. Естественно возникает вопрос, при какой длительности того или иного опыта (откачки, нагнетания, налива) фильтрацию можно считать установившейся и пользоваться соответствующими уравнениями.

Какне-либо критерии, позволяющие судить о степени стабилизации фильтрационного потока, во время опытов отсутствуют. Поэтому на практике вопрос о необходимой длительности опыта решается некоторыми, совершенно условными нормами длительности опыта или степени изменения той или иной его характеристики во время опыта (например, нормируется изменение расхода откачки за тот или иной период времени).

Такое положение приводит, в одних случаях, к тому, что опыты ведутся излишне длительное время, которое не требуется для достоверного определения физических характеристик пород, что вызывает удорожание опытных работ.

В других же случаях, из-за недостаточной длительности опыта, параметры пластов по уравнениям установившегося движения определяются неправильно, причем величина ошибки остается невыясненной.

Например, при определении коэффициента фильтрации по откачке с одной или двумя контрольными скважинами, согласно формуле Дюпюи, коэффициент фильтрации обратно пропорционален разности понижений в расчетных скважинах. При недостаточной стабилизации потока эта разность может быть значительно больше, чем в условиях установившегося движения. Поэтому коэффициент фильтрации оказывается заниженным против действительного в несколько раз.

При откачках сначала с меньшими, а затем с большими понижениями в опытной скважине степень стабилизации потока оказывается наиболее высокой при максимальном понижении. В соответствии с этим водопроницаемость пород, определенная по формуле Дюпюи для меньшего понижения, оказывается более низкой, чем для большего понижения. При откачках сначала с большими понижениями, а затем с меньшими часто наблюдается обратное: водопроницаемость, найденная по малому понижению, оказывается более высокой, чем водопроницаемость, определенная по большому понижению.

Такого рода дефекты полностью устраняются, если для оценки водопроницаемости пользоваться давно известными уравнени-

ями неустановившегося движения, что позволяет в ряде случаев уменьшить длительность опытов и удешевить опытные работы. В тех же случаях, когда стабилизация достигается сравнительно быстро, уравнения неустановившейся фильтрации обращаются в уравнения квази-установившегося движения, частным случаем которых являются формулы Дюпюи—Тима. Тогда параметры достаточно точно определяются по этим уравнениям (в том числе и по формулам Дюпюи — Тима). Опытные нагнетания проводятся обычно быстрее, чем опытные откачки (например, в течение 0,25—1 часа). За это время достаточная степень стабилизации потока чаще всего не достигается. Поэтому для нагнетаний, как правило, необходимо применять уравнения неустановившейся фильтрации.

Таким образом, методы расчета, основанные на уравнениях установившегося движения подземных вод, могут применяться для оценки параметров лишь при определенных, жестко нормируемых условиях. Универсализация же этих методов неизбежно приводит к существенным ошибкам.

Но даже в условиях достаточной стабилизации фильтрационного потока часто применяются ошибочные способы определения параметров.

Так, под влиянием рекомендаций в ряде работ и инструкций получило распространение определение водопроницаемости пород по данным опытных откачек из одиночных скважин при установившемся режиме фильтрации. Такие рекомендации имеются в работах А. И. Силина — Бекчурина [57], И. А. Скабаллановича [58], П. П. Климентова [38], Е. Е. Керкиса [36] и др.

При этом для определения коэффициента фильтрации используется формула Дюпюи, в которую вводится так называемый радиус влияния [57, 58]. Последний считается обусловленным проницаемостью и принимается либо по произвольным рекомендациям в зависимости от рода грунта, либо по разным формулам, в которых радиус влияния зависит от понижения уровня в скважине и водопроницаемости пород.

Между тем, уже после работ Н. Н. Павловского, М. Маскета, П. Я. Полубариновой-Кочиной, С. Н. Нумерова и др. было ясно, что радиус влияния, разграничивающий зону потока, возмущенного откачкой, от остальной его части может быть оценен только при анализе неустановившегося движения с учетом сил инерции и упругости (для безнапорного потока с учетом сил инерции и гравитационных сил). В условиях же установившегося движения вообще, в том числе и движения, описываемого уравнением Дюпюи для скважины, никакого «радиуса влияния» не существует, так как влияние откачки в той или иной мере всегда распространяется до внешних границ пласта. Поэтому в уравнения установившегося движения, в том числе и в формулу Дюпюи, входит не радиус влияния, а расстояние от скважины

до внешней границы пласта (или так называемый радиус питания пласта) [70].

Поэтому по откачке из одиночной скважины при установившейся фильтрации водопроницаемость пласта может быть найдена лишь в том случае, если известны положение и форма внешних границ пласта, на которых напор является заданным (в частности постоянным во времени).

Так как границы пласта обычно достаточно удалены от опытной скважины, то параметры чаще всего целесообразно находить по уравнениям для пласта неограниченных размеров в плане.

Но тогда при откачке из одиночной скважины должны применяться только уравнения неуставившейся фильтрации. При откачках же на опытных кустах в случае недостаточной стабилизации течения должны использоваться те же уравнения неуставившегося движения, а при достаточной стабилизации потока — уравнения устанавившегося движения (формулы Дюпюи—Тима).

Следует отметить, что при опытных откачках и нагнетаниях часто является выгодным применение несовершенных скважин. Они вызывают существенное изменение напоров в сравнительно ограниченной части водоносного пласта и позволяют производить зональные определения параметров по глубине вместо оценки их осредненных значений для всего пласта с помощью совершенных скважин.

В пластах большой мощности несовершенные скважины могут оказаться единственно приемлемыми для опытных откачек и нагнетаний.

Наконец, несовершенные скважины обходятся дешевле, чем совершенные. Несмотря на преимущества несовершенных скважин, методика оценки параметров с помощью откачек из них еще является не вполне удовлетворительной.

Дело в том, что хотя теория движения жидкости при действии несовершенных скважин в условиях стационарного режима фильтрации была разработана М. Маскетом в 1931—1933 гг., использование ее для оценки параметров значительно задержалось. В большинстве работ гидрогеологов по методике опытных откачек вплоть до настоящего времени для расчета несовершенных скважин рекомендуются либо старая эмпирическая формула Форхгеймера, либо введение некоторой «активной зоны», определяемой по Паркеру или с помощью других условных приемов [1, 58].

В лучшем случае в этих работах рекомендуется формула Козени [5], являющаяся весьма приближенной аппроксимацией точного решения М. Маскета. Необходимо отметить, что нередко эта формула воспроизводится с опечатками, допущенными в первой работе Козени и впоследствии исправленными автором [41]. Часто не учитывается также и то обстоятельство, что эта формула не применима при малых длинах скважин.

Очевидно, что после опубликования точных решений задачи о действии несовершенных скважин нет никакой необходимости как в чисто эмпирических формулах, так и в приближенных теоретических решениях этого вопроса. Это обуславливается, прежде всего, тем, что эмпирические формулы при определенных условиях, часто встречающихся на практике, приводят к существенным ошибкам.

Кроме того, предпочтительность точного решения М. Маскета бесспорна еще и потому, что это решение, и особенно его последующие модификации, подробно табулированы, и пользоваться ими в настоящее время проще, чем любыми старыми приближенными приемами. Значительно лучше обстоит дело с определением параметров в случае несовершенных скважин в пласте неограниченной мощности. Весьма простое точное решение этой задачи для установившегося режима фильтрации, полученное Форхгеймером и переработанное Н. К. Гириным, В. М. Насбергом и В. Д. Бабушкиным, применяется на практике с 1949—1950 гг. Заслуга в этом принадлежит В. Д. Бабушкину, который опубликовал ряд работ о действии скважин в пласте большой мощности [5, 7]. В этих работах излагаются уже известные результаты, а также приводится новое решение для случая, когда скважина размещается внутри пласта неограниченной мощности. Он же применил эти методы на изысканиях для различных объектов строительства.

Для неустановившейся фильтрации решение задачи о действии несовершенных скважин в пласте ограниченной и неограниченной мощностей получены в 1953—1957 гг. [14, 66] и еще не нашли применения на практике. Между тем при недостаточной стабилизации потока оценка параметров возможна только с помощью этих решений.

Таким образом, длительное время существует разрыв между возможностями, которые открываются для оценки параметров в связи с развитием теории движения подземных вод, и до сих пор применяющимися на практике устаревшими приемами определения этих параметров.

§ 2. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД

При проведении опытных откачек, нагнетаний и наливов в скважины во всех случаях должна быть намечена определенная расчетная схема опыта, которая зависит от многих факторов.

Главнейшими из них являются следующие:

1) природные геологические условия (мощность пласта, характер его внешних границ в плане и разрезе, степень неоднородности и изотропности пород в пласте);

2) гидравлический тип водоносного пласта (напорный, безнапорный);

3) конструкция опытной скважины (степень вскрытия пласта скважиной, размещение ее рабочей части в пласте);

4) режим откачки (стационарный и нестационарный).

Несмотря на многочисленность этих факторов, все опыты могут быть сведены к ограниченному числу расчетных схем. Для этого при откачках, а также нагнетаниях и наливах в водоносные породы следует размещать опытные и наблюдательные скважины в некотором удалении от внешних границ пласта в плане (от водотоков и водоемов, поверхностей контакта пород разной проницаемости, выходов источников и т. д.).

Тогда независимо от формы пласта и характера его внешних границ фильтрационные характеристики пород могут определяться по уравнениям неограниченного пласта. Это вызывается тем, что влияние удаленных боковых границ пласта является ничтожно малым и на результатах опытов не сказывается даже и при большой их длительности.

Так, например, при определении коэффициента фильтрации по данным кустовой откачки в напорном пласте, ограниченном в плане линией равного напора (полуограниченный пласт), имеем

$$k_n = \frac{q}{2\pi m (s_0 - s_1)} \left[\ln \frac{r_1}{r_0} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{r_1}{2b}\right)^2} \right], \quad (2.1)$$

где q — дебит скважины;

m — мощность пласта;

r_0 — радиус опытной скважины;

r_1 — расстояние наблюдательной скважины от опытной.

s_0 и s_1 — понижения в опытной и наблюдательной скважинах;

b — расстояние от опытной скважины до внешней границы (рис. 1), (наблюдательная скважина размещена на прямой, параллельной внешней границе пласта).

При определении коэффициента фильтрации по данным той же откачки, но с помощью формул для неограниченного пласта (т. е. без учета влияния внешней границы) имеем

$$k_0 = \frac{q}{2\pi m (s_0 - s_1)} \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (2.2)$$

Из условия, чтобы ошибка в величине k по этой формуле не превышала 5%, имеем

$$\frac{k_0 - k_n}{k_n} \leq 0,05, \quad (2.3)$$

что дает

$$\frac{r_1}{b} \leq 2 \sqrt{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{0,1} - 1}. \quad (2.4)$$

При обычных значениях $\frac{r_1}{r_0} = 10 \div 1000$ величина $\frac{r_1}{b} \leq \leq 1 \div 2$ и $b \geq (0,5 \div 1)r_1$.

Следовательно, уже при $b > r_1$ (что почти всегда имеет место на практике) обеспечивается достаточная точность определения водопроницаемости по уравнениям неограниченного пласта.

При неустановившемся режиме фильтрации эти уравнения дадут еще более точный результат.

Для пласта, ограниченного в плане двумя параллельными прямыми равного напора (полосообразный пласт), влияние границы, ближайшей к опытной скважине, будет примерно таким же, как и в случае полуограниченного пласта.

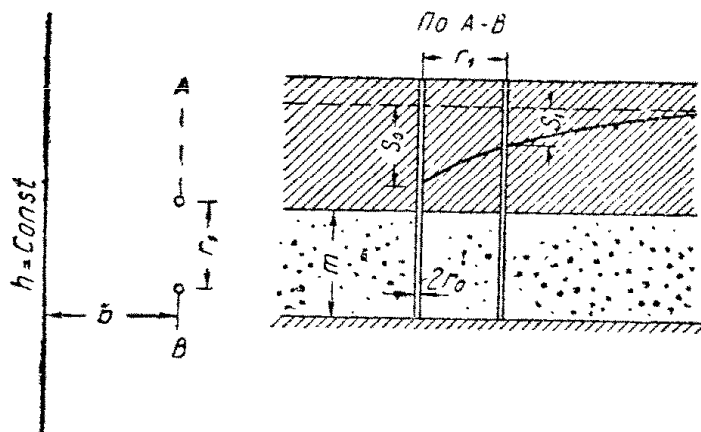


Рис. 1. Схема кустовой опытной откачки в полуограниченном пласте

Влияние же границы, более удаленной от скважины, будет совершенно ничтожным. При неустановившемся режиме в полосообразном пласте их влияние оказывается еще меньшим.

Таким образом, если расстояние наиболее удаленной наблюдательной скважины от опытной меньше, чем расстояние ее от реки,

то во всех случаях для определения параметров следует пользоваться уравнениями неограниченного пласта. Поэтому нет никакой необходимости для оценки параметров применять формулу Форхгеймера для скважины у реки, как это предлагалось В. Д. Бабушкиным [7, 57]. Тем более нет смысла в применении для оценки параметров еще более сложных формул для скважины в полосообразном или других пластах, как это предлагают Ф. М. Бочеввер и Н. Н. Биндеман [9]. Однако это не относится к определению параметров по данным эксплуатации водозаборов. При расстояниях между скважинами, сравнимых с расстояниями до внешних границ пласта, приходится пользоваться уравнениями для пластов разных типов. Более существенно влияние внешних границ исследуемого пласта в вертикальном разрезе (кровля и подошва пласта).

По характеру кровли и подошвы следует различать два основных типа пластов:

- 1) подошва и кровля, относительно менее проницаемые, чем породы исследуемого пласта (пласт типа I);
- 2) подошва и кровля, относительно более проницаемые, чем породы исследуемого пласта (пласт типа II).

В настоящее время имеются достаточно точные решения для скважин в пластах типа I, где рассмотрены совершенные и несовершенные скважины при неустановившемся и установившемся режимах фильтрации. Для скважины в пластах типа II имеются

лишь решения для отдельных частных схем размещения скважин, относящиеся к установившемуся режиму фильтрации.

В связи с этим для пластов типа I параметры следует определять, принимая расчетную схему пласта ограниченной мощности.

Длину рабочей части скважины l необходимо назначать так, чтобы

$$l \geq 0,1 m,$$

где m — мощность пласта.

В случаях же очень большой мощности пласта, когда соблюдение этого условия затруднено, без существенной погрешности может быть принята схема пласта неограниченной мощности. Поэтому приводимые ниже коэффициенты несовершенства скважин ζ вычислены нами только для случаев $\frac{l}{m} > 0,1$ (от 0,1 до 0,9).

Для пластов типа II при определении параметров рекомендуется принимать расчетную схему пласта неограниченной мощности. При этом опытная скважина должна иметь длину рабочей части $l \leq 0,1 m$ и должна быть удалена от ближайшей к ней границы не менее чем на $\frac{1}{3} m$ (m — мощность пласта).

При соблюдении этих условий влиянием границ пласта можно пренебрегать. Схема пласта неограниченной мощности может быть принята для пласта типов I и II также в том случае, если эти условия не соблюдаются, но длительность опыта невелика и влияние границ пласта еще не сказывается.

Таким образом, различие в водопроницаемости исследуемого пласта и пород, залегающих выше и ниже его, может быть учтено посредством сведения к двум расчетным схемам: пласты ограниченной и неограниченной мощностей. Кроме этого, при выборе расчетной схемы опыта необходимо принимать во внимание внутреннюю неоднородность пласта.

Если пласт ограниченной мощности более или менее однороден, то при мощности примерно до 10 м следует устраивать совершенные скважины, а при большей мощности — несовершенные, размещенные у кровли пласта (в напорном потоке) или у свободной поверхности грунтовой воды (в безнапорном потоке). При соблюдении этих условий можно избежать установки чрезмерно длинных фильтров. В этих случаях, по данным опыта, будут определены значения параметров, относящиеся ко всему пласту.

Если пласт ограниченной мощности неоднороден, то опытную скважину целесообразно устраивать несовершенной и размещать в зонах разной проницаемости. При этом в напорном пласте несовершенная скважина может примыкать к его кровле, подошве или располагаться в середине пласта на равных расстояниях от подошвы и кровли. В безнапорном пласте несовершенная скважина может примыкать к свободной поверхности потока, к подошве

пласта или располагаться в середине пласта. В этих случаях из опытов определяются значения параметров для отдельных зон (слоев) водоносного пласта.

В пластах неограниченной мощности, более или менее однородных, опытную скважину рекомендуется располагать у кровли напорного или у свободной поверхности безнапорного пласта.

В случаях неоднородного пласта опытную скважину следует размещать внутри зон разной проницаемости. При этом расстояние от скважины до границ пласта (зоны) должно быть больше $\frac{1}{3}m$, что позволяет применять в этом случае уравнения для пласта бесконечно большой мощности.

При опытных нагнетаниях и наливах в неводоносные породы следует иметь в виду, что в имеющихся решениях не учитываются гравитационные силы. Поэтому здесь важно, чтобы высота зоны водонасыщения пород h , образующаяся при нагнетании или наливах, была значительно меньше напора в опытной скважине s_0 (примерно $h < 0,1 s_0$).

Ввиду этого здесь при мощности пласта до 4—5 м принимается схема пласта ограниченной мощности. При этом для упрощения схемы фильтрации рекомендуется устраивать совершенную опытную скважину. При мощности же более 5 м принимается схема пласта неограниченной мощности, и скважина устраивается несовершенной. В этом случае зона водонасыщения, образующаяся у скважины, за время опыта не доходит до границ пласта.

Таким образом, в зависимости от мощности пласта, характера его границ, типа потока и обусловленной ими конструкции скважин можно наметить следующие расчетные схемы:

- 1) пласт ограниченной мощности:
 - а) *напорный*
скважина у кровли или подошвы пласта;
скважина в середине пласта;
 - б) *безнапорный*
скважина у свободной поверхности;
скважина у подошвы пласта или внутри пласта;
- 2) пласт неограниченной мощности:
 - а) *напорный*
скважина у кровли пласта;
скважина внутри пласта;
 - б) *безнапорный*
скважина у свободной поверхности пласта;
скважина внутри пласта.

Во всех этих случаях режим опыта также может быть различным. Например, откачки и нагнетания могут производиться с постоянным расходом или понижением в опытной скважине.

Приведенные здесь схемы опытных откачек, нагнетаний и наливов в скважины в последующих главах несколько дифференцируются и рассматриваются более подробно. Расчетные схемы наливов в шурфы рассмотрены отдельно.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ ИЗ СКВАЖИН

§ 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК, УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В соответствии с изложенным выше, опытные откачки разделяются на различные их виды:

в зависимости от мощности пласта:

из скважин в пластах относительно небольшой (ограниченной) мощности (рис. 2);

из скважин в пластах относительно большой (неограниченной) мощности (рис. 3);

в зависимости от режима фильтрации:

установившийся (стационарный) режим, при котором все гидродинамические характеристики потока (напоры, понижения, давления, скорости) не изменяются со временем;

неустановившийся (нестационарный) режим, при котором гидродинамические характеристики потока изменяются со временем.

Помимо этих видов режима различают еще квази-стационарный режим, при котором распределение напоров и других гидродинамических характеристик в потоке является близким к стационарному, но вместе с тем они изменяются во времени;

в зависимости от типа водоносного пласта:

напорный;

безнапорный;

в зависимости от режима откачки:

при постоянном дебите;

при постоянном понижении;

в зависимости от наличия или отсутствия контрольных скважин:

откачки из одиночных опытных скважин;

откачки из опытных скважин, имеющих наблюдательные (контрольные) скважины (кустовые откачки);

в зависимости от конструкции скважин и размещения их водоприемной части в пласте:

совершенные;

несовершенные:

- а) с рабочей частью у кровли или подошвы водоносного пласта;
- б) с рабочей частью внутри пласта.

Кроме того, в безнапорных пластах приходится различать опытные скважины: с затопленным фильтром, у которых динамический уровень находится выше верха фильтра, и с незатопленным фильтром, у которых динамический уровень располагается ниже верха фильтра.

Во всех указанных случаях расчетная гидродинамическая схема фильтрации и уравнения для определения параметров являются различными.

Схема ограниченной мощности пласта принимается в случаях, когда в его подошве и кровле залегают менее проницаемые породы, а мощность пласта m удовлетворяет условию

$$m \leq 10l \text{ или } \frac{l}{m} \geq 0,1, \quad (3.1)$$

где l — длина водоприемной части скважины.

Схема неограниченной мощности пласта принимается в случаях, когда в его подошве и кровле залегают породы любой проницаемости (в том числе и более проницаемые), а мощность пласта m удовлетворяет условию

$$m \geq 10l \text{ или } \frac{l}{m} \leq 0,1. \quad (3.2)$$

Кроме того, схема неограниченной мощности пласта может приниматься при малой длительности откачки, когда влияние границ пласта является несущественным. Методы определения параметров при установившемся и неустойчивом режиме фильтрации применяются в зависимости от степени стабилизации фильтрационного потока вблизи опытной и наблюдательных скважин.

В качестве критерия, определяющего степень стабилизации фильтрационного потока при откачках, нами введено суммарное сопротивление при квази-стационарной фильтрации p . Величина p определяется в зависимости от понижений (при $q = \text{const}$) или дебитов (при $s_0 = \text{const}$) для каких-либо двух моментов времени, прошедших после начала откачки, или в зависимости от понижений в двух скважинах (центральной и наблюдательной или двух наблюдательных) на какой-либо один момент времени t .

При некоторых определенных значениях p режим фильтрации оказывается настолько близким к установившемуся, что определение фильтрационных характеристик может производиться по уравнениям стационарного и квази-стационарного режимов (приближенные формулы).

В остальных случаях фильтрационные характеристики определяются по уравнениям нестационарного режима фильтрации (точные формулы).

Следует отметить, что по уравнениям стационарной фильтрации определяется только коэффициент проницаемости пород k , а по уравнениям квази-стационарной и нестационарной фильтрации — коэффициент проницаемости k и коэффициент пьезопроводимости a . При этом для определения k по уравнениям стационарного режима необходимы, по крайней мере, две скважины (центральная и контрольная или две контрольные). Для определения же k и a по уравнениям нестационарного режима требуется одна скважина (центральная или контрольная). В случае напорного пласта формулы для определения параметров являются результатом точного решения линеаризованного уравнения неустановившегося движения подземных вод при действии одиночной скважины в неограниченном пласте.

В случае безнапорного пласта эти формулы являются результатом решения линеаризованного уравнения фильтрации для тех же условий, но при дополнительном допущении о том, что сопротивление, обусловленное несовершенством скважин, в безнапорном пласте имеет ту же величину, что и в напорном. Это допущение обосновывается сравнением результатов расчета с данными экспериментов, которые были выполнены инж. Р. А. Кицисом. Сравнение показало, что приравнивание сопротивления в обоих случаях приводит к ошибке не более 15%. Чтобы ошибка не превосходила указанной величины, при оценке сопротивления, обусловленного несовершенством скважин, мощность безнапорного пласта m и длина водоприемной части скважины l должны быть осреднены. Способ такого осреднения указывается ниже.

При откачках следует поддерживать либо постоянный во времени расход скважины ($q = \text{const}$), либо постоянное во времени понижение в опытной скважине ($s_0 = \text{const}$). Какие-либо другие режимы откачки приводят к усложнению оценки фильтрационных характеристик пород и потому нецелесообразны.

В случае постоянного расхода для определения этих характеристик рекомендуется применять два способа:

по одной скважине: в этом случае должны быть известны два понижения s_1 и s_2 в какой-либо одной скважине (центральной или контрольной) для двух различных моментов времени после начала откачки t_1 и t_2 ;

по двум скважинам: в этом случае должны быть известны понижения в двух различных скважинах (центральной и контрольной или двух контрольных) s_1 и s_2 для какого-либо одного момента времени после начала откачки t .

В случае постоянного понижения в опытной скважине для определения параметров также рекомендуются два способа:

по одной скважине: здесь должны быть известны два дебита q_1 и q_2 опытной скважины и два понижения в контрольной или центральной скважинах для двух различных моментов времени t_1 и t_2 (в центральной скважине понижение постоянное и потому для обоих моментов времени оно будет одинаковым);

по двум скважинам: здесь должны быть известны понижения s_1 и s_2 в каких-либо двух скважинах (в центральной и контрольной или в двух контрольных) и дебит опытной скважины в какой-нибудь момент времени после начала откачки t .

При откачках из одиночных скважин следует применять первый способ, а при откачках на опытных кустах — первый и второй, способы, которые в этом случае взаимно контролируют друг друга.

Величины s_1 , s_2 и q_1 , q_2 , необходимые для определения параметров, выбираются по графикам $s=f(t)$ и $q=f(t)$, полученным при откачках. При этом величины s_1 и s_2 , а также q_1 и q_2 назначаются так, чтобы максимальные ошибки измерения понижения Δs и дебита Δq удовлетворяли условиям

$$\frac{\Delta s}{s_2 - s_1} \leq 0,05 - 0,1; \quad (3.3)$$

$$\frac{\Delta q}{q_1 - q_2} \leq 0,05 - 0,1. \quad (3.4)$$

При соблюдении этих условий ошибка при определении k за счет неточности измерения s и q не превысит 5—10%. Например, если максимально возможная ошибка при измерении понижения $\Delta s=2$ см, то разность понижений, принимаемых для определения параметров $s_2 - s_1$, должна быть не менее 0,2—0,4 м.

В пластах, подстилаемых и перекрываемых менее проницаемой породой, имеющих небольшую мощность (примерно до 10 м), сравнительно однородных, рекомендуется применять при откачках совершенные скважины, у которых длина водоприемной части равна мощности (рис. 2 а, 1 и б, 1).

В пластах, граничащих с менее проницаемыми породами, но при значительной мощности (порядка 10—50 м) или неоднородных рекомендуется устраивать несовершенные скважины $\left(\frac{l}{m} < 1\right)$ и для расчета принимать схему пласта ограниченной мощности (рис. 2, а, 2, 3 и б, 2, 3).

В пластах, граничащих с более проницаемыми породами или имеющих весьма большую мощность (примерно более 50 м), рекомендуется устраивать несовершенные скважины, удаленные от границ пласта на расстояние $s_0 > m/3$, и для расчетов принимать схему пласта неограниченной мощности (рис. 3, а, 2 и б, 2).

При этом в однородных пластах водоприемную часть скважины следует располагать у границы с менее проницаемыми породами в напорном пласте (рис. 3, а, 1) и у свободной поверхности потока в безнапорном пласте (рис. 3, б, 1).

В неоднородных пластах водоприемную часть скважины следует размещать в зонах с предположительно различной проницаемостью. Относительно кровли и подошвы пласта (или его зоны) водоприемная часть опытной скважины закладывается следующим образом:

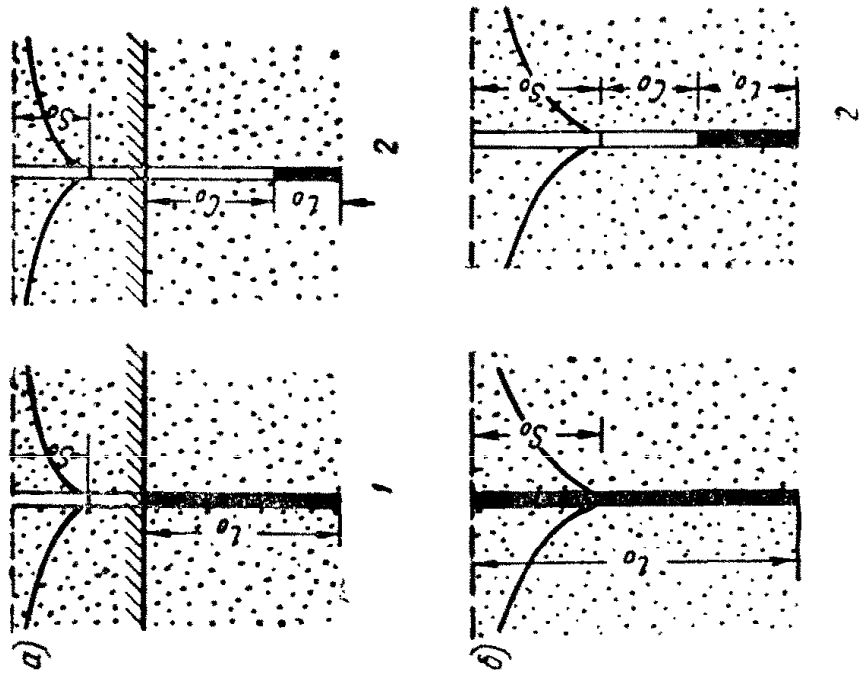


Рис. 3. Расчетные схемы опытных откачек из скважин в пласте неограниченной мощности

а — напорный пласт; б — безнапорный пласт

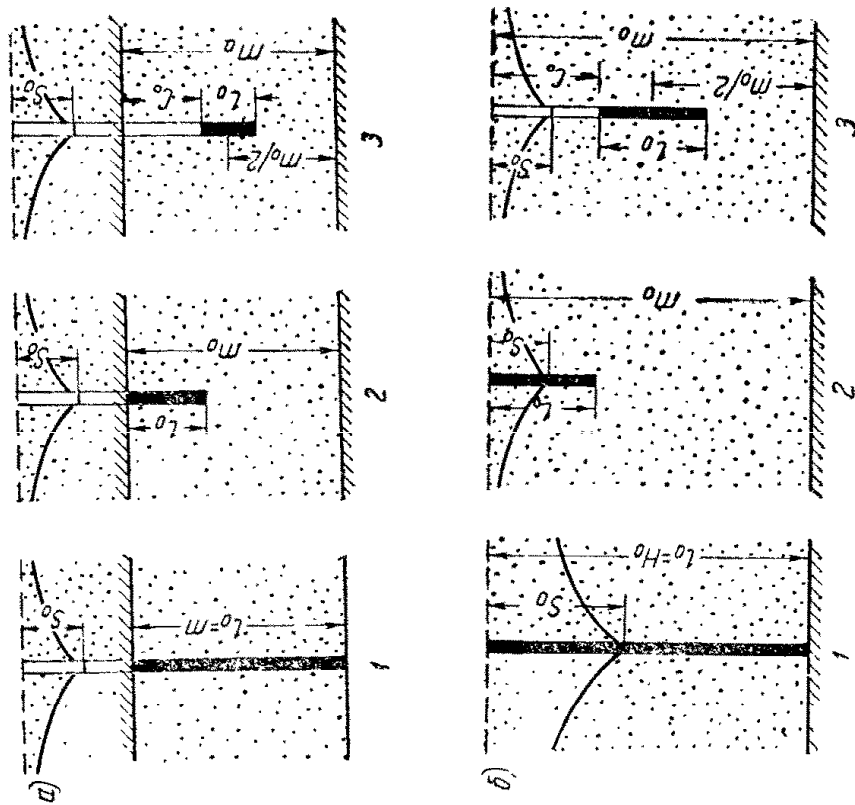


Рис. 2. Расчетные схемы для опытных откачек из скважин в пласте ограниченной мощности

а — напорный пласт; б — безнапорный пласт

а) напорный пласт (рис. 2, а):
у кровли или подошвы пласта (рис. 2, а, 2);
в середине пласта (рис. 2, а, 3).

В случае 2 при размещении водоприемной части скважины у кровли и подошвы пласта расчетные формулы для определения параметров одинаковы. В случае 3 ввиду симметрии в рас-

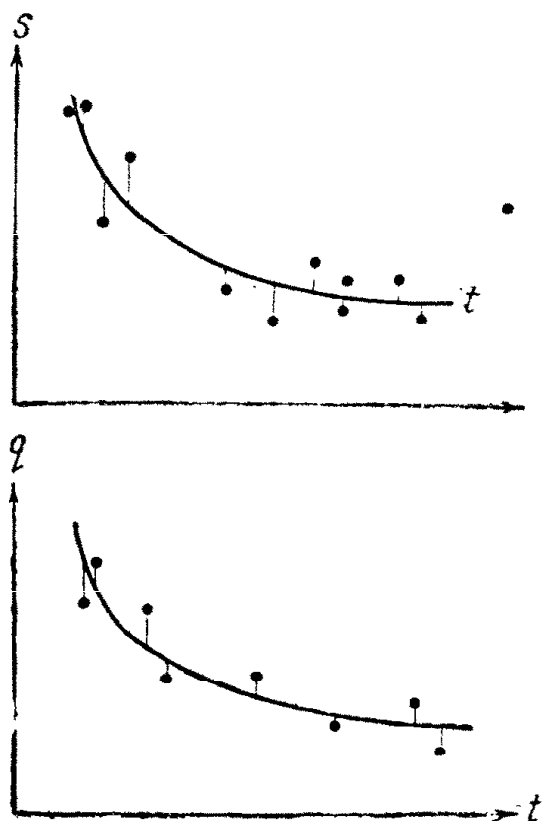


Рис. 4. Графики зависимости $S=f(t)$ и $q=f(t)$

положении фильтра расчетные формулы остаются теми же, но в них величины q , m , l уменьшаются вдвое (т. е. рассматривается верхняя или нижняя симметричная половина потока). Размещать фильтр в пласте асимметрично, т. е. на разных расстояниях от кровли и подошвы пласта, не рекомендуется, так как в этом случае формулы для оценки параметров являются сложными.

б) безнапорный пласт (рис. 2, б):

у свободной поверхности пласта (незатопленный фильтр) (рис. 2, б, 2);

у подошвы пласта или в середине его (затопленный фильтр) (рис. 2, б, 3).

Наиболее достоверно фильтрационные свойства пород определяются по понижениям в контрольных скважинах. По-

нижения в центральной скважине используются для определения параметров при условии, что из них вычитается потеря напора в фильтре, его обсыпке и т. д.

При опытных откачках с контрольными скважинами длина и размещение рабочей части контрольных скважин по высоте должны быть такими же, как и в опытной скважине.

Как правило, необходимо иметь один луч, расположенный примерно по нормали к направлению естественного потока подземных вод. На нем рекомендуется устраивать одну или две наблюдательные скважины.

При исследовании анизотропии пород в плане необходимо оборудовать два луча наблюдательных скважин с одной-двумя контрольными скважинами на каждом [4, 69].

В результате откачек получают данные об изменении дебита q и понижений s в опытной и наблюдательных скважинах от времени. Эти данные в виде отдельных точек наносятся на графики $s=f(t)$ и $q(t)$ (рис. 4).

Затем по данным точкам проводится осредненная плавная кривая.

При этом суммы расстояний от кривой до точек, расположенных выше и ниже ее, по абсолютной величине должны быть одинаковыми.

Для определения параметров все данные о дебитах и понижениях на тот или иной момент времени принимаются по осредненной кривой.

§ 4. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК ИЗ СКВАЖИН

Установка для опытных откачек имеет следующие основные элементы (рис. 5).

Опытная скважина, оборудованная для откачки, состоит из нижней водоприемной части скважины, в которой устанавли-

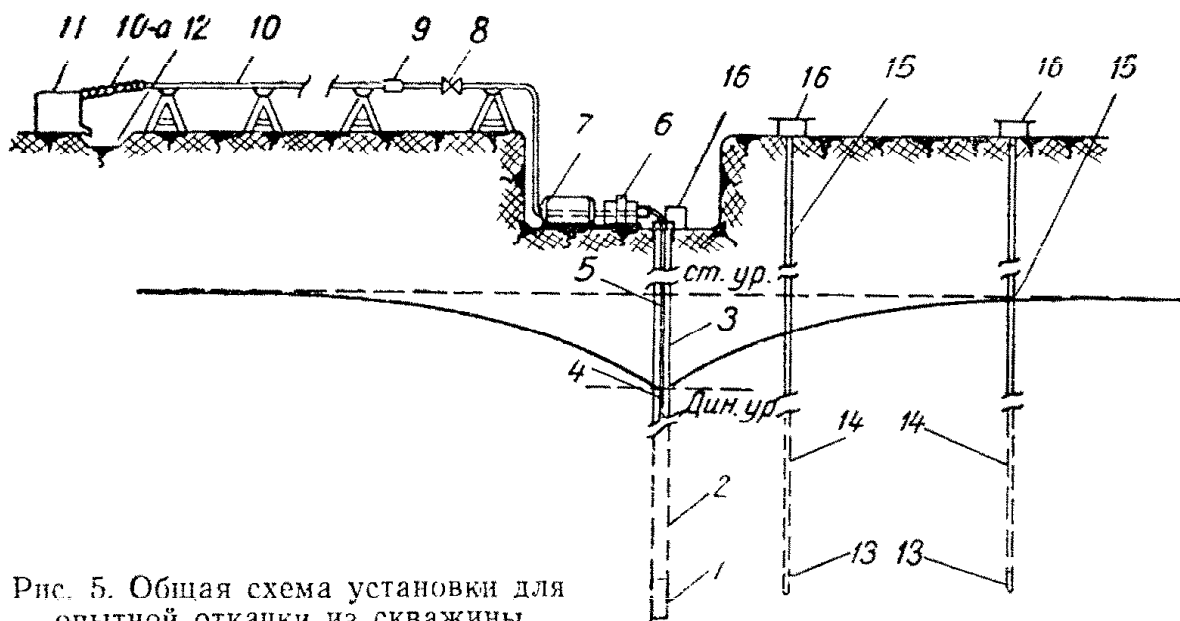


Рис. 5. Общая схема установки для опытной откачки из скважины

1 и 13 — отстойники; 2 — фильтр; 3 — обсадные трубы; 4 — всасыватель; 5 — всасывающая труба; 6 — насос; 7 — двигатель; 8 — регулятор дебита; 9 — водомер; 10 — водоотводной коллектор со шлангом (10-а); 11 — мерная емкость; 12 — сборная канава; 14 — фильтр; 15 — колонна обсадных труб; 16 — приборы для измерения уровня воды, температуры и отбора проб

ливаются фильтр с отстойником, и верхней водоподъемной части, изолированной от вышележащих водоносных горизонтов обсадными трубами, в которых размещаются водоподъемные трубы насоса.

Водоподъемное оборудование:

- а) насос с всасывающими и напорными трубами;
- б) двигатель или компрессор (при откачках эрлифтом).

Вспомогательное оборудование:

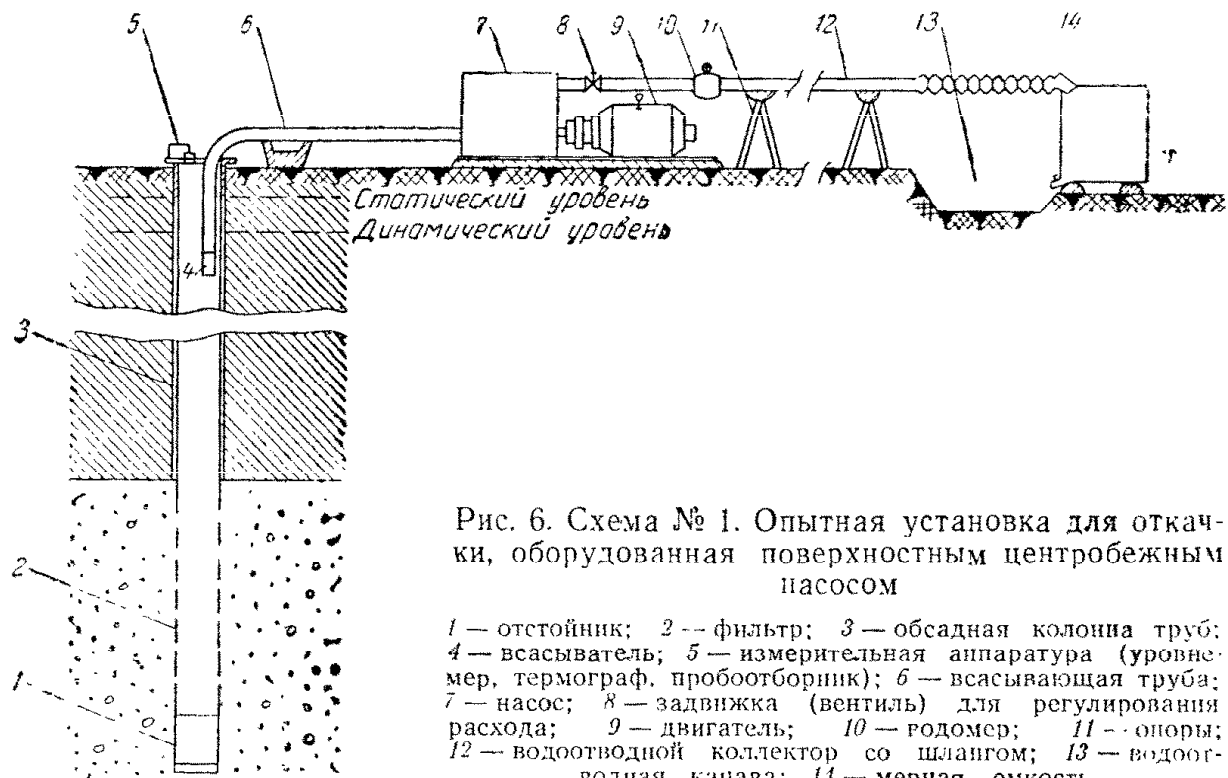


Рис. 6. Схема № 1. Опытная установка для откачки, оборудованная поверхностным центробежным насосом

1 — отстойник; 2 — фильтр; 3 — обсадная колонна труб; 4 — всасыватель; 5 — измерительная аппаратура (уровнемер, термограф, пробоотборник); 6 — всасывающая труба; 7 — насос; 8 — задвижка (вентиль) для регулирования расхода; 9 — двигатель; 10 — родомер; 11 — опоры; 12 — водоотводный коллектор со шлангом; 13 — водоотводная канава; 14 — мерная емкость

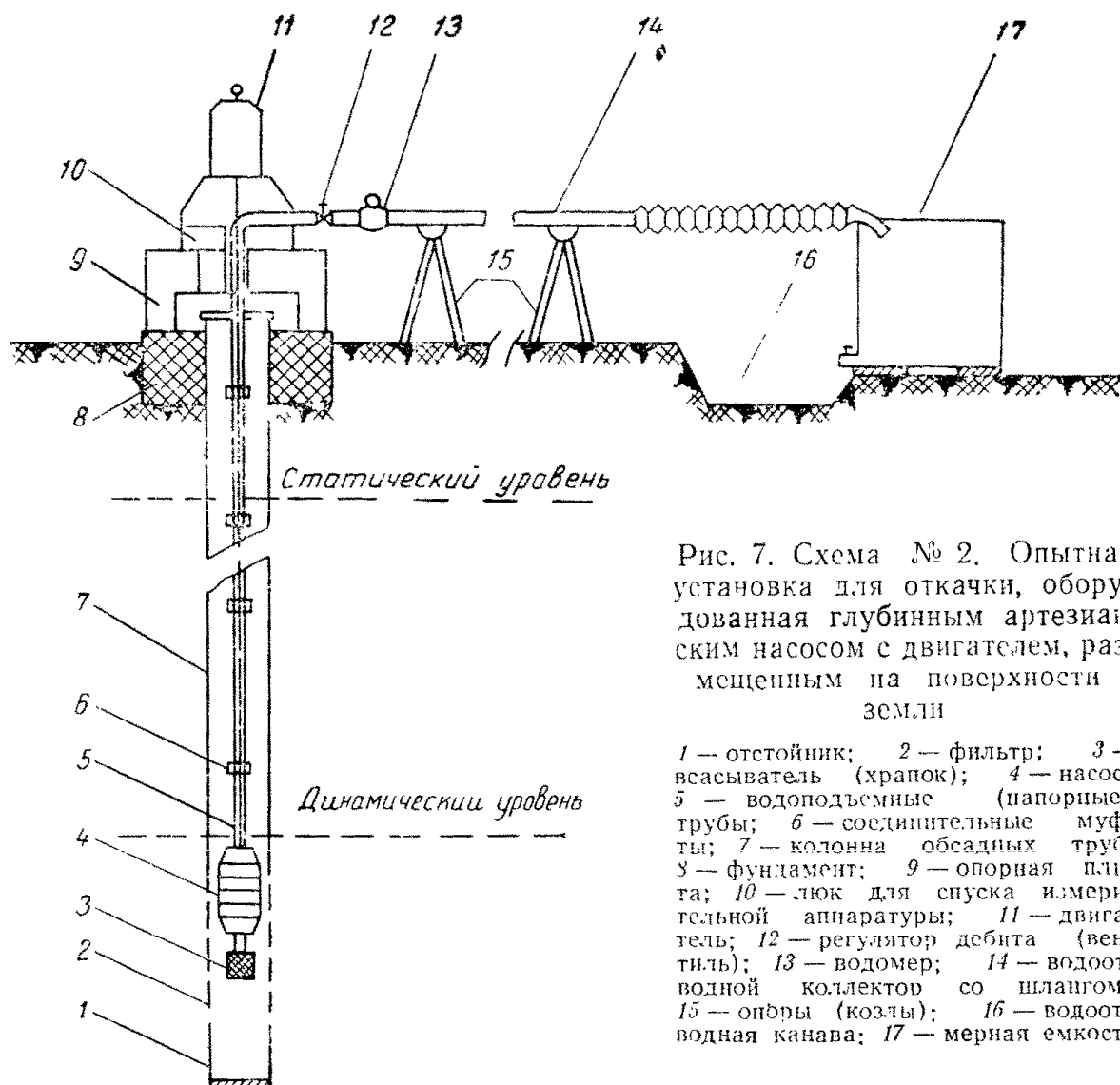


Рис. 7. Схема № 2. Опытная установка для откачки, оборудованная глубинным артезианским насосом с двигателем, размещенным на поверхности земли

1 — отстойник; 2 — фильтр; 3 — всасыватель (храпок); 4 — насос; 5 — водоподъемные (напорные) трубы; 6 — соединительные муфты; 7 — колонна обсадных труб; 8 — фундамент; 9 — опорная плита; 10 — люк для спуска измерительной аппаратуры; 11 — двигатель; 12 — регулятор дебита (вентиль); 13 — водомер; 14 — водоотводный коллектор со шлангом; 15 — опоры (козлы); 16 — водоотводная канава; 17 — мерная емкость

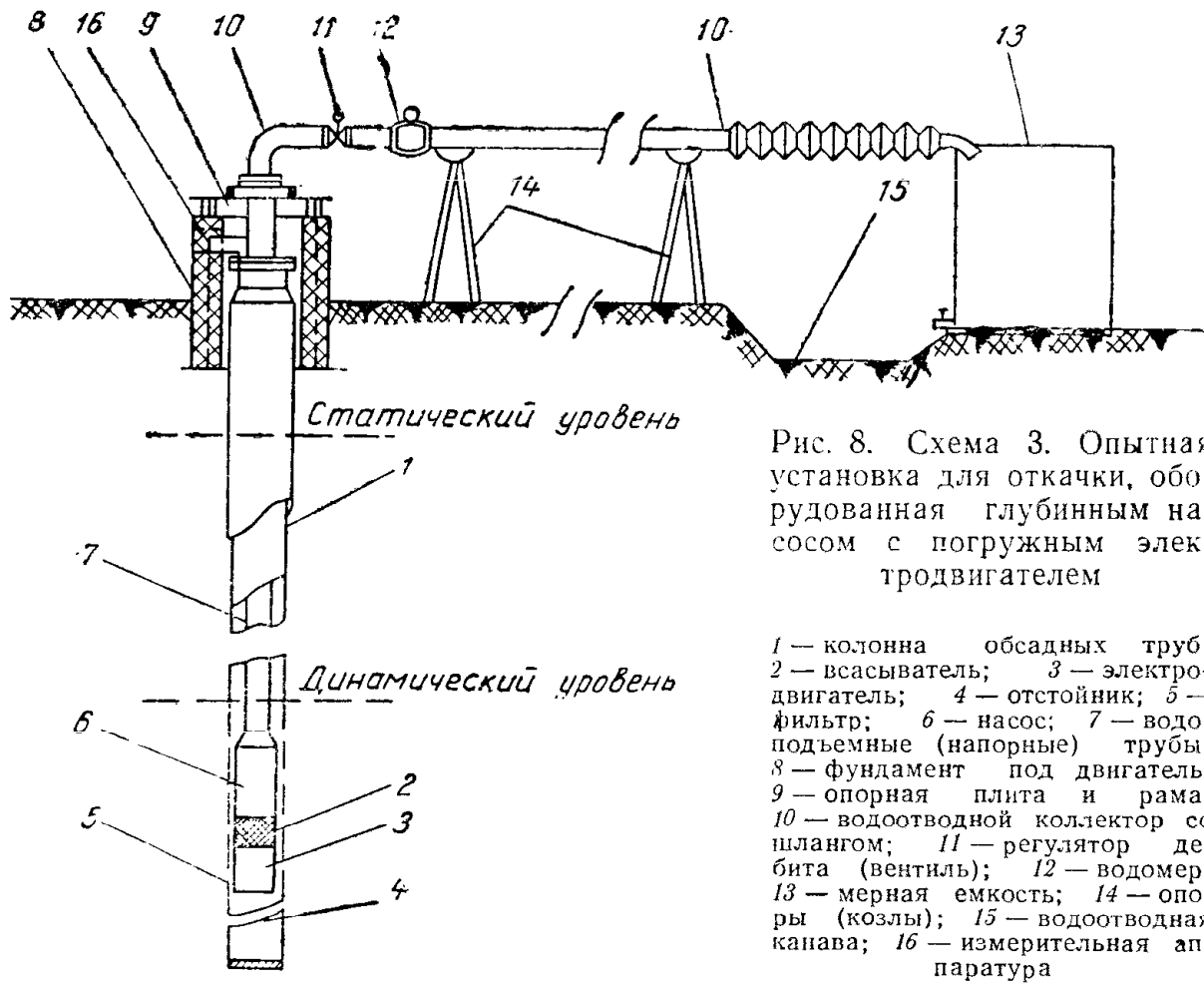


Рис. 8. Схема 3. Опытная установка для откачки, оборудованная глубинным насосом с погружным электродвигателем

- 1 — колонна обсадных труб;
- 2 — всасыватель;
- 3 — электродвигатель;
- 4 — отстойник;
- 5 — фильтр;
- 6 — насос;
- 7 — водоподъемные (напорные) трубы;
- 8 — фундамент под двигатель;
- 9 — опорная плита и рама;
- 10 — водоотводной коллектор со шлангом;
- 11 — регулятор дебита (вентиль);
- 12 — водомер;
- 13 — мерная емкость;
- 14 — опоры (козлы);
- 15 — водоотводная канава;
- 16 — измерительная аппаратура

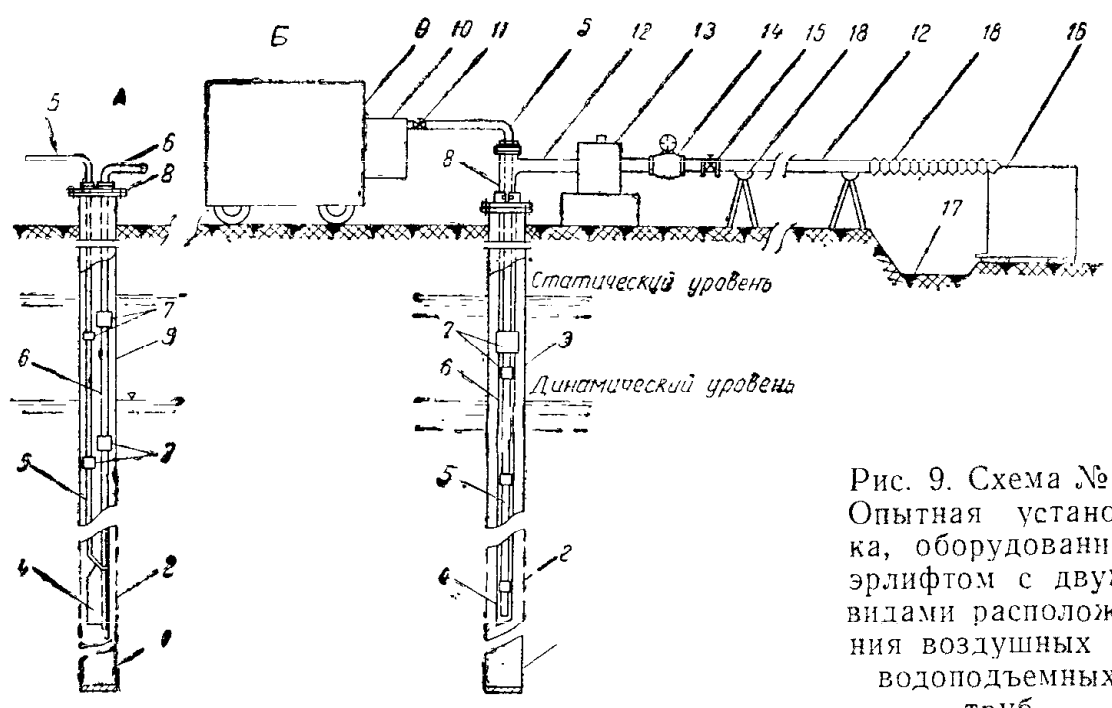


Рис. 9. Схема № 4. Опытная установка, оборудованная эрлифтом с двумя видами расположения воздушных и водоподъемных труб

- А — рядом; Б — центральная;
- 1 — отстойник;
- 2 — фильтр;
- 3 — обсадные трубы;
- 4 — смеситель;
- 5 — воздушные трубы;
- 6 — водоподъемные трубы;
- 7 — соединительные муфты;
- 8 — оголовок (с опорными фланцами, хомутами и сальниками);
- 9 — компрессор;
- 10 — ресивер;
- 11 — вентиль ресивера;
- 12 — водоотводной коллектор со шлангом;
- 13 — сепаратор;
- 14 — водомер;
- 15 — вентиль;
- 16 — мерная емкость;
- 17 — водосбросная канава;
- 18 — опоры

- а) оборудование для монтажа и демонтажа насосов и водоподъемных труб, включающее буровую вышку, лебедки или кран;
- б) водоотводное и водосбросное оборудование;
- в) измерительная аппаратура.

Контрольные (наблюдательные) скважины. В зависимости от типа насоса могут иметь место следующие четыре схемы установки для опытных откачек:

а) опытная установка, оборудованная поверхностным центробежным насосом (рис 6);

б) опытная установка, оборудованная глубинным артезианским насосом с двигателем, размещенным на поверхности земли (рис. 7);

в) опытная установка, оборудованная глубинным артезианским насосом с погружным электродвигателем (рис. 8);

г) опытная установка, оборудованная эрлифтом (рис. 9), описание которого приводится ниже.

Основные элементы установок для опытных откачек этих типов показаны на рис. 5. Ниже они характеризуются более подробно.

Опытная скважина

Конструкция опытной скважины приведена на рис. 10. Ствол скважины в процессе бурения крепится несколькими колоннами обсадных труб с уменьшением их диаметра книзу.

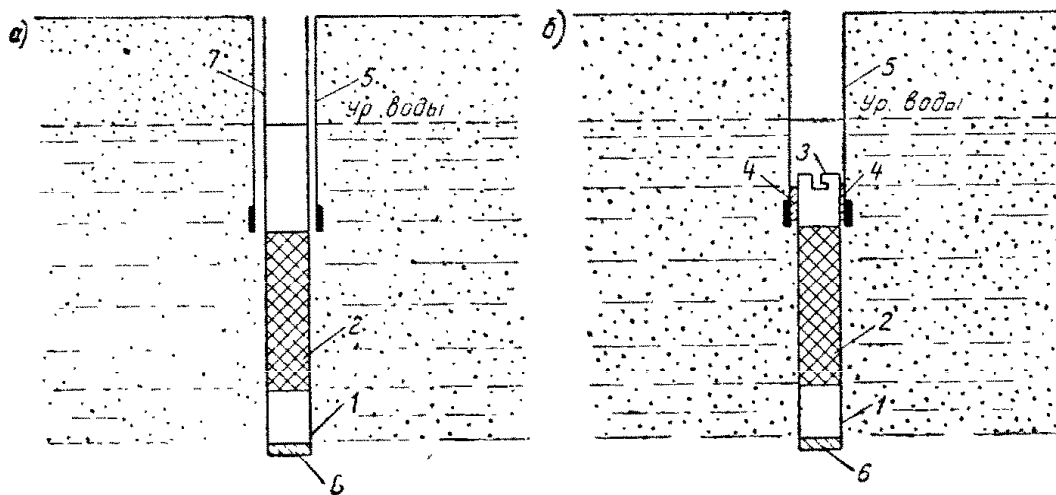


Рис. 10. Схема фильтра опытной скважины

а — с водоподъемными трубами; б — без водоподъемных труб; 1 — отстойник; 2 — фильтр; 3 — замок; 4 — сальник; 5 — колонна обсадных труб; 6 — пробка; 7 — колонна водоподъемных труб

Первая колонна наибольшего диаметра — направляющая (кондуктор). Последующие — промежуточные обсадные; число их зависит от глубины водоносного горизонта и характера пород. Последняя колонна труб имеет наименьший диаметр.

Для бурения опытных скважин могут применяться все существующие механические способы бурения: ударно-канатное, враща-

Способы бурения скважины

Таблица 1

№ п. п.	Способ бурения	Условия применения	Пределная глубина бурения в м	Марки станков	Двигатели
1	Механический ударно-канатный	При бурении глубоких скважин с большим начальным диаметром (до 900 мм)	500	75, БУ-20-2, ВС-150-111, УКС-20, УКС-22, УКС-30	Электродвигатели и двигатели внутреннего сгорания
2	Механический вращательный. колонковый	При бурении глубоких скважин в твердых породах с малым начальным диаметром (до 200 мм)	500	КАМ-500, ЗИФ 150, ЗИФ-300	А 22, КЛ-35, электродвигатели
3	Механический роторный	При бурении глубоких скважин с большим начальным диаметром (до 350 мм)	800	АВБ-3-100, УРБ-3АМ, УВБ-300, АВБ-400, БА-40М	ЗИС-150 (90 л. с.), ДТ-54, КДМ-46, ЗИС-120 (90 л. с.), ЯАЗ-20 (110 л. с.), В-2-300 (300 л. с.)
4	Ударно-вращательный ручной	При бурении скважин в рыхлых породах глубиной до 30—50 м с начальным диаметром до 150 мм	30—50	Комплекты ручного бурения разного диаметра	—

тельное колонковое, роторное. В табл. № 1 указаны условия применения этих способов и наиболее употребительные марки отечественных буровых станков.

Из этих способов бурения скважин наибольшее распространение получили ударно-канатный, вращательный, колонковый, в последние годы — роторный.

Для проведения опытной откачки из водоносного горизонта, вскрытого скважиной, весьма существенно правильно выбрать конструкцию ее водоприемной части.

Водоприемная часть скважины. В зависимости от характера и свойств водоносных пород водоприемная часть опытных скважин бывает двух видов:

безфильтровая (при откачках из устойчивых трещиноватых скальных и полускальных пород);

с фильтром (при откачках из рыхлых неустойчивых пород).

Конструкции фильтров (согласно ТУ СН 14-57)

№ п/п	Характеристика водоносного горизонта	Тип и конструкция фильтров и род материалов	Размеры проходных отверстий или № сеток
1	Скальные и полускальные устойчивые породы	Установки фильтра не требуется	—
2	Полускальные неустойчивые породы; щебенистые и галечниковые с преобладающей крупностью частиц щебня и гальки от 10 до 100 мм (вес частиц от 10 до 100 мм составляет более 50%)	Трубчатые фильтры с круглой или щелевой перфорацией Каркасно-стержневые фильтры без проволоочной обмотки	Диаметр круглых отверстий 10—25 мм; щелевых отверстий ширина 10—15 мм; длина 150—250 мм; размер щелей каркасно-стержневых фильтров 15××200 мм
3	Гравий, песок крупный, гравелистый с крупностью частиц от 1 до 10 мм и с преобладающей крупностью частиц от 2 до 5 мм (вес частиц 2—5 мм составляет более 50%)	Трубчатые фильтры с круглой перфорацией. Щелевые фильтры всех типов. Каркасные фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали	Ширина щелей 2,5—5 мм, длина 50—200 мм. Диаметр круглых отверстий 5—10 мм
4	Пески крупные с преобладающим размером частиц 1—2 мм (вес частиц 1—2 мм составляет более 50%)	Щелевые фильтры всех типов. Фильтры с сетками квадратного плетения на трубчатых каркасах. Сетки из латуни и нержавеющей стали устанавливаются на каркасах с помощью подкладочной проволоочной спирали из нержавеющей стали и винипласта или с помощью подкладочной сетки из винипласта	Ширина щелей 1,25—3 мм Сетка с размером ячейки от 1×1 до 2×2 мм (по ГОСТ 6013—53)
5	Пески средние с преобладающей крупностью частиц от 0,25 до 0,5 мм (вес частиц 0,25—0,5 мм составляет более 50%)	Гравийные фильтры с однослойной обсыпкой и различными типами фильтров (каркасно-стержневыми, проволоочными, щелевыми, сетчатыми). Материалы и конструкция фильтрующей части—согласно п. 4 настоящей таблицы	Ширина щелей на каркасно-стержневых и щелевых фильтрах подбирается в зависимости от преобладающей крупности частиц обсыпки. Сетки гладкие—от № 6/70 до 10/70. Отверстия на трубчатых каркасах под сетку 15—20 мм

№ п.п.	Характеристика водоносного горизонта	Тип и конструкция фильтров и род материалов	Размеры проходных отверстий или № сеток
6	Пески мелкие с преобладающей крупностью частиц 0,1—0,25 мм (вес частиц 0,1—0,25 мм составляет более 50%)	Гравийные фильтры с двухслойной песчаной или песчано-гравийной обсыпкой, с опорными каркасами: стержневыми, щелевыми, сетчатыми. Кожуховые фильтры с песчано-гравийным заполнением	Ширина отверстий на фильграх подбирается в зависимости от преобладающей крупности частиц обсыпки. Сетки—от № 6/70 до 10/70. Отверстия на трубчатых опорных каркасах под сетку круглые до 15—20 мм; щели шириной 7—10 мм, длиной до 100 мм

Фильтры опытных скважин должны отвечать следующим требованиям: обладать минимальным входным сопротивлением; не должны пропускать песчаных, глинистых и других взвешенных частиц в скважину; должны быть устойчивыми в отношении коррозии и эрозии.

Фильтр опытной скважины состоит из следующих частей (рис. 10):

1) верхняя надфильтровая, состоящая из глухой трубы и замка для установки и подъема фильтра с сальником для уплотнения зазора между стенками фильтра и обсадной трубой (в случае установки фильтра впсайд);

2) средняя водоприемная (служит для пропуска воды в скважину).

В зависимости от свойств водоносных пород конструкции водоприемной части фильтров могут быть различными (щелевые, сетчатые, каркасные, из пористых материалов и т. д.);

3) нижняя — отстойник, представляющий собой глухую трубу, закрытую снизу пробкой и служащую для сбора взвешенных в воде частиц породы, проникших через водоприемную часть фильтра.

Основные типы и конструкции фильтров указаны в табл. 2, заимствованной у В. М. Гаврилко [22]. Размеры проходных отверстий фильтров, прилегающих к естественной водоносной породе, рекомендуется определять по табл. 3.

В трубчатых фильтрах с круглой или щелевой перфорацией скважность следует принимать до 20—25 %.

В фильтрах же с проволочной обмоткой и каркасно-щелевых, исходя из условий их прочности, следует принимать скважность до 40—60 % (в зависимости от толщины проволоки, стержней и расстояний между ними).

В гравийных фильтрах в зависимости от гранулометрического состава водоносных пород в качестве обсыпки могут применяться пески, гравий и песчано-гравийные смеси.

Таблица 3

Тип фильтра	Размеры проходных отверстий при коэффициенте неоднородности пород K_H	
	менее 2	более 2
Трубчатый:		
с круглой перфорацией	$(2,5 - 3) d_{50}$	$(3 - 4) d_{50}$
с щелевой перфорацией	$(1,25 - 1,5) d_{50}$	$(1,5 - 2) d_{50}$
сетчатый	$(1,5 - 2) d_{50}$	$(2 - 2,5) d_{50}$

Примечание. d_{50} — размер частиц, содержание которых в водоносном пласте по весу составляет 50% (определяется по графику гранулометрического состава пород); коэффициент неоднородности равен

$$K_H = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Подбор материалов для гравийных обсыпок производится по соотношению

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = \text{от } 5 \text{ до } 10,$$

где D_{50} — крупность частиц, вес которых в обсыпке составляет 50% ;

d_{50} — то же, в породе.

Фильтры в скважинах устанавливаются двумя способами: на колонне глухих труб, присоединенной к фильтру с помощью резьбового соединения и выведенной на поверхность земли. В этом случае водоподъемные трубы насоса размещаются внутри фильтровой трубы (рис. 10, а);

на штангах, присоединенных к замку с сальником в верхней части фильтра (установка фильтра в потай). После установки фильтра штанги поднимаются. В этом случае водоподъемные трубы насоса размещаются внутри обсадных труб (рис. 10, б).

Изоляция ствола скважины. Выше водоприемной части в скважине располагается колонна водоподъемных труб. Во всех случаях водоподъемная часть скважины должна быть герметично изолирована от притоков воды из верхних водоносных горизонтов.

Для изоляции исследуемого горизонта применяются различные виды тампонажей — цементный и глинистый.

В случае цементного тампонажа обсадные трубы при ликвидации скважины могут быть извлечены на поверхность лишь с большими трудностями, поэтому при бурении опытных скважин, которые в дальнейшем подлежат ликвидации, требуется применять глинистый тампонаж.

Глинистый тампонаж осуществляется посредством задавливания обсадных труб в слой глинистого грунта, перекрывающий исследуемый водоносный пласт на глубину не менее 1,5—2 м. После задавливания переходят на новую колонну обсадных труб, которая должна проходить в пределах глинистого грунта не менее 3 м.

Таким образом, для надежной изоляции верхних горизонтов необходимо, чтобы мощность глинистых пород в кровле пласта была не менее 4,5—5 м.

Если в кровле водоносного пласта слой глины необходимой мощности отсутствует, то в этих случаях перед посадкой новой колонны устраивают глинистый тампон в обсадной трубе путем забрасывания в скважину шаров жирной глины диаметром 50—70 мм.

Шары плотно затрамбовывают на забое и одновременно постепенно приподнимают колонну. Таким образом, затрамбовывают глину на высоту 5—6 м от забоя и затем колонну задавливают в эту глинистую пробку на 2—3 м. После этого продолжают бурение новой колонной меньшего диаметра через слой глиняного тампона, который препятствует прониканию песка между трубами и способствует посадке следующей колонны.

Схема производства работ по устройству глиняного тампонажа показана на рис. 11.

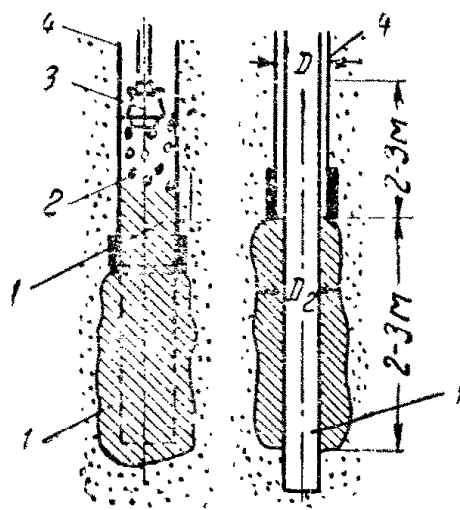


Рис. 11. Схема производства работ по устройству глиняного тампона

1 — затрамбованная глина;
2 — шары из мятой подсушенной глины;
3 — трамбовка;
4 — обсадная труба

Водоподъемное оборудование

При опытных откачках из скважины применяются следующие виды насосов:

I группа — наземные (поверхностные):

поршневые;
диафрагмовые;
центробежные;

II группа — подземные (глубинные):

штанговые с механическим приводом;
артезианские турбинные с двигателем на поверхности земли (типов АТН, НА, А и др.);
артезианские турбинные с погружным электродвигателем (типов АП, АПВ, ПМНЛ и др.);
артезианские винтовые типа ВАН.

Сравнительная характеристика насосов, применяемых для откачек

№ п.п	Насосы	Преимущества	Недостатки
1	Наземные	Относительная простота устройства и отсутствие трущихся частей в скважине. Легкий монтаж и демонтаж насоса. Значительная и просто регулируемая производительность	Высота всасывания не более 6—7 м от оси насоса. Вода должна быть без примеси песчаных частиц.
2	Глубинные типа ВАН-АТН	Возможность откачки воды из скважин при значительной глубине динамического уровня (до 100 м)	Сложность монтажа и демонтажа. Наличие вертикального вала значительной длины. Отсутствие в откачиваемой воде взвешенных частиц. Необходимость вертикальности скважины. При недостаточном диаметре рабочей колонны затрудняются измерения динамического уровня в скважине.
3	Глубинные типов АП, АПВ, ПМНЛ, ЭПЛ-6	Откачка воды из скважины при значительной глубине динамического уровня. Менее сложные монтаж и демонтаж всей установки. Отсутствие длинного вертикального вала. Возможность установки в незначительно искривленных скважинах.	Отсутствие в откачиваемой воде песчаных частиц и шлама
4	Глубинные (штанговые поршневые)	Возможность откачки воды из скважин с незначительным дебитом при гл.бине динамического уровня до 75—90 м	В откачиваемой воде не допускается присутствие песчаных частиц и шлама. Частый обрыв штанг. Быстрая изнашиваемость манжет поршня. Трудность замера уровня воды. Громоздкость и большой вес агрегата

№ п/п	Насосы	Преимущества	Недостатки
5	Эрлифты	Простота устройства и надежность в работе, не требуют бурения скважины большого диаметра	Низкий коэффициент полезного действия. Необходимость бурения скважины значительной глубины (для загрузки смесителя эрлифта под динамический уровень) Недостаточная точность замера динамического уровня при откачке из-за пульсации его в скважине

III группа — эрлифтные (газлифтные) установки.

Перечисленные виды насосов приводятся в действие двигателями внутреннего сгорания, электромоторами и компрессорами.

Выбор типа и конструкции насосного оборудования производится в каждом отдельном случае в зависимости от конкретных гидрогеологических условий и с учетом технико-экономической целесообразности применения той или иной конструкции.

Таблица 5

Поршневые и диафрагмовые насосы

Насосы	Производительность в м ³ /час	Диаметр в мм			Длина хода поршня в мм	Диаметр поршня в мм
		насосной колонны	всасывающего патрубку	нагнетательного патрубка		
Насосная колонна (при 50 ходах поршня в 1 мин.)	1,2	64	—	—	200	—
	1,9	75	—	—	200	—
	3,0	89	—	—	200	—
	3,9	100	—	—	200	—
Диафрагмовый („Лягушка“):						
№ 1	18	—	75	75	—	—
№ 2	18	—	75	75	—	—
№ 4	24	—	100	100	—	—
Ручной поршневой:						
БКФ-2	0,9—1,4	—	25	25	70	75
БКФ-4	2,3—3,5	—	38	38	90	100
РН-1	0,7	—	19	19	50	65

Среди основных факторов, определяющих выбор типа насосов следует отметить:

- а) глубину динамического уровня воды в скважине от поверхности земли;
- б) предполагаемые дебиты воды;
- в) напор насоса по его заводской характеристике;

Таблица 6

Наземные центробежные насосы

№ п.п.	Тип насоса	Характеристики насоса				Вес в кг
		Производительность насоса в м ³ /час	Полный напор в м	Мощность двигателя в кВт	Вакуумная высота всасывания в м	
1	ЭК-6	30	62	14	7,3	116
		45	57	14	6,7	
		60	50	20	5,6	
		70	44,5	20	4,7	
2	ЧК-6	65	98	55	7,1	138
		90	91		6,2	
		115	81		5,1	
		135	72,5		4	
3	4НДВ	90	24	14	6,5	180
		108	22	14	6,5	
		126	94	55	4	
4	5НДВ	126	30	20	7,3	270
		150	28	20	7	
		180	26	20	6,8	
		216	28	28	5,8	
		250	31	40	4,6	

г) физические свойства воды (наличие взвесей; коррозирующая способность воды).

Сравнительная характеристика насосов разных типов приводится в табл. 4 (по методическим указаниям Главспецстройпроект, 1959 г.).

Наземные поршневые и диафрагмовые насосы применяются при дебитах до 5—6 л/сек и глубине динамического уровня от оси насоса не более 6—7 м. Они бывают ручные и оборудованные механическим приводом.

При дебитах более 5—6 л/сек и глубине динамического уровня от оси насоса не более 6—7 м применяются центробежные насосы с горизонтальным валом, приводимые в действие электродвигателем или двигателем внутреннего сгорания.

Технические характеристики поршневых и диафрагмовых насосов при-

ведены в табл. 5, а центробежных насосов — в табл. 6 и на рис. 12, 13.

В зависимости от допускаемой высоты всасывания ось насоса устанавливается на поверхности земли или в насосной шахте, заглубленной на 4—6 м от поверхности земли.

Центробежные насосы отличаются широким диапазоном производительности и напоров, которые можно регулировать путем изменения оборотов двигателя или задвижкой.

Подземные (глубинные) насосы. Глубинные насосы, погружаемые в скважины, применяются при глубине динамического

уровня более 6—7 м от поверхности земли или дна насосной шахты.

Штанговые насосы. Штанговые насосы применяются для опытных откачек при следующих условиях:

а) дебитах до 3—4 л/сек;

б) глубинах динамического уровня не более 30 м;

в) наличии в скважине воды без большого количества взвешенных частиц (ввиду быстрого износа манжет);

г) вертикальности ствола скважины.

Штанговый насос состоит из следующих элементов (рис. 14):

а) насосного цилиндра, опускаемого в скважину на подвесных трубах с хомутами или фланцами для подвески труб на обсадной колонне;

б) поршня, опускаемого на колонне штанг;

в) приводного механизма или балансира, к которым присоединяются штанги.

Характеристика штанговых поршневых насосов приведена в табл. 7.

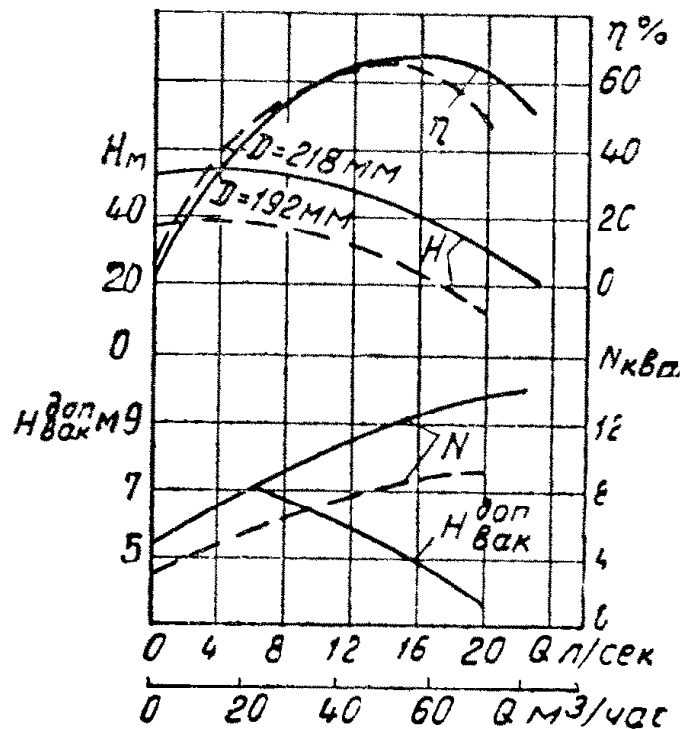


Рис. 12. Характеристика горизонтального одноступенчатого центробежного консольного насоса ЗК-6 при $n=2900$ об/мин (с рабочим колесом одностороннего входа)

Таблица 7

Глубинные штанговые поршневые насосы

№ п/п	Марка насоса	Внутренний диаметр цилиндра в мм	Высота подъема воды в м	Число ходов поршня в 1 мин.	Производительность в м³/час	Мощность двигателя в квт]
1	Бурвод III	92	90	35	4	6
2	"	145	60	35	10	10
3	Буровая техника I	75	100	30	2,5	8
4	" II	156	100	50	12,5	8
5	НПП-3	75	50	50	3—5	3

При откачке штанговыми насосами регулировка дебита производится с помощью изменения хода поршня и числа оборотов двигателя.

Основной недостаток штангового насоса — его тяжелые насосные штанги, не позволяющие увеличивать число ходов более 40—60 в 1 мин. Малое число оборотов двигателя ограничивает производительность насоса. При использовании электромоторов

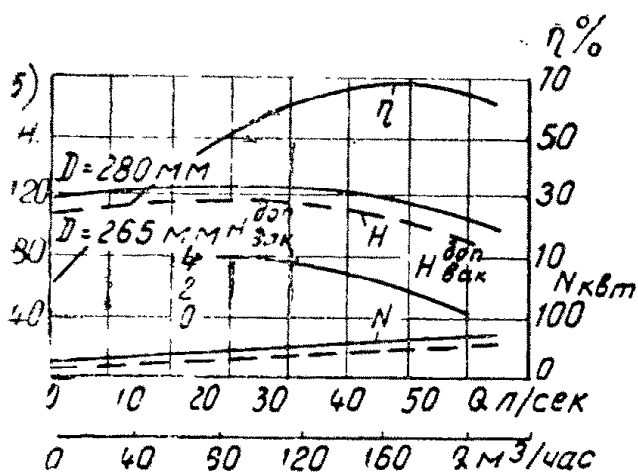
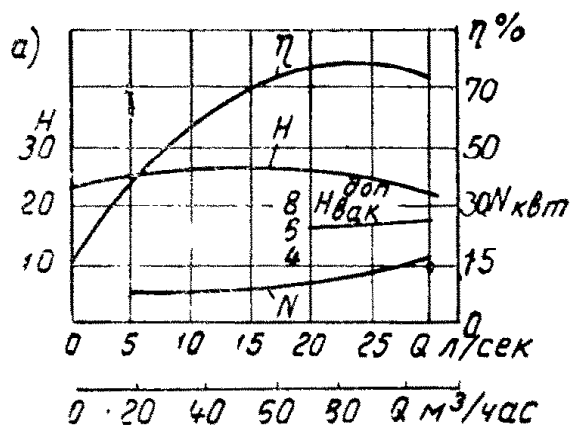


Рис. 13. Характеристика горизонтального одноступенчатого насоса 4НДВ (с рабочим колесом двустороннего входа)

а — при $n = 1450$ об/мин; б — при $n = 2950$ об/мин

- 3) водоподъемные трубы (напорные) 3;
- 4) электродвигатель с опорной рамой, смонтированной над устьем скважины 8.

Основные технические данные для наиболее часто применяемых при откачках насосов приведены в табл. 8.

Рабочие характеристики насосов данного типа даны на рис. 16—20.

требуются промежуточная трансмиссия и зубчатая передача, что усложняет установку для опытной откачки.

Артезианские турбинные насосы с двигателем на поверхности земли. К этому виду относятся насосы АТН, НА, А, у которых двигатель размещен на поверхности земли.

Насосы этого типа применяются при условиях:

- 1) дебита скважины до 60 л/сек (для АТН-16 — до 100 л/сек);
- 2) глубины динамического уровня от поверхности земли не более 90 м;
- 3) вертикальности и прямолинейности ствола скважины;
- 4) минимального содержания в воде твердых взвешенных частиц.

Основными элементами насосного агрегата являются (рис. 15):

- 1) всасывающая труба со всасывателем 1;
- 2) рабочие колеса с направляющим аппаратом 2;

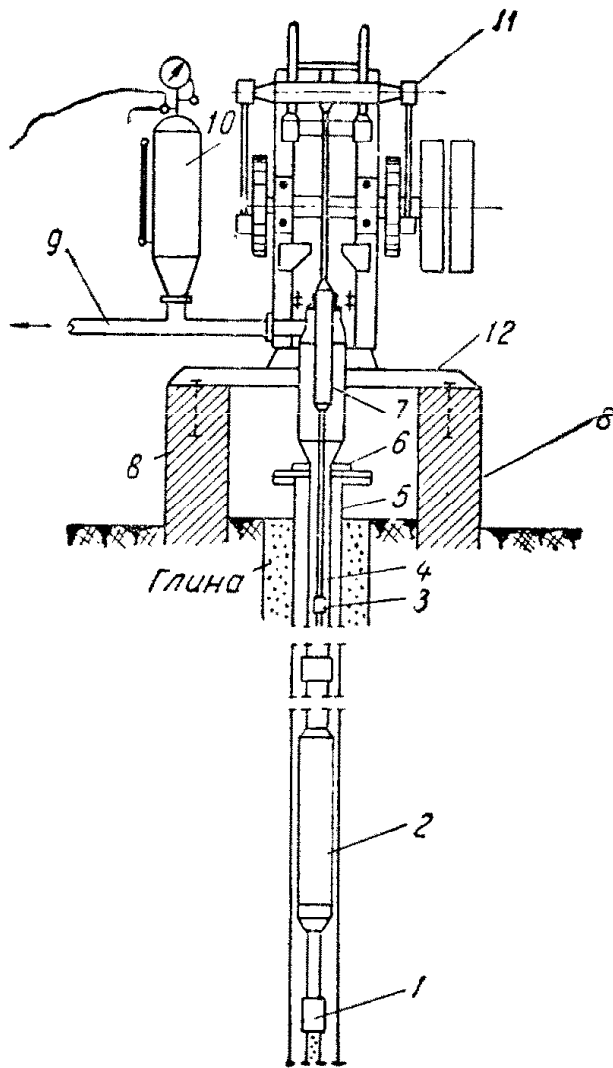


Рис. 14. Штанговый насос
«Бурвод-III»

1 — приемный клапан; 2 — рабочий цилиндр; 3 — насосные трубы; 4 — насосные тяги; 5 — скважина; 6 — сальник и флянцы; 7 — плунжер; 8 — фундамент; 9 — водоотвод; 10 — воздушный колпак; 11 — приводная лебедка; 12 — опорная рама

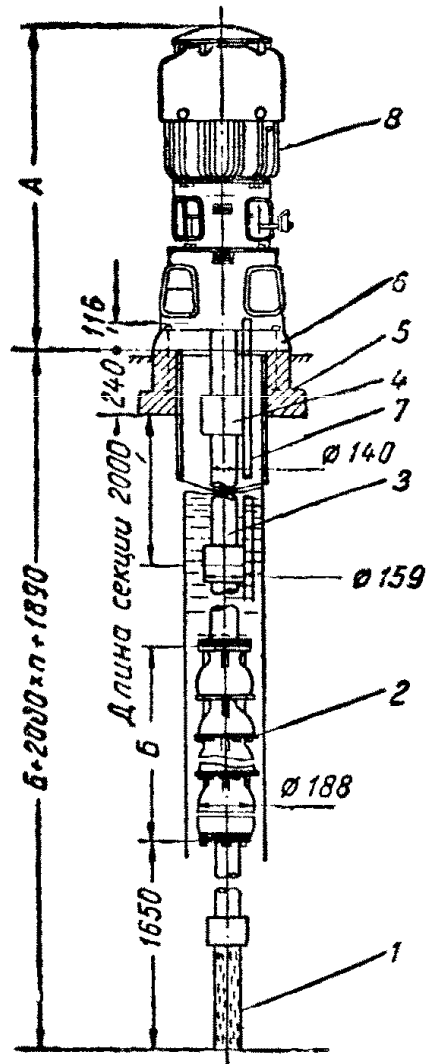


Рис. 15. Схема глубинного центробежного насоса с вертикальным валом АТН-8-1

1 — всасыватель; 2 — рабочие секции насоса; 3 — водоподъемные напорные трубы; 4 — соединительная муфта; 5 — фундамент; 6 — опорная рама; 7 — труба для замеров; 8 — двигатель

Глубинные артезианские насосы с двигателем на поверхности земли

Марка насоса	Производительность в м ³ /час	Полный напор в м	Число рабочих колес	Мощность двигателя в квт	Диаметр насоса в мм	Общий вес насоса в кг
АТН-8-1-11	30	45	11	10	188	1 954
АТН-8-1-16	30	65	16	14	188	2 708
АТН-8-1-22	30	90	22	20	188	3 378
АТН-10-1-4	70	30	4	14	238	1 957
АТН-10-1-6	70	45	6	20	238	2 832
АТН-10-1-8	70	60	8	28	238	3 584
АТН-10-1-11	70	80	11	40	238	4 541
АТН-10-1-13	70	100	13	40	238	5 525
АТН-14-1-3	200	45	3	45	340	5 870
АТН-14-1-4	200	60	4	45	340	7 000
АТН-14-1-6	200	90	6	75	340	10 131
АТН-16-6	400	100	6	180	388	15 000
12НА×3	150	33	3	28,5	285	2 550
12НА×4	150	44	4	37	285	3 270
12НА×5	150	55	5	48	285	3 970
12А-18×6	150	66	6	56	285	5 050
12А-18×8	150	88	8	75	285	6 470

Таблица 9

Артезианские насосы с погружным электродвигателем

Марка насоса	Производительность в м ³ /час	Полный напор в м	Число рабочих ступеней	Мощность двигателя в квт	Минимальный условный диаметр скважины в дюймах	Вес агрегата в кг
6АП-9×6	5—6	56—36	6	2,5	6	90
6АПВ	5	90	11	4	6	—
8АП-9×6	14—30	108—55	6	12	8	210
8АПВ	12	120	7	12	8	—
10АП-18×6	40—80	113—60	6	35	10	326
10АПВ	30	150	10	35	10	—
12АП-18×6	115—215	79—49	6	60	12	610
12АПВ	120	100	5	60	12	—
ПМНЛ-30×80	30	80	5	10,5	8	160
ПМНЛ-30×50	30	50	2	10,5	8	110
ПМНЛ-60×150	60	150	5	45	12	427
ПМНЛ-100×100	100	100	3	45	12	396
ЭПЛ-6	7,2—20	15—97	8	5	6	103

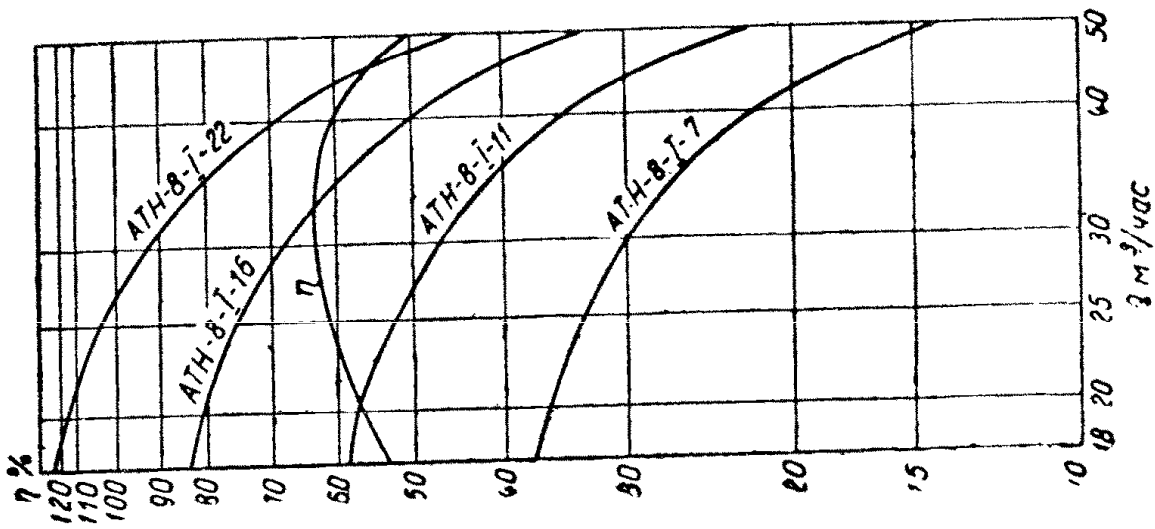


Рис. 16. Характеристика вертикальных погружных насосов АТН-8-1 при работе безнапорного трубопровода

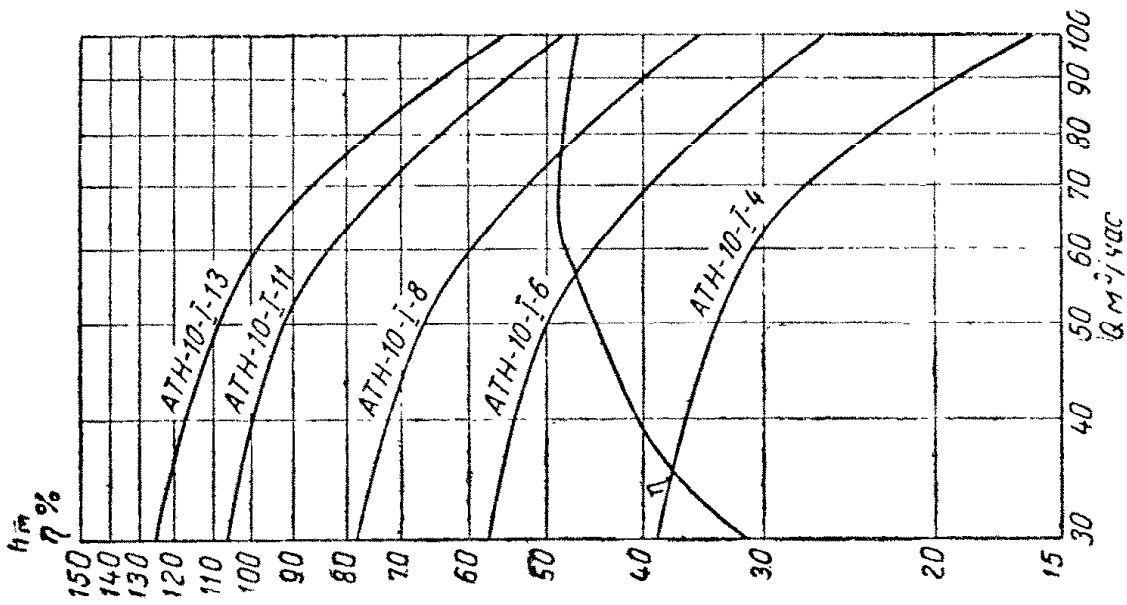


Рис. 17. Характеристика насосов АТН-10-1 при работе безнапорного трубопровода

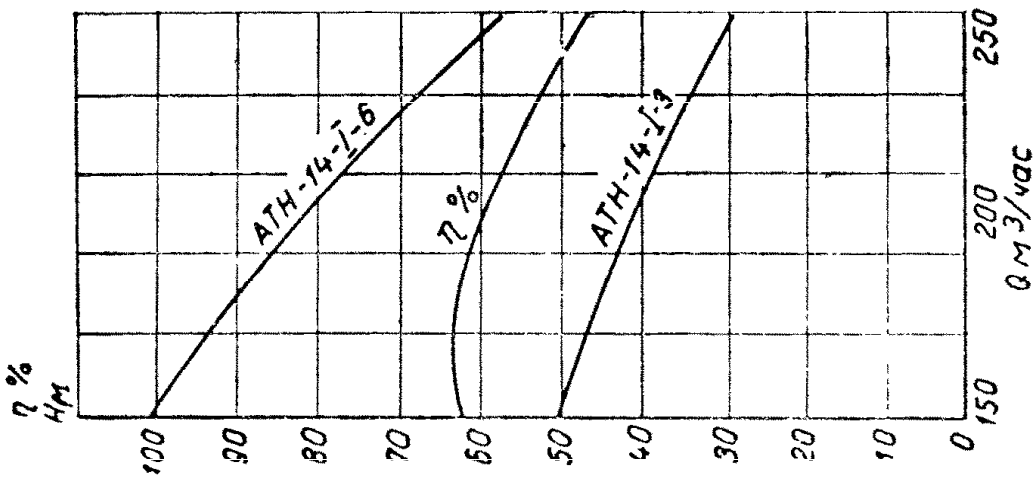


Рис. 18. Характеристика вертикальных насосов АТН-14-1 при работе безнапорного трубопровода

Артезианские турбинные насосы с погружным электродвигателем. К этой группе относятся насосы типов АП, АПВ, ПМНЛ и ЭПЛ-6.

Насосы этого типа используются при условиях:

- 1) дебита скважины до 60 л/сек;
- 2) глубины динамического уровня от поверхности земли не более 150 м;
- 3) небольшого искривления ствола скважины;
- 4) минимального содержания песка и шлама.

Насосный агрегат типа АП состоит из следующих элементов (рис. 21) (снизу вверх):

- 1) погружного электромотора;
- 2) всасывателя;
- 3) рабочего колеса с направляющим аппаратом;
- 4) водоподъемной трубы;
- 5) опорной рамы, смонтированной над устьем скважины;
- 6) пусковой аппаратуры с кабелем, подсоединенным к погружному электромотору.

Технические данные по артезианским насосам с погружным электродвигателем приведены в табл. 9.

Рабочие характеристики погружных насосов даны на рис. 22—23.

Артезианские винтовые насосы. Насосы типа ВАН применяются при условиях:

- 1) дебита скважин до 4 л/сек;
- 2) глубины динамического уровня не более 60 м;
- 3) вертикальности и прямолинейности ствола скважины;
- 4) минимального содержания в воде твердых частиц.

Артезианский винтовой насос состоит из следующих составных частей (рис. 24):

- 1) винтового насоса;
- 2) нагнетательных труб;
- 3) приводного вала;
- 4) электродвигателя с вертикальным валом, расположенного на поверхности земли.

Недостатком насосов этого типа является карданный вал; при незначительном износе роторного винта или резиновой обоймы производительность и к. п. д. насоса резко понижаются.

Характеристики различных типов насосов ВАН приведены в табл. 10 и на рис. 25.

При выборе и монтаже артезианских насосов разных типов требуется:

- 1) уточнить данные о производительности и полном напоре по рабочим характеристикам;
- 2) проверить шаблоном диаметр рабочей колонны до глубины не менее 10 м ниже расчетного динамического уровня. При

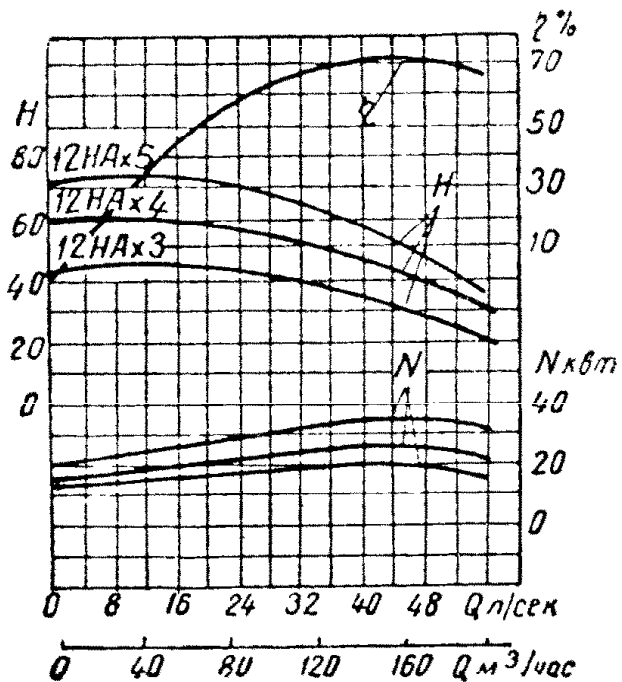


Рис. 19. Характеристика вертикальных насосов 12HA×3, 12HA×4 и 12HA×5 при $n=1450$ об/мин и $D=210$ мм

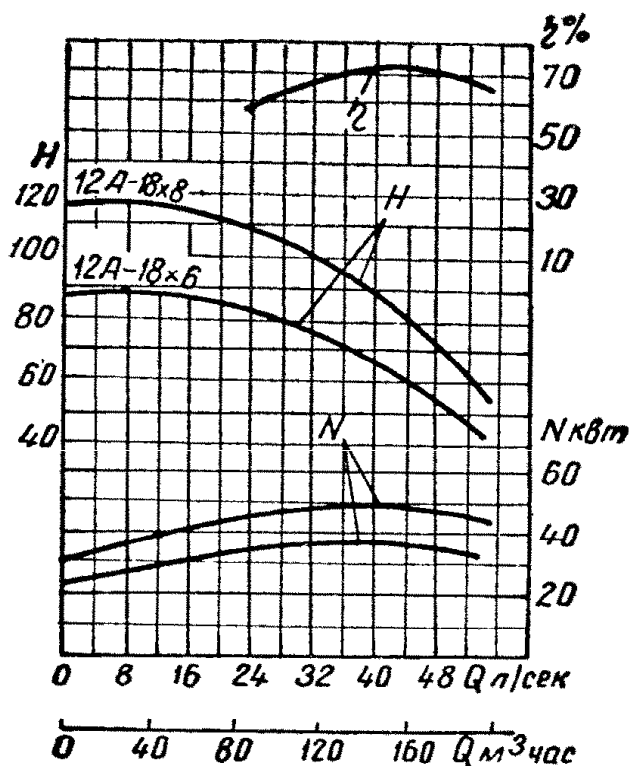


Рис. 20. Характеристика вертикальных насосов 12A-18×6 и 12A-18×8 при $n=1450$ об/мин и $D=210$ мм

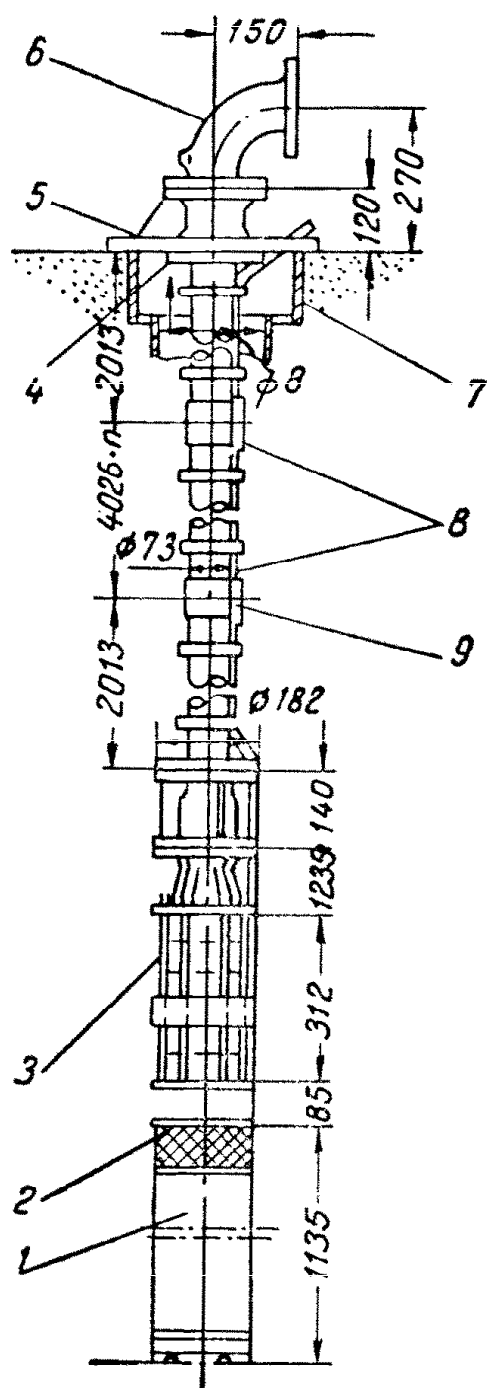


Рис. 21. Схема электронаса са 8АП-9×6 (с погружным электродвигателем)

1 — электродвигатель; 2 — всасыватель; 3 — насос; 4 — опорная плита; 5 — опорная рама; 6 — выкидное колено; 7 — фундаменты под насос; 8 — кабель; 9 — водоподъемная труба

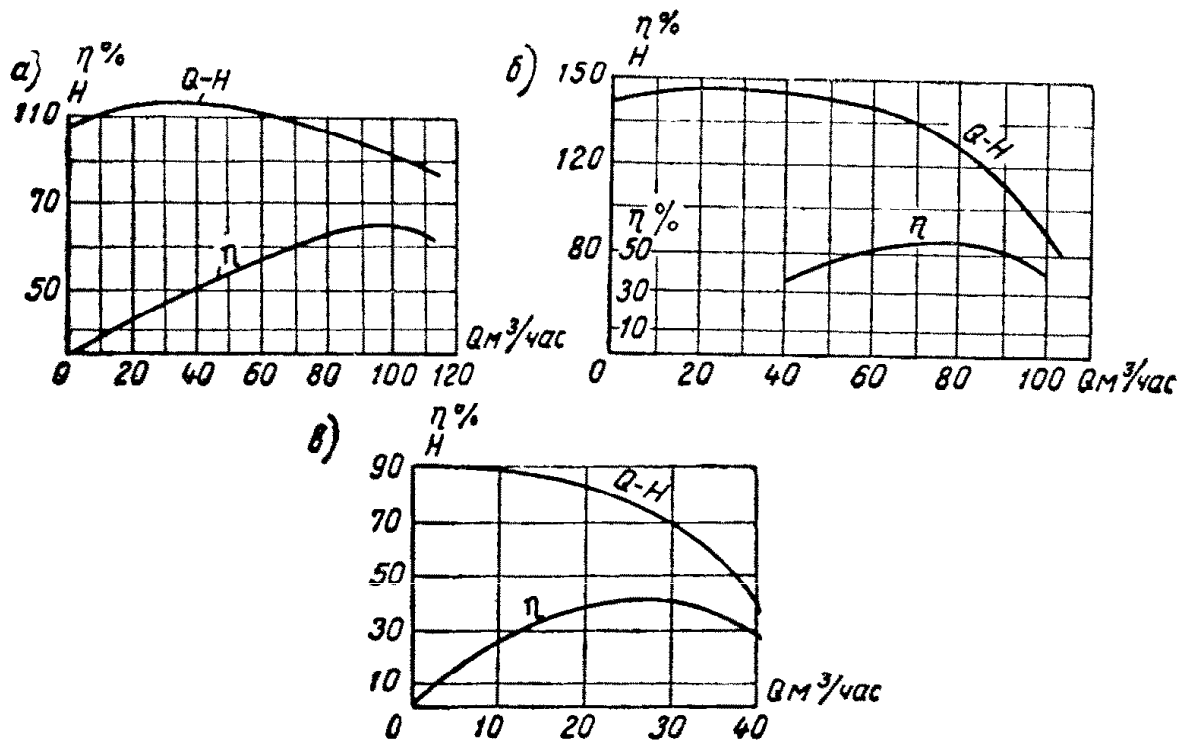


Рис. 22. Характеристические кривые насосов типа ПМНЛ

а — ПМНЛ-100 × 100; б — ПМНЛ-60 × 150; в — ПМНЛ-30 × 80

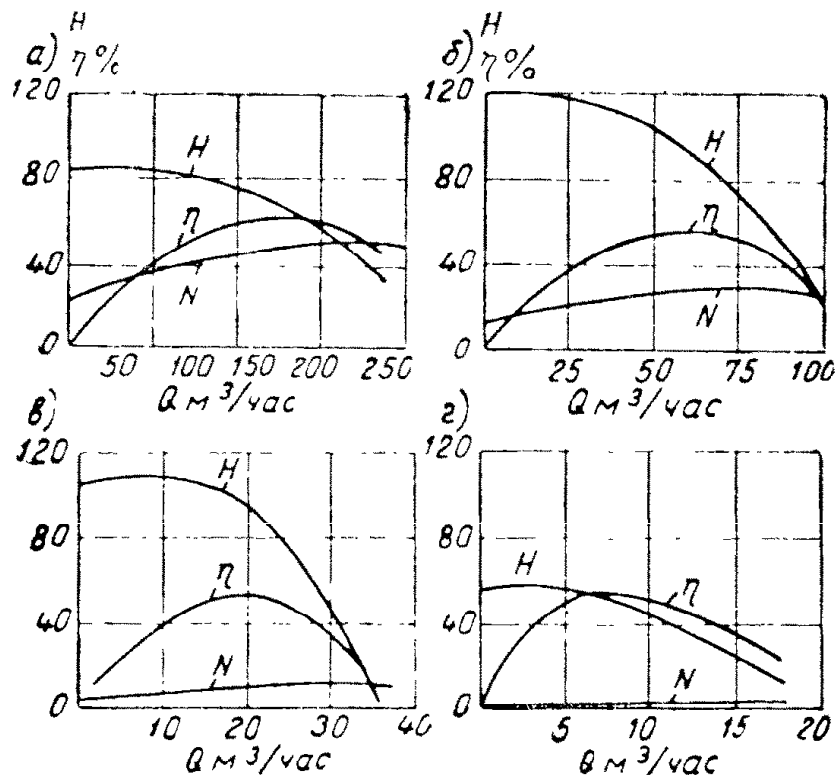


Рис. 23. Рабочие характеристики наружных артезианских насосов АП (с погружным электродвигателем)

а — 12АП; б — 10АП; в — 8АП; г — 6АП

этом рекомендуется иметь минимальный зазор между обсадной трубой и корпусом насоса в 15—17 мм при глубине погружения его от устья скважины до 20 м и 40—50 мм при глубине погружения его более 20 м;

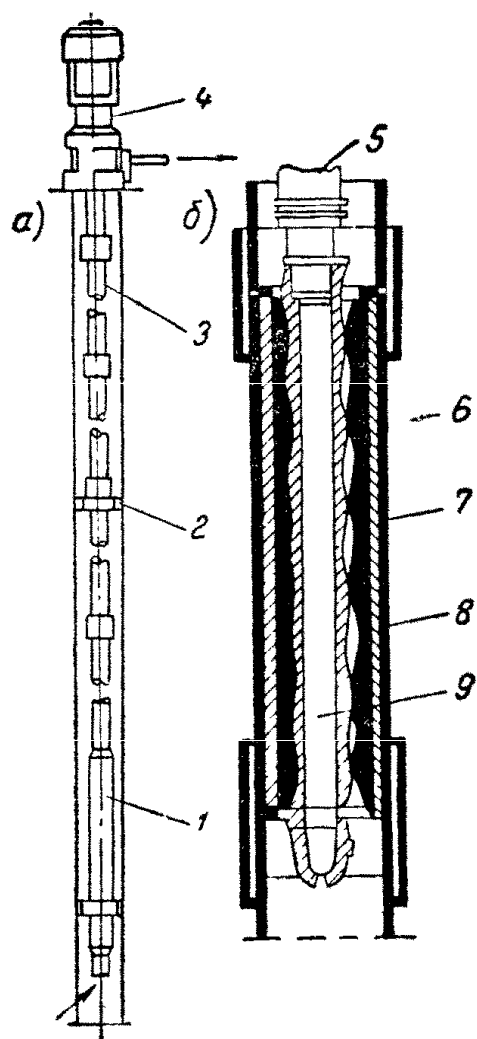


Рис. 24. Винтовой насос ВАН

a — схема установки винтового насоса ВАН; *б* — корпус насоса ВАН; 1 — винтовой насос ВАН; 2 — резиновые втулки для поглощения вибрации; 3 — напорные трубы, внутри их трансмиссионный вал с карданным валом; 4 — электродвигатель на опорном корпусе; 5 — начало карданного вала; 6 — резиновый статор; 7 — обойма; 8 — корпус статора; 9 — винт ротора

3) проверить клинометром вертикальность скважины. Отклонение оси скважины от вертикали не должно превосходить 5 мм на 1 пог. м (в наклонных скважинах насос и трубы монтируются параллельно оси скважины);

4) насос со всасывающей трубой и всасывателем должен находиться в укрепленной части скважины;

5) расстояние от сетки всасывателя до забоя скважины (до пробки фильтра) должно быть не менее 1,8 м;

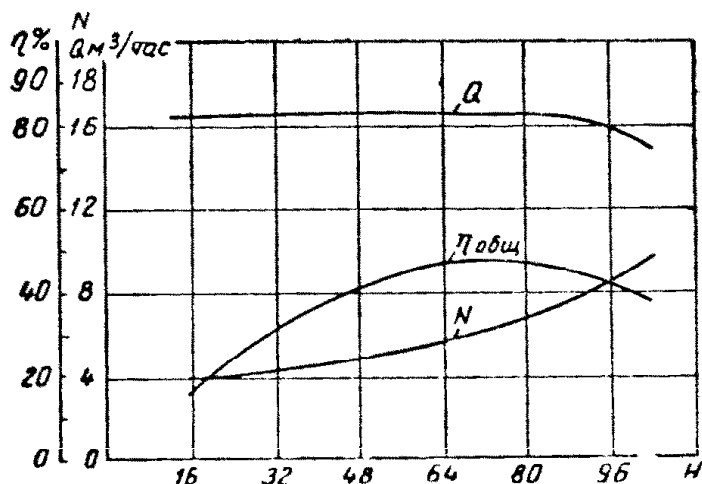


Рис. 25. Характеристика артезианского винтового насоса ВАН при $n = 1450$ об/мин

6) статический горизонт воды в скважине должен быть выше нижнего колеса насоса;

7) динамический горизонт воды должен быть выше всасывателя на 0,5—1 м.

Эрлифты. К этому виду водоподъемного оборудования относятся установки с применением компрессорных машин, производящих подъем воды из скважины с помощью сжатого воздуха.

Насосы типа ВАН

Параметры	Единица измерения	ВАН-4		ВАН-6	ВАН-7
		I	II		
Производительность . . .	<i>м³/час</i>	5	5	3—5	10—15
Напор	<i>м вод ст</i>	30	60	60	100
Мощность электродвигателя	<i>квт</i>	1,7	2,8	3,2	10
Число оборотов	<i>об/мин</i>	1450	1450	1450	1450
Глубина опускания напорных труб в скважину	<i>м</i>	30	60	60	100
Минимальный диаметр скважины	<i>мм</i>	125	125	125	150
Диаметр напорной трубы	<i>"</i>	89	89	75	100
Вес	<i>кг</i>	700	1200	1400	4000

Эрлифтная установка состоит из следующих основных элементов (см. рис. 9):

- 1) компрессора с ресивером;
- 2) воздушной колонны труб;
- 3) водоподъемной колонны труб;
- 4) смесителя;
- 5) сепаратора;
- 6) водоотводного коллектора с водомером.

При опытных откачках применяются две системы загрузки эрлифтных труб:

Таблица 11

Производительность эрлифта

Рабочий диаметр скважины в дюймах	Центральное расположение труб			Расположение труб «рядом»		
	внутренний диаметр водоподъемных труб в мм	внутренний диаметр воздухопроводных труб в мм	Производительность в м³/час	внутренний диаметр водоподъемных труб в мм	внутренний диаметр воздухопроводных труб в мм	производительность в м³/час
6	70	25	20—25	70	32	20—25
	100	32	30—40	80	40	25—30
8	100	32	30—40	80	40	25—30
	150	50	70—100	100	40	30—40
10	150	50	70—100	100	40	30—40
	200	70	100—150	125	50	75—100
12	200	70	100—150	125	50	75—100
	200	80	150—250	150	80	125—175

а) центральная, когда воздушная колонна помещается внутри водоподъемной;

б) система «рядом», когда воздушные трубы проходят снаружи водоподъемной.

Для опытных откачек из скважин целесообразно производить загрузку водоподъемных и воздушных труб по центральной системе эрлифта, что является более простым и обеспечивает высокую производительность (табл. 11).

Для применения эрлифта необходимы определенные условия:

1) глубина скважины должна быть в 1,5—2 раза больше высоты подъема воды;

2) заранее определить диаметр воздушных и водопроводных труб, а также глубину погружения в воду смесителя эрлифта и потребное количество сжатого воздуха. Для определения этих величин пользуются следующими формулами и таблицами.

Глубина погружения в воду смесителя эрлифта зависит от динамического уровня воды в скважине и рассчитывается по формуле

$$H = kh,$$

где H — глубина погружения форсунки от уровня излива жидкости;

h — глубина динамического уровня воды в скважине от уровня излива жидкости;

k — эмпирический коэффициент, принимаемый для эрлифтной установки в пределах 1,5—2,5.

Если из эрлифта поступает вода отдельными выбросами с большим количеством пены, необходимо увеличить глубину загрузки труб эрлифта или заменить их трубами меньшего диаметра.

При загрузке труб надо учитывать производительность и давление сжатого воздуха в компрессоре, применяемом для откачки.

Регулирование расхода воды из скважины производится изменением количества подаваемого в скважину воздуха или глубиной погружения форсунки эрлифта.

Из-за малых зазоров между трубами при откачке эрлифтом не всегда возможно определить понижение уровня воды в скважине с помощью обычных приспособлений (уровнемера и др.); тогда динамический уровень измеряется по манометру, который установлен на ресивере компрессора или воздушной трубе эрлифта у устья скважины.

Величина понижения определяется по формуле

$$S = 10(p_n - p_p)$$

где S — величина понижения в м;

p_n — пусковое давление в ат;

p_p — рабочее давление в ат.

Для откачек из скважин с помощью эрлифта применяются следующие передвижные воздушные компрессоры:

ЗИФ-55 производительностью $5 \text{ м}^3/\text{мин}$ и рабочим давлением 7 ат ;

ЗИФ-51 производительностью $4,65 \text{ м}^3/\text{мин}$ и рабочим давлением 7 ат ;

ВКС-1Д производительностью $5 \text{ м}^3/\text{мин}$ и рабочим давлением до 7 ат .

Вспомогательное оборудование

Оборудование для монтажа и демонтажа насосов. Для монтажа и демонтажа водоподъемного оборудования применяются различные подъемные устройства: тренога, сборные облегченные вышки (металлические и деревянные) высотой $6—12 \text{ м}$, самоходные краны ($5—10 \text{ т}$), получившие в последние годы широкое применение.

Такие приспособления нужны для сборки водоподъемных труб и штанг, на которых опускаются в скважину глубинные насосы типов АТН, НА, А, АП, АПВ и др., а также для монтажа и демонтажа водоподъемной установки типа эрлифт.

Водоотводное и водосбросное оборудование. Отвод воды при откачке из опытной скважины производится с помощью водоотводного коллектора, состоящего из труб диаметром от 2 до $8''$. Длина его принимается больше расстояния от опытной до наиболее удаленной контрольной скважины. Коллектор отводит воду в сбросную канаву, у начала которой устанавливается мерная емкость, служащая для эпизодических измерений расхода воды и проверки точности водомера.

Схема расположения водоотводного и сбросного оборудования показана на рис. 6, 7, 8, 9.

Контрольно-измерительная аппаратура. При проведении опытных откачек из скважин применяют различную контрольно-измерительную аппаратуру. При этом необходимо учитывать технические условия, продолжительность и место проведения опытных работ (конструкция скважины, род водоприемника, наличие электроэнергии).

Для измерения уровня воды при непродолжительных опытных откачках применяют простейшие приборы типа хлопушки, глухаря и др. При продолжительных наблюдениях применяются электроуровнемер типа Соколовского—Остроумова, световой уровнемер конструкции Симонова и пневматический указатель уровня воды (при откачках эрлифтом).

Для наблюдений за температурой воды применяются термометры разных типов (родниковый, «ленивый» и др.).

При измерении дебита при откачках используют объемный способ, который заключается в определении времени заполнения мерного сосуда (емкости), заранее оттарированного. Наиболее часто употребляют металлические бочки ($300—500 \text{ л}$) на

специальных подставках, с помощью которых их легко освободить после измерения. При продолжительных опытных откачках применяют водомеры: крыльчатые (при дебите скважины до $6 \text{ м}^3/\text{час}$), турбинные (при расходах до $70 \text{ м}^3/\text{час}$), типа Вентури, пьезометрические и др. Измерение дебита при откачках проводится также с помощью водосливов — треугольных и прямоугольных.

Для определения химического состава и бактериологических свойств подземных вод во время опытной откачки пробы воды отбираются в чистую стеклянную посуду с хорошо притертой пробкой. Перед отбором посуда предварительно ополаскивается отбираемой водой, затем заполняется и герметически закрывается. Объем проб должен быть не менее 1 л для сокращенного анализа и 3 л — для полного анализа.

Контрольные (наблюдательные) скважины

Наблюдательные скважины закладываются по радиальным лучам. Рекомендуется иметь один или два луча с двумя-тремя наблюдательными скважинами на каждом. Первый луч контрольных скважин направляется нормально к естественному потоку подземных вод, второй — вверх или вниз по потоку.

Расстояние ближайшей контрольной скважины от центральной принимается от $1,5 \text{ м}$ для малопроницаемых до $5\text{—}8 \text{ м}$ для сильнопроницаемых пород.

Вторая контрольная скважина размещается на расстоянии от центральной, равном $0,5\text{—}1 \text{ м}$, где m — мощность пласта.

Третья, наиболее удаленная контрольная скважина располагается от центральной на расстоянии, равном $0,8\text{—}2 \text{ м}$.

Минимальные расстояния контрольных скважин от центральной ($1,5 \text{ м}$, $0,5$ и $0,8 \text{ м}$) принимаются для малопроницаемых пород (коэффициент фильтрации менее $2\text{—}3 \text{ м/сутки}$).

Максимальные расстояния контрольных скважин от центральной ($5\text{—}8 \text{ м}$, 1 и 2 м) принимаются для сильнопроницаемых пород (коэффициент фильтрации $50\text{—}100 \text{ м/сутки}$ и более).

Водопроницаемая часть контрольных скважин должна иметь ту же длину и располагаться на той же высоте, что и водоприемная часть центральной скважины.

Наблюдательные скважины бурятся после предварительной прокачки центральной, которая дает ориентировочное представление о водопроницаемости пласта.

Бурение контрольных скважин ведется минимальными диаметрами, необходимыми для установки фильтра и проведения измерений глубины уровня, температуры и отбора проб воды (обычно от $1,5$ до $4''$).

Для наблюдательных скважин весьма удобными являются фильтры из стеклотканей, предложенные В. М. Гаврилко в 1952 г. [22].

Для этих скважин могут также применяться фильтры любых других типов. Длина отстойника фильтра должна быть не менее 1—1,5 м.

Длина верхней, глухой части фильтра — не менее 0,75 м (последнее необходимо при установке фильтра на сальнике).

§ 5. ОТКАЧКИ В ПЛАСТАХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ (установившийся режим фильтрации)

Решение задачи о притоке жидкости к несовершенной скважине в напорном пласте впервые было дано М. Маскетом [45]. Простые приближенные решения этой задачи принадлежат В. М. Насбергу и В. Д. Бабушкину [5,7].

Как известно, М. Маскет заменил водопримную часть скважины длиной l линейным источником той же длины с постоянной по высоте интенсивностью. Напор в скважине он принял равным напору, возникающему при действии этого источника на окружности радиусом r_0 , отстоящей от кровли пласта на расстоянии $\frac{3}{4}l$.

В. Н. Николаевским [49] и автором [14] для той же расчетной схемы принято, что напор в скважине равен средневзвешенному напору на поверхности скважины радиусом r_0 и высотой l , возникающему при действии линейного источника на оси скважины.

Это позволило существенно улучшить сходимость рядов и получить более точные численные значения фильтрационного сопротивления в зоне резкой деформации потока вблизи несовершенной скважины ζ .

Нами было предложено считать, что фильтрационное сопротивление вблизи несовершенной скважины в безнапорном и напорном пластах одинаковы. Это позволило получить простые формулы для дебита несовершенных скважин и в безнапорных пластах [14]. Формулы для определения коэффициента фильтрации приводятся ниже.

Определение параметров пласта по одной скважине (центральной или наблюдательной)

Для одной центральной скважины (т. е. при отсутствии наблюдательных скважин) имеем:

напорный пласт

$$k = \frac{q \left(\ln \frac{2b}{r_0} + 0,5\zeta_0 \right)}{2\pi m s_0} = 0,366 \frac{q \left(\lg \frac{2b}{r_0} + 0,217\zeta_0 \right)}{ms_0}; \quad (5.1)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q \left(\ln \frac{2b}{r_0} + 0,5\zeta_0 \right)}{\pi s_0 (2H_0 - s_0)} = 0,732 \frac{q \left(\lg \frac{2b}{r_0} + 0,217\zeta_0 \right)}{s_0 (2H_0 - s_0)}, \quad (5.2)$$

где q — дебит опытной скважины;

r_0 — радиус водоприемной части скважины;

m — мощность пласта;

s_0 — понижение напора в скважине;

ζ_0 — фильтрационное сопротивление в зоне резкой деформации потока вблизи несовершенной скважины, определяемое по табл. 12;

H_0 — естественная глубина потока в месте заложения скважины;

b — расстояние от опытной скважины до внешней границы пласта с постоянным напором (до реки, озера, моря или до контакта с более проницаемыми породами).

Для наблюдательной скважины имеем:

напорный пласт

$$k = \frac{q \left[\ln \frac{r_1}{r_0} + 0,5(\zeta_0 - \zeta_1) \right]}{2\pi m (s_0 - s_1)} = 0,366 \frac{q \left[\lg \frac{r_1}{r_0} + 0,217(\zeta_0 - \zeta_1) \right]}{m (s_0 - s_1)}; \quad (5.3)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q \left[\ln \frac{r_1}{r_0} + 0,5(\zeta_0 - \zeta_1) \right]}{\pi (s_0 - s_1) (2H_0 - s_0 - s_1)} = 0,732 \frac{q \left[\lg \frac{r_1}{r_0} + 0,217(\zeta_0 - \zeta_1) \right]}{(s_0 - s_1) (2H_0 - s_0 - s_1)}, \quad (5.4)$$

где s_1 — понижение напора в наблюдательной скважине;

r_1 — расстояние наблюдательной скважины от центральной (опытной);

ζ_1 — сопротивление, учитывающее несовершенство наблюдательной скважины. Остальные обозначения аналогичны предыдущим.

Величина ζ_1 находится по табл. 12, где вместо r_0 принимается r_1 .

Определение параметров пласта по двум скважинам (центральной и наблюдательной или двум наблюдательным)

В случае двух наблюдательных скважин имеем:

напорный пласт

$$k = 0,366 \frac{q \left[\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_1 - \zeta_2) \right]}{m (s_1 - s_2)}, \quad (5.5)$$

где r_1 — расстояние первой наблюдательной скважины от центральной (опытной);

- r_2 — расстояние второй наблюдательной скважины от центральной;
 s_1 — понижение в первой наблюдательной скважине (ближайшей к центральной);
 s_2 — понижение во второй наблюдательной скважине;
 ζ_1 и ζ_2 — сопротивления, учитывающие несовершенство первой и второй наблюдательных скважин.

Величины ζ_1 и ζ_2 для напорного пласта находятся по табл. 12, в которой вместо радиуса центральной скважины r_0 принимаются величины, соответствующие r_1 и r_2 ;

Таблица 12

		Значения ζ_0									
$\frac{l}{m}$	$\frac{m}{r_0}$	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	0,00423	0,135	2,3	12,6	35,5	71,9	94	126	149	169	
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	68,5	79,6	90,9	
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2	
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11	12,4	
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19	
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12	

безнапорный пласт

$$k = 0,732 \frac{q \left[\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_1 - \zeta_2) \right]}{(s_1 - s_2) (2H_0 - s_1 - s_2)}. \quad (5.6)$$

Величина ζ в формулах (5.1) и (5.6) выражается следующим образом:

$$\zeta = \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{m}{l} \right)^2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{n} \sin \pi n \frac{l}{m} \right)^2 K_0 \left(\pi n \frac{r}{m} \right), \quad (5.7)$$

где l — длина рабочей части скважины;

$r = r_0, r_1$ или r_2 ;

K_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для определения $\zeta_0 \left(\frac{l}{m}, \frac{m}{r_0} \right)$ следует пользоваться табл. 12, составленной нами по уравнению (5.7).

Величина ζ_0 может также определяться по следующей формуле, представляющей собой приближенную аппроксимацию уравнения (5.7):

$$\zeta_0 = 2 \left(\frac{m}{l} - 1 \right) \left(\ln 1,47 \frac{l}{r_0} - 2,65 \frac{l}{m} \right). \quad (5.8)$$

Формула (5.8) составлена нами аналогично тому, как это сделано В. М. Шестаковым для определения фильтрационного сопротивления вблизи несовершенной скважины по М. Маскету. Она применима при $\frac{m}{r_0} \geq 100$ и $\frac{l}{m} \geq 0,1$.

Аппроксимационная формула (5.8) обеспечивает точность вычисления ζ_0 порядка 8—10%.

В случае пласта со свободной поверхностью величина ζ_0 также определяется по табл. 12 или формуле (5.8), причем вместо m и l принимаются их осредненные величины

$$m = H_0 - 0,5s_0 \text{ и } l = l_0 - 0,5s_0, \quad (5.9)$$

где H_0 — средняя естественная глубина потока;

l_0 — глубина погружения рабочей части скважины в водоносный пласт (разность отметок естественного уровня подземных вод и низа рабочей части скважины).

Здесь величины ζ_1 и ζ_2 также находятся по табл. 12 или формуле (5.8), где вместо r_0 принимаются r_1 (для ζ_1) и r_2 (для ζ_2).

Для безнапорного пласта значения m и l берутся по формуле (5.9). Отметим, что часто величины ζ_2 по сравнению с ζ_1 и ζ_1 по сравнению с ζ_0 являются малыми. Тогда их можно принять равными нулю. В случае совершенных скважин будет: $l=m$; $\zeta_0=\zeta_1=\zeta_2=0$, и формулы (5.1)—(5.6) обращаются в известные уравнения Дюпюи и Форхгеймера. При $\frac{m}{r_{1,2}} < 1$ величины ζ_1 и $\zeta_2 \approx 0$, но $\zeta_0 \neq 0$.

Положительной особенностью данного метода является то обстоятельство, что он может применяться, несмотря на то, что при опытных откачках движение подземных вод является неустановившимся. Это обуславливается тем, что в ограниченной зоне вблизи опытной скважины, где размещены контрольные скважины, практически установившееся движение подземных вод достигается сравнительно быстро.

Определение водопроницаемости пласта для случая перетекания подземных вод из соседнего (верхнего или нижнего) водоносного горизонта

В этом случае по данным откачки находятся коэффициенты фильтрации водоносного пласта k и пород кровли или подошвы k_0 , отделяющих водоносный пласт от соседнего горизонта ($k > k_0$).

В соответствии с исследованием проф. Н. К. Гириного [25], величины k и k_0 определяются следующим образом:

1) сначала находится величина $\sigma = \frac{k}{k_0}$. Она определяется по способу последовательных приближений из уравнения

$$\frac{s_0}{s} = \frac{K_0\left(\frac{r_0}{\sqrt{\sigma mm_0}}\right) + \zeta_0}{K_0\left(\frac{r}{\sqrt{\sigma mm_0}}\right) + \zeta_1}, \quad (5.10)$$

где m и m_0 — мощности водоносного пласта и малопроницаемых пород его кровли или подошвы;

r_0 — радиус скважины;

s_0 и s — понижения в центральной и контрольной скважинах (контрольная скважина находится на расстоянии r от центральной);

K_0 — цилиндрическая функция первого рода нулевого порядка (определяется по таблицам, имеющимся в справочнике по математике).

При $\frac{r}{\sqrt{\sigma mm_0}} < 0,3$ функция $K_0(x) \approx \ln \frac{1,12}{x}$ и тогда вместо формулы (10) будет следующая:

$$\ln \sigma = 2 \frac{s \left(\ln 1,12 \frac{\sqrt{mm_0}}{r_0} + \zeta_0 \right) - s_0 \ln 1,12 \frac{\sqrt{mm_0}}{r} + \zeta_1}{s_0 - s}, \quad (5.11)$$

2) по найденной таким образом величине σ далее определяют

$$k = \frac{q}{2\pi ms_0} \left(\ln 1,12 \frac{\sqrt{\sigma mm_0}}{r_0} + \zeta_0 \right), \quad k_0 = \frac{k}{\sigma}, \quad (5.12)$$

где q — дебит скважины.

§ 6. ОТКАЧКИ В ПЛАСТАХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ (неустановившийся режим фильтрации)

Решение для притока воды к несовершенной скважине в напорном пласте при неустановившемся движении фильтрующейся жидкости впервые было получено А. Л. Хейном. Нами это решение было уточнено таким же образом, как и в условиях установившегося движения (посредством введения осредненного напора в скважине). В результате, решение задачи было представлено в виде хорошо сходящегося ряда.

Следует отметить, что в более поздней работе [66] А. Л. Хейн также вводит осредненный напор на поверхности скважины. Однако вычисления А. Л. Хейна оказались ошибочными. Поэтому в настоящей работе приводятся значения сопротивления, обусловленного несовершенством скважины, по новым вычислениям. При этих расчетах для определения интеграла, входящего в указанный выше ряд, мы пользовались таблицами А. Хантуша, что позволило получить результаты с точностью примерно до $\pm 5\%$.

Как видим ниже, коэффициент пьезопроводимости a в общем случае приходится находить по способу последовательных приближений (первый способ). Кроме того, при некоторых значениях параметра $\frac{r^2}{4at}$ (или p) коэффициент a может вычисляться по простым формулам (второй способ). Такое упрощение определения a оказывается возможным при больших t , когда режим фильтрации становится квази-стационарным.

Определение параметров пласта по одной скважине

Откачки при постоянном дебите. Рассмотрим откачку из опытной скважины с длиной водоприемной части l_0 и радиусом r_0 при дебите $q = \text{const}$. Будем считать, что мощность пласта равна m_0 , а расстояния первой и второй наблюдательных скважин от опытной — r_1 и r_2 ($r_2 > r_1$). Водоприемная часть скважины размещена по одной из схем рис. 2.

Пусть при откачке для этой скважины в моменты времени t_1 и t_2 ($t_1 < t_2$) после начала откачки понижения в центральной скважине равны $s_1 = s'_0$ и $s_2 = s''_0$, понижения в первой наблюдательной $s_1 = s'_1$ и $s_2 = s''_1$ и второй $s_1 = s'_2$ и $s_2 = s''_2$.

Первый способ

Рассмотрим определение параметров по первой наблюдательной скважине. Величина a находится по формуле

$$a = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_1^2}{u_1 t_1}. \quad (6.1)$$

Эта формула относится как к напорному, так и к безнапорному пластам.

Величина k подсчитывается по уравнениям:
напорный пласт

$$k = \frac{q}{4\pi m_0 s_1} R(u_1); \quad (6.2)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q}{2\pi(2H_0 - s_1) s_1} R(u_1). \quad (6.3)$$

Здесь s_1 и s_2 — понижения в наблюдательной скважине в моменты времени t_1 и t_2 (т. е. $s_1 = s'_1$ и $s_2 = s''_1$). Величина u_1 определяется по способу последовательных приближений по уравнениям:
для напорного пласта

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{R(u_1)}{R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}; \quad (6.4)$$

для безнапорного пласта

$$\frac{s_1(2H_0 - s_1)}{s_2(2H_0 - s_2)} = \frac{R(u_1)}{R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}, \quad (6.5)$$

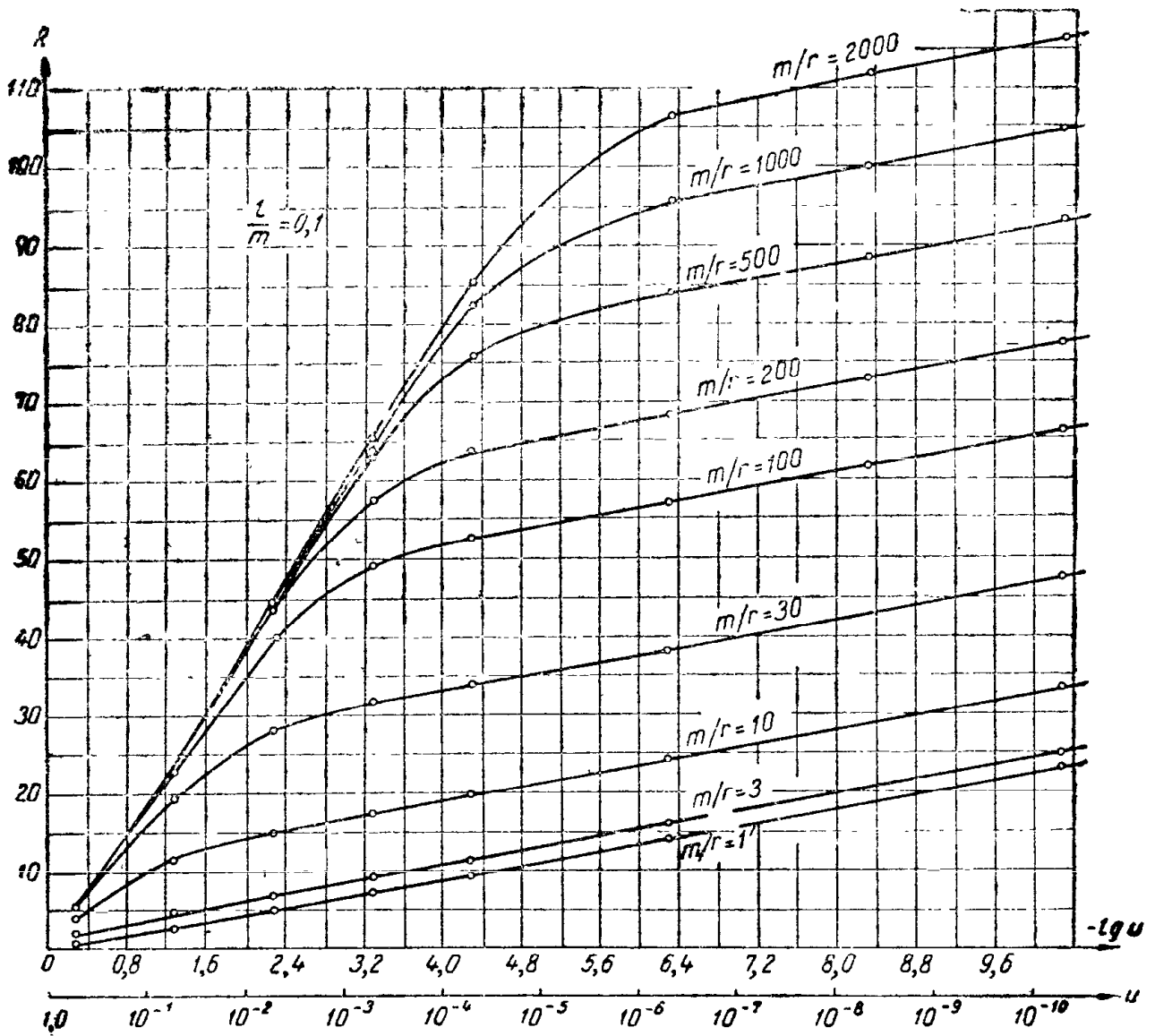


Рис. 26. Кривые зависимости $R=f(u)$ при $\frac{l}{m}=0,1$

где R — общее сопротивление пласта. Согласно нашему исследованию [14], величина $R(u, \frac{l}{m}, \frac{m}{r})$ выражается следующим образом:

$$R = -Ei(-u) + \zeta\left(u, \frac{l}{m}, \frac{m}{r}\right), \quad (6.6)$$

где

$$\zeta = \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{m}{l}\right)^2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\pi n \frac{l}{m}\right)\right]^2 \omega(u, b_n); \quad (6.7)$$

Функция $R\left(\frac{l}{m}, \frac{m}{r}, u\right)$

Таблица 13

$\frac{l}{m}$	$u \backslash \frac{m}{r}$	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	$5 \cdot 10^{-11}$	23,3	25,2	33,5	47,6	66,6	78	93,3	104,9	116,7
	$5 \cdot 10^{-7}$	14,1	16	24,3	38,4	57,4	68,8	84,1	95,7	106,7
	$5 \cdot 10^{-5}$	9,45	11,4	19,7	33,8	52,8	63,9	76,3	82,5	85,5
	$5 \cdot 10^{-4}$	7,15	9,06	17,4	31,4	49,3	57,4	63,3	64	65,5
	$5 \cdot 10^{-3}$	4,85	6,76	15,1	28,1	39,7	43,5	43,9	44	44,2
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,59	4,50	11,7	19,2	22,5	22,6	23,1	23,1	23,1
	0,5	0,679	1,81	3,94	4,98	5,21	5,22	5,24	5,24	5,24
0,3	$5 \cdot 10^{-11}$	23,2	24,4	27,9	32,2	37,7	40,8	45	48,1	51,4
	$5 \cdot 10^{-7}$	14	15,2	18,7	23,1	28,5	31,6	35,7	38,9	41,7
	$5 \cdot 10^{-5}$	9,42	10,6	14,1	18,5	23,8	26,8	29,1	29,9	30,3
	$5 \cdot 10^{-4}$	7,11	8,32	11,8	16,2	20,7	22	22,7	22,8	22,9
	$5 \cdot 10^{-3}$	5,82	6,02	9,51	13,1	14,9	15,2	15,4	15,4	15,4
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,56	3,76	6,40	7,58	7,99	8,04	8,06	8,06	8,06
	0,5	0,649	1,26	1,68	1,79	1,82	1,83	1,83	1,83	1,83
0,5	$5 \cdot 10^{-11}$	23,2	23,8	25,4	27,4	29,6	31	32,8	34,1	35,6
	$5 \cdot 10^{-7}$	14	14,6	16,2	18,1	20,4	21,8	23,6	24,9	26,1
	$5 \cdot 10^{-5}$	9,38	9,98	11,6	13,5	15,8	17,1	17,9	18,2	18,4
	$5 \cdot 10^{-4}$	7,07	7,68	9,28	11,2	13,1	13,5	13,8	13,8	13,9
	$5 \cdot 10^{-3}$	4,78	5,38	6,99	8,51	9,15	9,28	9,33	9,34	9,34
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,52	3,12	4,28	4,71	4,85	4,87	4,88	4,88	4,88
	0,5	0,608	0,897	1,05	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,11
0,7	$5 \cdot 10^{-11}$	23,2	23,4	24	24,8	25,8	26,4	27,1	27,7	28,3
	$5 \cdot 10^{-7}$	13,9	14,2	14,8	15,6	16,6	17,2	17,9	18,5	19
	$5 \cdot 10^{-5}$	9,34	9,56	10,2	11	12	12,5	13	13,1	13,2
	$5 \cdot 10^{-4}$	7,04	7,26	7,90	8,71	9,53	9,77	9,90	9,92	9,94
	$5 \cdot 10^{-3}$	4,74	4,96	5,60	6,27	6,60	6,66	6,69	6,69	6,69
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,48	2,71	3,19	3,41	3,48	3,49	3,49	3,49	3,49
	0,5	0,576	0,688	0,766	0,786	0,792	0,792	0,793	0,793	0,793

$\frac{l}{m}$	u	$\frac{m}{r}$								
		1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,9	$5 \cdot 10^{-11}$	23,1	23,2	23,3	23,4	23,7	23,8	24	24,2	24,3
	$5 \cdot 10^{-7}$	13,9	14	14,1	14,2	14,5	14,6	14,8	14,9	15,1
	$5 \cdot 10^{-5}$	9,33	9,35	9,45	9,63	9,86	10	10,2	10,2	10,3
	$5 \cdot 10^{-4}$	7,03	7,05	7,15	7,33	7,55	7,65	7,72	7,73	7,74
	$5 \cdot 10^{-3}$	4,73	4,75	4,85	5,01	5,16	5,19	5,21	5,21	5,21
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,47	2,49	2,58	2,67	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
	0,5	0,562	0,575	0,602	0,614	0,629	0,617	0,618	0,618	0,618

причем

$$w(u, b_n) = \int_u^{\infty} \exp - \left(v + \frac{b_n^2}{4v} \right) \frac{dv}{v}; \quad (6.8)$$

$$b_n = \pi n \frac{r}{m}, \quad u = \frac{r^2}{4at}. \quad (6.9)$$

При расчетах величина R находится из составленных нами графиков (рис. 26—29) или из табл. 13.

При определении $R(u_1)$ по графику считается $u = u_1$, а при определении $R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)$ принимается $u = u_1 \frac{t_1}{t_2}$. Кроме того, при определении R берется:

для напорного пласта

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_1}; \quad (6.10)$$

для безнапорного пласта

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}{H_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}{r_1}. \quad (6.11)$$

В формулах (6.10) и (6.11) s'_0 и s''_0 — понижения в центральной скважине в моменты времени t_1 и t_2 .

При определении a и k по центральной скважине величины s_1 и s_2 в формулах (6.1) и (6.10) принимаются равными понижениям в центральной скважине в моменты времени t_1 и t_2 (т. е. $s_1 = s'_0$, $s_2 = s''_0$). Вместе с тем величина r_1 считается равной радиусу центральной скважины r_0 .

Аналогично при определении k и a по второй наблюдательной скважине в формулах (6.1) — (6.10) вместо s_1 , s_2 и r_1 принимаются s_2' , s_2'' и r_2 .

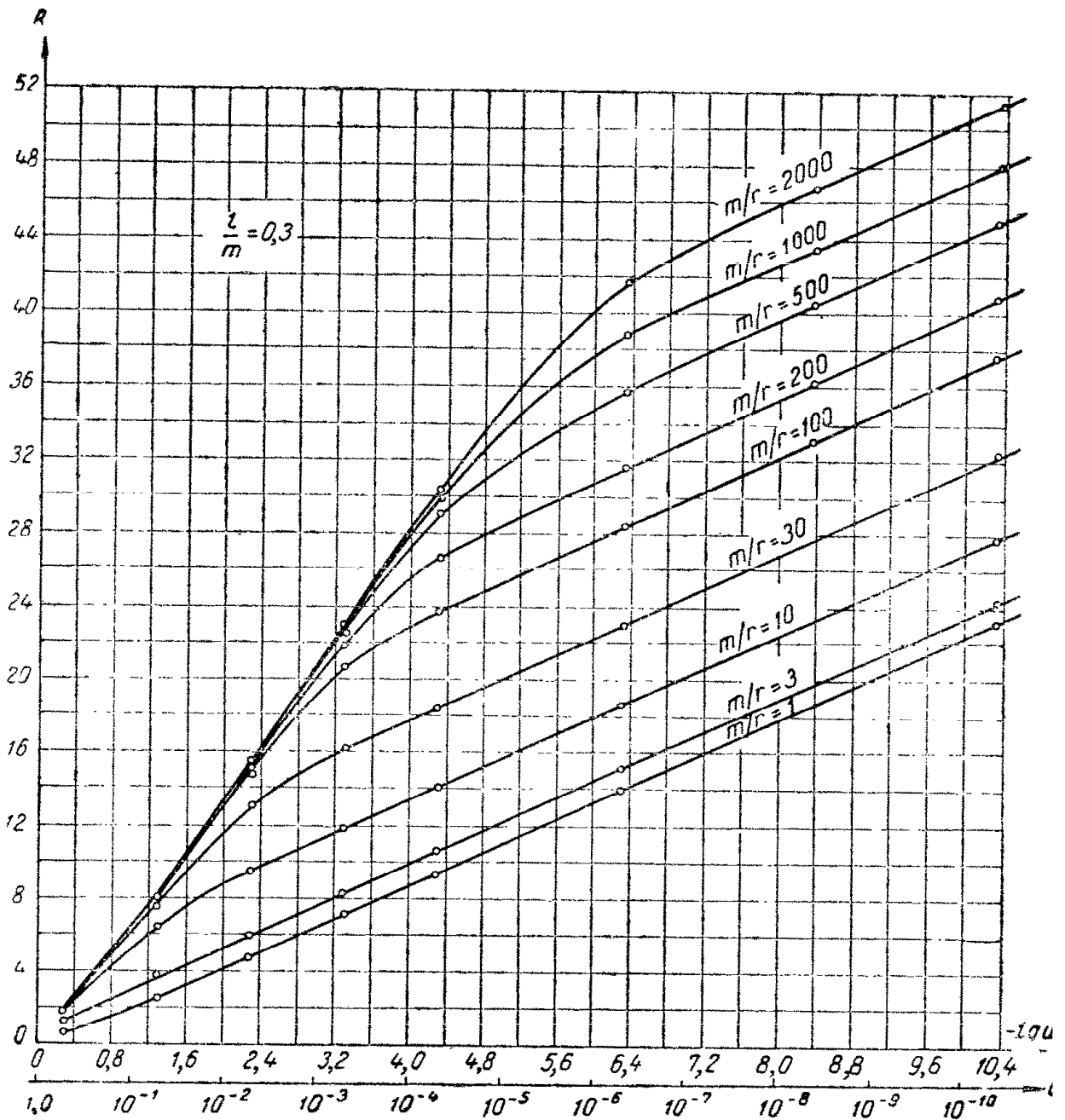


Рис. 27. Кривые зависимости $R=f(u)$ при $\frac{l}{m} = 0,3$

В случае совершенной опытной скважины $\left(\frac{l}{m} = 1\right)$ величины a и k вместо формул (6.1) — (6.3) определяются по уравнениям:

$$a = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_1^2}{u_1 t_1}, \quad (6.12)$$

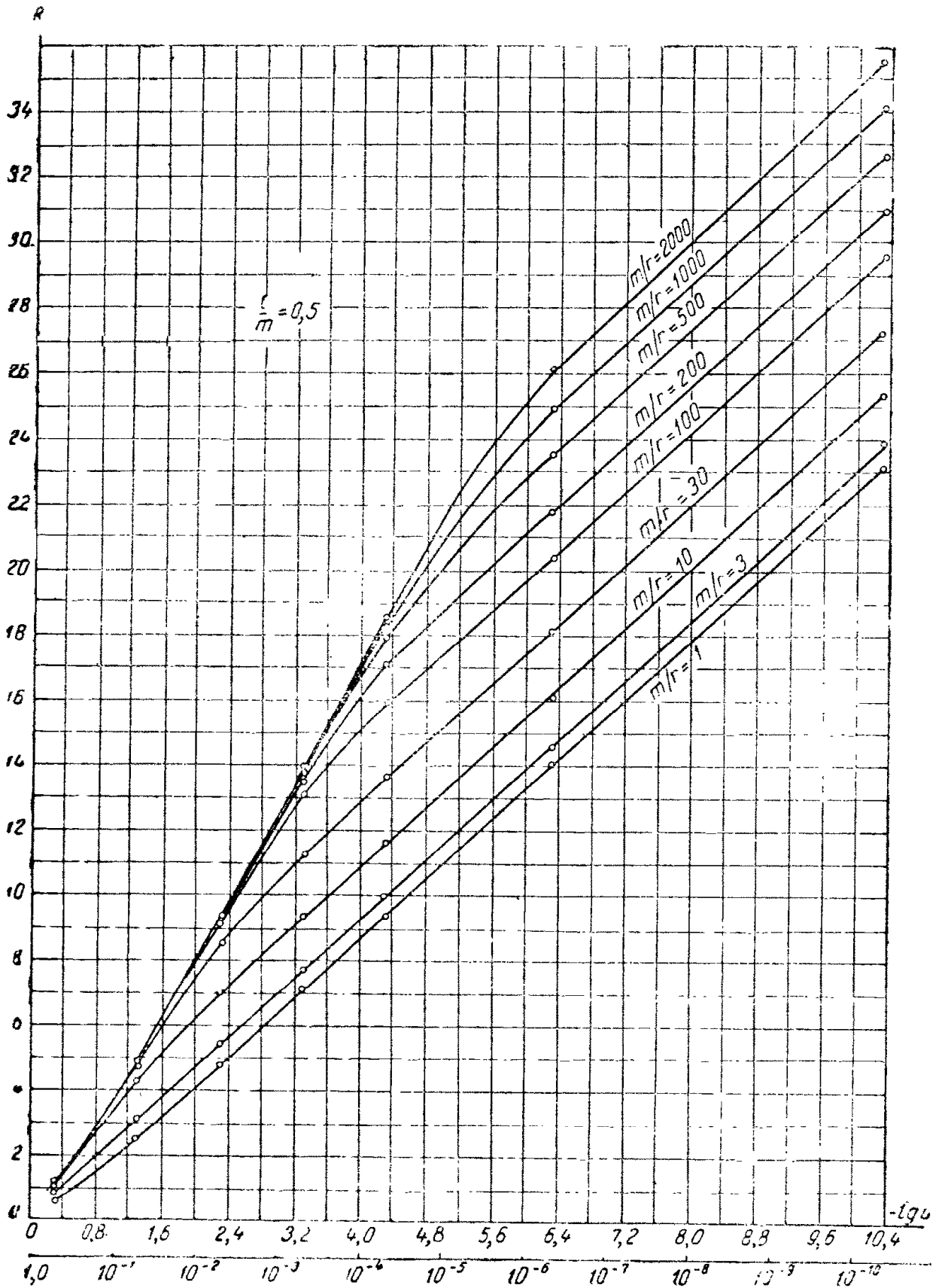


Рис. 28. Кривые зависимости $R=f(u)$ при $\frac{l}{m}=0,5$

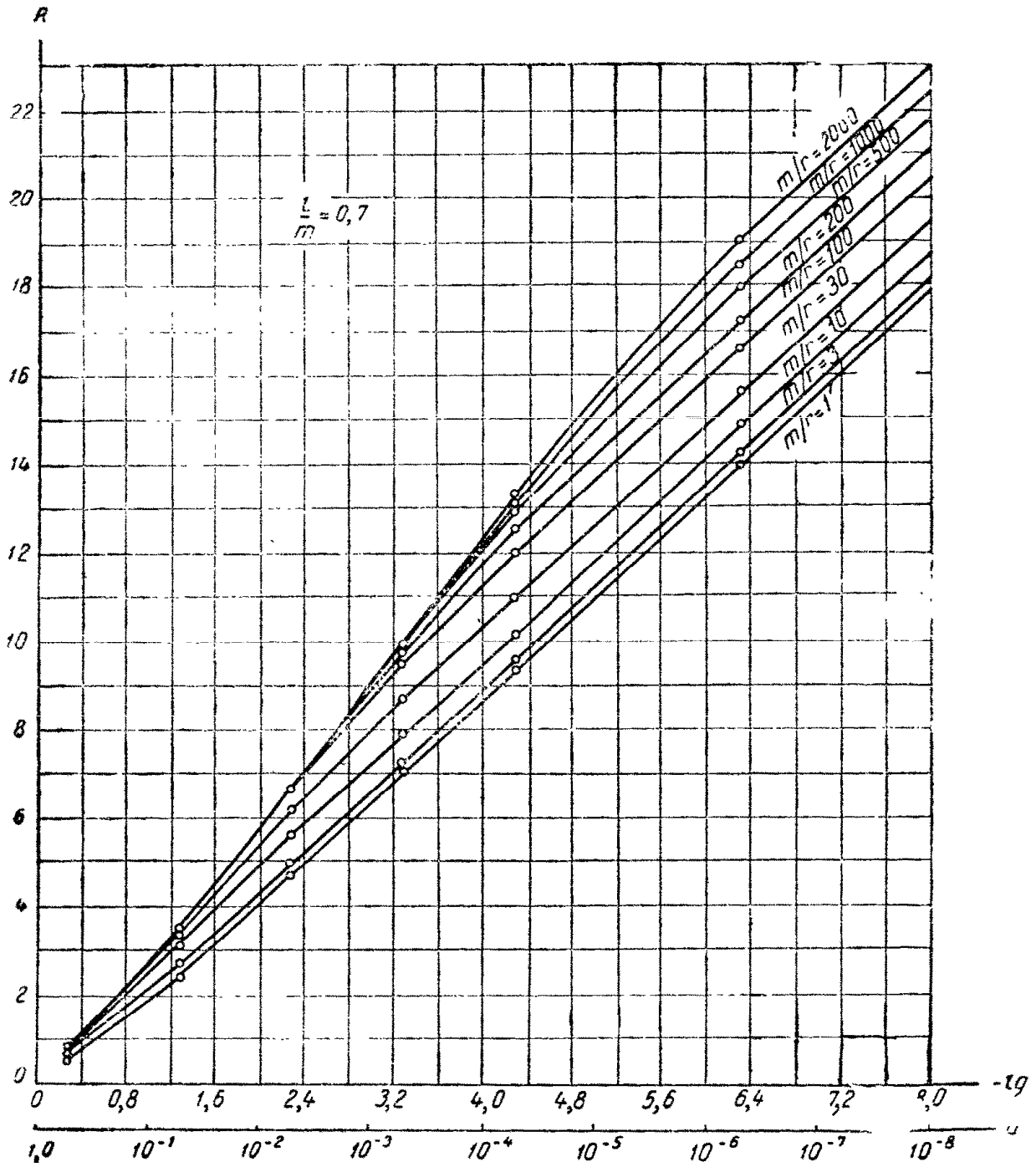


Рис. 29. Кривые зависимости $R=f(u)$ при $\frac{l}{m} = 0,7$

$$\left. \begin{aligned} k &= -\frac{q}{4\pi m_0 s_1} Ei(-u_1); \\ k &= -\frac{q}{2\pi(2H_0 - s_1)} Ei(-u_1), \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

где Ei — интегральный экспоненциал, значения которого приведены в табл. 14.

$$\text{Функция } Ei(-x) = \int_{-\infty}^{-x} \frac{e^x}{x} dx$$

x	$Ei(-x)$	x	$Ei(-x)$	x	$Ei(-x)$	x	$Ei(-x)$
0	$-\infty$	0,34	-0,815	0,68	-0,388	1,2	-0,158
0,01	-4,04	0,35	-0,794	0,69	-0,381	1,3	-0,136
0,02	-3,35	0,36	-0,775	0,7	-0,374	1,4	-0,116
0,03	-2,96	0,37	-0,755	0,71	-0,367	1,5	-0,1
0,04	-2,68	0,38	-0,737	0,72	-0,36	1,6	-0,0863
0,05	-2,47	0,39	-0,719	0,73	-0,353	1,7	-0,0747
0,06	-2,3	0,4	-0,702	0,74	-0,347	1,8	-0,0647
0,07	-2,15	0,41	-0,686	0,75	-0,34	1,9	-0,0562
0,08	-2,03	0,42	-0,67	0,76	-0,334	2	-0,0489
0,09	-1,92	0,43	-0,655	0,77	-0,328	2,1	-0,0426
0,1	-1,82	0,44	-0,64	0,78	-0,322	2,2	-0,0372
0,11	-1,74	0,45	-0,625	0,79	-0,316	2,3	-0,0325
0,12	-1,66	0,46	-0,611	0,8	-0,311	2,4	-0,0284
0,13	-1,59	0,47	-0,698	0,81	-0,305	2,5	-0,0249
0,14	-1,52	0,48	-0,585	0,82	-0,3	2,6	-0,0219
0,15	-1,46	0,49	-0,572	0,83	-0,294	2,7	-0,0192
0,16	-1,41	0,5	-0,56	0,84	-0,289	2,8	-0,0169
0,17	-1,36	0,51	-0,548	0,85	-0,284	2,9	-0,0148
0,18	-1,31	0,52	-0,536	0,86	-0,279	3	-0,013
0,19	-1,26	0,53	-0,525	0,87	-0,274	3,1	-0,0115
0,2	-1,22	0,54	-0,514	0,88	-0,269	3,2	-0,0101
0,21	-1,18	0,55	-0,503	0,89	-0,265	3,3	-0,00894
0,22	-1,15	0,56	-0,493	0,9	-0,26	3,4	-0,00789
0,23	-1,11	0,57	-0,483	0,91	-0,256	3,5	-0,00697
0,24	-1,08	0,58	-0,473	0,92	-0,251	3,6	-0,00616
0,25	-1,04	0,59	-0,464	0,93	-0,247	3,7	-0,00545
0,26	-1,01	0,6	-0,454	0,94	-0,243	3,8	-0,00482
0,27	-0,985	0,61	-0,445	0,95	-0,239	3,9	-0,00427
0,28	-0,957	0,62	-0,437	0,96	-0,235	4	-0,00378
0,29	-0,931	0,63	-0,428	0,97	-0,231	4,1	-0,00335
0,3	-0,906	0,64	-0,42	0,98	-0,227	4,2	-0,00297
0,31	-0,882	0,65	-0,412	0,99	-0,223	4,3	-0,00263
0,32	-0,958	0,66	-0,404	1	-0,219	4,4	-0,00234
0,33	-0,836	0,67	-0,396	1,1	-0,186	4,5	-0,00207

Здесь формула для a применима к напорному и безнапорному пластам; первая формула для k относится к напорному пласту, а вторая — к безнапорному. В этих формулах величина u_1 предварительно находится по способу последовательных приближений по уравнениям:

напорный пласт

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{Ei(-u_1)}{Ei\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}; \quad (6.14)$$

безнапорный пласт

$$\frac{s_1(2H_0 - s_1)}{s_2(2H_0 - s_2)} = \frac{Ei(-u_1)}{Ei\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}, \quad (6.15)$$

где, как и раньше, s_1 и s_2 — понижения в наблюдательной скважине в моменты времени t_1 и t_2 ;

H_0 — естественная мощность безнапорного пласта.

Для центральной скважины в формулах (6.13) — (6.15) принимается $r_1 = r_0$, а s_1 и s_2 считаются равными понижениям в центральной скважине.

При расстоянии наблюдательной скважины от центральной $r_1 > m$ влияние несовершенства можно не учитывать и считать $R(x) = -Ei(-x)$.

Изложенный первый способ определения k и a применим при любых значениях u , $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$, для которых по графику R возможна надежная интерполяция (обычно при $\frac{l}{m} = 0,1 \div 0,9$; $\frac{m}{r} = 1 \div 2000$ и $u = 5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-2}$).

Второй способ.

В случае относительно малых $u_1 = \frac{r_1^2}{4at_1}$, что обычно имеет место для центральной скважины, вычисление a и k существенно упрощается. В этом случае величины a и k определяются по формулам для квази-стационарного режима фильтрации:

напорный пласт

$$a = 0,445 \frac{r_1^2}{t_1} e^{\rho - z_1}; \quad (6.16)$$

$$k = \frac{q}{4\pi ms_1} \rho = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{m(s_2 - s_1)}, \quad (6.17)$$

где

$$\rho = \frac{s_1}{s_2 - s_1} \ln \frac{t_2}{t_1}; \quad (6.18)$$

безнапорный пласт

$$a = 0,445 \frac{r_1^2}{t_1} e^{\rho - z_1}; \quad (6.19)$$

$$k = \frac{q\rho}{2\pi s_1(2H_0 - s_1)} = 0,366 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{(2H_0 - s_1 - s_2)(s_2 - s_1)}, \quad (6.20)$$

где

$$\rho = \frac{s_1(2H_0 - s_1)}{(s_2 - s_1)(2H_0 - s_1 - s_2)} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (6.21)$$

Здесь ζ_1 — коэффициент несовершенства скважины для установившегося режима фильтрации, определяемый по табл. 12 при следующих значениях $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$:

напорный пласт

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_1}, \quad (6.22)$$

где m_0 — мощность пласта;

l_0 — длина рабочей части скважины;

безнапорный пласт

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}{H_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0)}{r_1}, \quad (6.23)$$

где H_0 — мощность безнапорного пласта;

s'_0 и s''_0 — понижения в опытной скважине в моменты времени t_1 и t_2 .

Аналогично предыдущему в уравнениях (6.16) — (6.23) при определении a и k по центральной скважине будет:

$$s_1 = s'_0; \quad s_2 = s''_0; \quad r_1 = r_0; \quad \zeta_1 = \zeta_0.$$

Формулы (6.12) — (6.21) предложены автором в 1954 г. [15. 20]. Приближенные формулы (6.16) — (6.23) применимы при условии

$$\frac{r_1^2}{4at_1} \leq u_r, \quad (6.24)$$

где u_r — некоторое предельное значение u_1 , зависящее от $\frac{m_1}{r_1}$ и $\frac{l}{m}$.

Подставляя в эти неравенства значение a из формулы (6.16) или (6.19), найдем

$$\rho \geq \rho_r + \zeta_1, \quad (6.25)$$

где

$$\rho_r = \ln \frac{0,562}{u_r}.$$

Величины ρ_r показаны на графике (рис. 30) в зависимости от $\frac{m}{r}$ и $\frac{l}{m}$. Величина ρ находится по формулам (6.16) и (6.19),

а ζ_1 берется из табл. 12 в зависимости от $\frac{m}{r}$ и $\frac{l}{m}$. Таким образом,

для выяснения применимости второго метода расчета необходимо определить величину ρ по формуле (6.16) или (6.19) и сравнить ее значение с величиной $\rho_r + \zeta_1$. При $\rho \geq \rho_r + \zeta_1$ приближенные формулы (6.16) — (6.21) обеспечивают точность определения k до 5%.

На графике рис. 31 показаны кривые $\rho_s = f\left(\frac{l}{m}, \frac{m}{r}\right)$.

Если

$$p \geq p_s + \zeta_0; \quad \frac{m}{r_0} \geq 100, \quad (6.26)$$

то приближенные формулы (6.16) — (6.21) также могут быть применены, но точность определения по ним k будет порядка 20% (наибольшие ошибки имеют место при $\frac{m}{r} = 100$). Кривыми p_s можно пользоваться только для центральной скважины. Величины p_r и p_s можно рассматривать как показатели относи-

$$p_r = l_n \frac{0,562}{u}$$

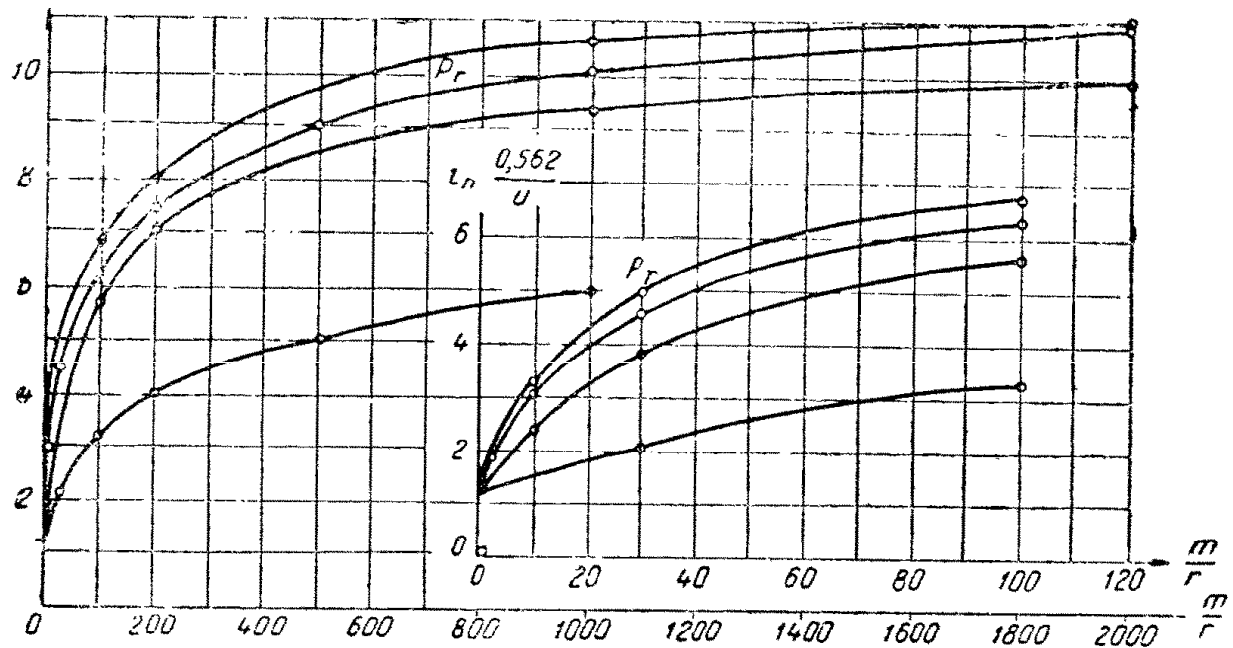


Рис. 30. Кривые зависимости $p_r = f\left(\frac{m}{r}, \frac{l}{m}\right)$

тельной стабилизации фильтрационного потока (на рис. 30 для первой сверху кривой $\frac{l}{m} = 0,3$, для второй — $\frac{l}{m} = 0,1$, для третьей — $\frac{l}{m} = 0,7$ и для четвертой — $\frac{l}{m} = 0,9$).

В случае совершенных скважин при относительно малых u будут справедливы формулы (6.16) — (6.21), в которых необходимо принимать $\zeta_1 = 0$.

Для совершенных скважин, а также при $\frac{m}{r_1} \leq 1$ эти формулы будут иметь более широкую область применения. Они обеспечивают точность вычисления k до 5—7% при

$$p \geq 1,32. \quad (6.27)$$

Опытные откачки при постоянном понижении. Рассмотрим откачку из опытной скважины с длиной водоприемной части l_0 и радиусом r_0 при постоянном понижении $s_0 = \text{const}$. Размещение водоприемной части скважины в пласте принимается по одной из ранее указанных схем. Первая и вторая наблюдательные скважины расположены на расстояниях r_1 и r_2 от опытной

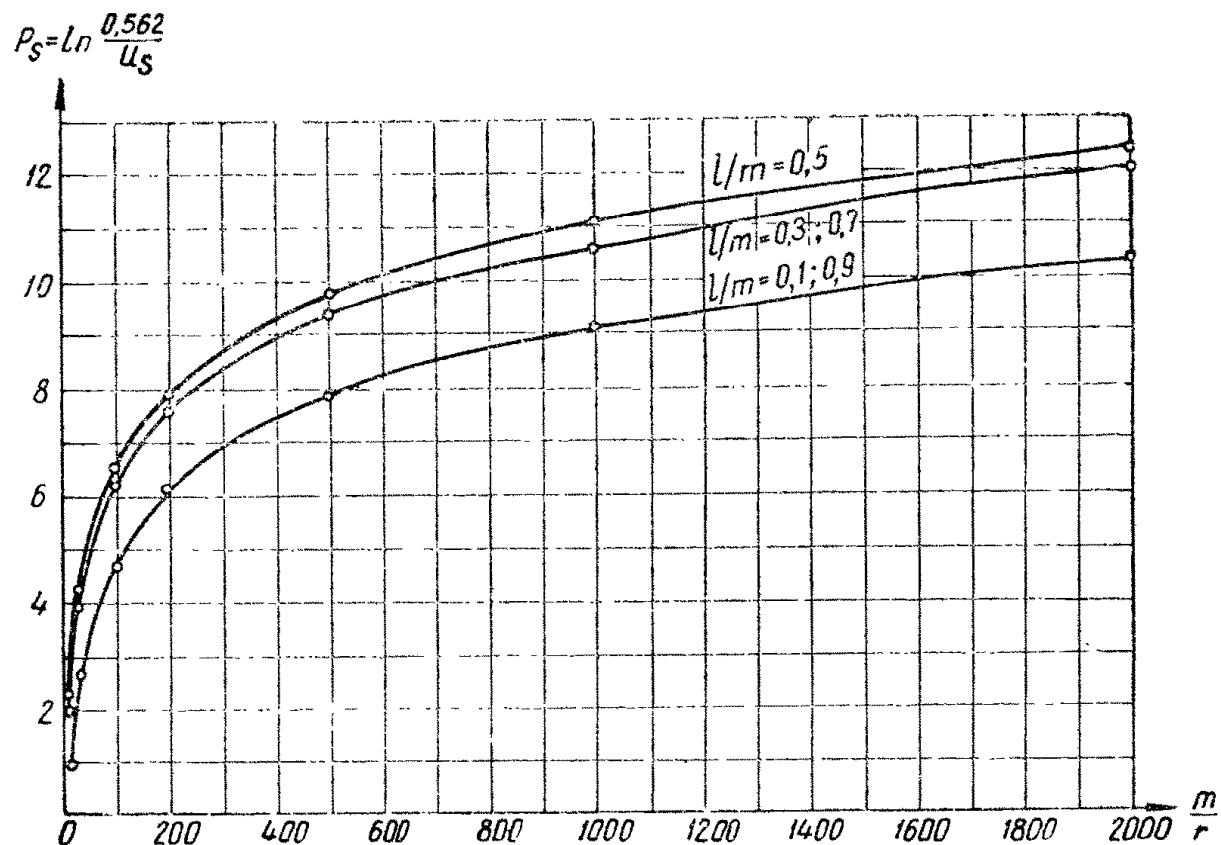


Рис. 31. Кривые зависимости $p_s = f\left(\frac{m}{r}; \frac{l}{m}\right)$

($r_2 > r_1$). Пусть при откачке из опытной скважины в моменты времени t_1 и t_2 после начала откачки дебиты составили q_1 и q_2 , а понижения в первой наблюдательной были s'_1 и s''_1 , а во второй наблюдательной — s'_2 и s''_2 .

Первый способ

В случае одной центральной скважины коэффициент пьезопроводности a находится по формуле

$$a = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_0^2}{u_1 t_1}, \quad (6.28)$$

относящейся к напорному и безнапорному пластам.

Коэффициент фильтрации подсчитывается по формулам:
напорный пласт

$$k = \frac{q_1}{4\pi m s_0} R(u_1); \quad (6.29)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q_1}{2\pi (2H_0 - s_0) s_0} R(u_1). \quad (6.30)$$

Здесь R — суммарное фильтрационное сопротивление, зависящее от величин u , $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$ и определяемое по графикам рис. 26—29.

При этом величина u_1 находится по способу последовательных приближений из уравнения:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{R(u_1)}{R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}, \quad (6.31)$$

которое относится к напорному и безнапорному пластам.

В уравнениях (6.29) — (6.31) при определении $R(u_1)$ по графикам принимается $u = u_1$, а при определении $R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)$ считается, что $u = u_1 \frac{t_1}{t_2}$. Кроме того, при определении R по графикам принимается:

напорный пласт

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_0}; \quad (6.32)$$

безнапорный пласт

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,5s_0}{H_0 - 0,5s_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,5s_0}{r_0}. \quad (6.33)$$

Определение величин a и k по этим уравнениям производится в следующем порядке. Принимаются три произвольных значения u_1 , находят величины $\frac{l}{m}$, $\frac{m}{r}$ и по графикам для всех значений u_1 определяются

$$R\left(u_1, \frac{l}{m}, \frac{m}{r}\right) \text{ и } R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}, \frac{l}{m}, \frac{m}{r}\right).$$

Далее строится график зависимости правой части уравнения (6.31) от u_1 и на нем по известному значению $\frac{q_2}{q_1}$ определяется искомая величина u_1 . Для этой величины u_1 по графикам находится значение $R(u_1)$ и затем по формулам (6.29) или (6.30) находится k , а по формуле (6.28) a .

В случае совершенной скважины $\left(\frac{l}{m} = 1\right)$ величина R зависит только от u и равна

$$R(u_1) = -Ei(-u_1);$$

$$R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right) = -Ei\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right). \quad (6.34)$$

В этом случае при определении R вместо графиков следует пользоваться таблицами функции Ei . При постоянном понижении s_0 определение R через Ei возможно при условии, когда

$$\frac{r_0^2}{at_1} \leq 0,25. \quad (6.35)$$

В случае определения параметров по наблюдательной скважине формулы для k и a (6.28) — (6.30) остаются без изменений, но в них вместо r_0 принимается расстояние наблюдательной скважины от центральной r_1 и вместо s_0 берется понижение в наблюдательной скважине к моменту t_1 , равное $s_1 = s_1'$. В формуле для u_1 (6.31) дебиты q_1, q_2 заменяются для напорного потока удельными дебитами $\frac{q_1}{s_1}, \frac{q_2}{s_2}$ и для безнапорного потока — удельными водопритоками

$$\frac{q_1}{s_1(H_0 - 0,5s_1)}; \quad \frac{q_2}{s_2(H_0 - 0,5s_2)}.$$

Здесь $s_2 = s_1'$ — понижение в наблюдательной скважине к моменту t_2 .

При этом условие (6.35) для наблюдательной скважины часто оказывается невыполненным. Тогда величину $R(u)$ вычисляют по формуле

$$R(u) = R_m(u) + Ei(-u) + g(u), \quad (6.36)$$

где $R_m(u)$ — значение функции R по табл. (13);

$g(u)$ — поправка, найденная нами по данным Джекоба и Ломана (табл. 15).

Таблица 15

Функция $g(u)$

u	0,0025	0,025	0,25	2,5	25
$g(u)$	5,7	3,7	2	0,91	0,32

Второй способ.

При относительно малых значениях u_1 , что чаще всего имеет место для центральной скважины, вычисления a и k весьма упрощаются.

В этом случае величина a находится по формуле (6.37) для квази-стационарного режима фильтрации, т. е.

$$a = 0,445 \frac{r_0^2}{t_1} e^{p-\zeta_0}, \quad (6.37)$$

где

$$p = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (6.38)$$

Эта формула применима как к напорному, так и к безнапорному пластам. Коэффициент фильтрации подсчитывается по формулам:

напорный пласт

$$k = \frac{q_1}{4\pi m_0 s_0} p, \quad (6.39)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q_1}{2\pi (2H_0 - s_0) s_0} p. \quad (6.40)$$

Эти приближенные формулы применимы при условии

$$\frac{r_0^2}{4at_1} \leq u_r, \quad (6.41)$$

где u_r — некоторое предельное значение u_1 . Подставляя в это неравенство значение a из формулы (6.37), вместо формулы (6.41), получим

$$p \geq p_r + \zeta_0, \quad (6.42)$$

где

$$p_r = \ln \frac{0,562}{u_r}. \quad (6.43)$$

Величина p_r находится из графика (рис. 30) в зависимости от $\frac{m}{r}$ и $\frac{l}{m}$.

В случае совершенных скважин величины a и k определяются по тем же формулам (6.37) — (6.40), причем в формуле (6.37) принимается $\zeta_0 = 0$.

Для совершенных скважин, а также при $\frac{m}{r} \leq 1$, эти формулы применимы при соблюдении условия (6.27).

При $\frac{m}{r_0} \geq 100$ в качестве критерия применимости приближенных формул вместо p_r можно принимать величину p_s по графику (рис. 31). При использовании в качестве критерия величин p_r

и p_s точность определения коэффициента фильтрации, как и ранее, составляет 5 и 20%.

В случае определения параметров по наблюдательной скважине в формулах (6.37) и (6.41) вместо r_0 принимается r_1 , а в уравнениях (6.39) и (6.40) вместо s_0 берется $s_1 = s'_1$. Кроме того, вместо формулы (6.38) принимается:

для напорного потока

$$p = \frac{\frac{s_1}{q_1}}{\frac{s_2}{q_2} - \frac{s_1}{q_1}} \ln \frac{t_2}{t_1}; \quad (6.44)$$

для безнапорного потока

$$p = \frac{\frac{s_1 (H_0 - 0,5s_0)}{q_1}}{\frac{s_2 (H_0 - 0,5s_2)}{q_2} - \frac{s_1 (H_0 - 0,5s_1)}{q_1}} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (6.45)$$

Иначе говоря, в этом случае в формуле (6.38) вместо дебитов вводятся удельные дебиты и водопритоки.

Применение второго способа для наблюдательных скважин определяется условием (6.42) при $r_0 = r_1$ и $\zeta_0 = \zeta_1$

Определение параметров пласта по двум скважинам

В данном случае расчетные формулы будут одинаковы как при откачках с постоянным дебитом, так и при откачках с постоянным понижением.

Первый способ

Рассмотрим определение величин a и k по данным о понижениях на один и тот же момент времени t в двух скважинах (первой наблюдательной s_1 и второй наблюдательной s_2). В общем случае величина a определяется по формуле

$$a = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_2^2}{u_2 t}, \quad (6.46)$$

а величина k по уравнениям:

напорный пласт

$$k = \frac{q}{4\pi m_0 s_2} R(u_2); \quad (6.47)$$

безнапорный пласт

$$k = \frac{q}{2\pi (2H_0 - s_2) s_2} R(u_2). \quad (6.48)$$

Для расчета по этим уравнениям предварительно находится величина u_2 . Последняя определяется по способу последовательных приближений из уравнений:

напорный пласт

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{R\left(u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)}{R(u_2)}; \quad (6.49)$$

безнапорный пласт

$$\frac{s_1(2H_0 - s_1)}{s_2(2H_0 - s_2)} = \frac{R\left(u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)}{R(u_2)}. \quad (6.50)$$

Здесь величина R равна общему сопротивлению пласта и находится по графику (рис. 26—29) или по табл. 13, в зависимости от значений u , $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$.

При определении $R\left(u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)$ по графику величины u , $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$ считаются равными:

напорный пласт

$$u = u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}; \quad \frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_1}; \quad (6.51)$$

безнапорный пласт

$$u = u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}; \quad \frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,5s_0}{H_0 - 0,5s_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,5s_0}{r_1}. \quad (6.52)$$

При определении $R(u_2)$ по графику величины u , $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$ принимаются:

напорный пласт

$$u = u_2; \quad \frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_2}; \quad (6.53)$$

безнапорный пласт

$$u = u_2; \quad \frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,5s_0}{H_0 - 0,5s_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,5s_0}{r_2}, \quad (6.54)$$

В этих формулах: m_0 — естественная мощность напорного пласта; H_0 — то же, безнапорного; r_1 и r_2 — расстояния первой и второй наблюдательных скважин от центральной; s_0 , s_1 и s_2 — понижения в центральной, первой и второй наблюдательных в момент времени t ; q — дебит в тот же момент.

При определении a и k по центральной и контрольной скважинам используются те же формулы (6.46) — (6.50), в которых вместо понижения в первой наблюдательной скважине s_1 и ее расстояния от центральной r_1 подставляются соответственно понижение в центральной скважине s_0 и ее радиус r_0 .

Для совершенных скважин $\left(\frac{l}{m} = 1\right)$ функции $R(u_2)$ и $R\left(u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)$ не зависят от $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$ и равны

$$R(u_2) = -Ei(-u_2); \quad (6.55)$$

$$R\left(u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) = -Ei\left(-u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right). \quad (6.56)$$

В соответствии с этим для совершенных скважин величины a и k определяются по тем же уравнениям (6.46) — (6.50), в которые вместо R вводится интегральный экспоненциал, а формулы (6.51) — (6.54) для расчета не требуются. Уравнения (6.55) и (6.56) приближенно могут применяться и для несовершенных скважин, если $\frac{m}{r_1} \leq 1$. Приведенные формулы рекомендуется применять для значений $\frac{l}{m}$, $\frac{m}{r}$ и u , при которых возможна интерполяция при определении R по графикам (обычно при $\frac{l}{m} = 0,1 \div 0,9$; $\frac{m}{r} = 1 \div 2000$ и $u = 5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-2}$).

Второй способ

В случае относительно малых величин u_2 вычисления a и k значительно упрощаются.

В этом случае величина k может определяться по уравнениям стационарного режима фильтрации:

напорный пласт

$$k = 0,366 \frac{q \left[\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_1 - \zeta_2) \right]}{m (s_1 - s_2)}; \quad (6.57)$$

безнапорный пласт

$$k = 0,732 \frac{q \left[\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_1 - \zeta_2) \right]}{(2H_0 - s_1 - s_2) (s_1 - s_2)}. \quad (6.58)$$

Здесь ζ_1 и ζ_2 — коэффициенты несовершенства для первой и второй наблюдательных скважин, определяемые по табл. 12 при следующих значениях $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$:

напорный пласт
для ζ_1

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_1}; \quad (6.59)$$

для ζ_2

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{m_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_0}{r_2}; \quad (6.60)$$

безнапорный пласт
для ζ_1

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,5s_0}{H_0 - 0,5s_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,5s_0}{r_1}; \quad (6.61)$$

для ζ_2

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0 - 0,5s_0}{H_0 - 0,5s_0}; \quad \frac{m}{r} = \frac{H_0 - 0,5s_0}{r_2}. \quad (6.62)$$

При $\frac{m}{r_1} \ll 1$ можно считать, что $\zeta_1 = \zeta_2 = 0$ (как и в случае совершенных скважин). Тогда уравнения (6.57) и (6.58) будут аналогичны формулам Дюпюи.

При найденном значении k далее по формулам квази-стационарного режима фильтрации находится коэффициент a , равный

$$a = 0,445 \frac{r_2^2}{t} e^{p-\zeta_2}, \quad (6.63)$$

где суммарное сопротивление p находится так:
напорный пласт

$$p = 4\pi \frac{kms_2}{q}; \quad (6.64)$$

безнапорный пласт

$$p = 2\pi \frac{k(2H_0 - s_2)s_2}{q}. \quad (6.65)$$

При определении k и a по центральной и контрольной скважинам в уравнениях (6.57) — (6.65), как и раньше, вместо s_1 и r_1 берутся величины s_0 и r_0 . В случае совершенных скважин $\left(\frac{l}{m} = 1\right)$ в формулах (6.57), (6.58) и (6.63) $\zeta_1 = \zeta_2 = 0$. В этом случае уравнения (6.59) — (6.62) для расчета не требуются.

Уравнения (6.57) и (6.58) представлены в традиционной форме Дюпюи—Тима (для установившейся фильтрации при действии совершенной скважины) и Маскета (для установившейся фильтрации при действии несовершенной скважины).

Более компактно уравнения (6.57) — (6.58) и (6.63) — (6.65) могут быть представлены следующим образом:

напорный пласт

$$a = 0,445 \frac{r_2^2}{t} e^{p-\zeta_2}; k = \frac{q}{4\pi ms_2} p, \quad (6.66)$$

где

$$p = \frac{s_2}{s_1 - s_2} \left[2 \ln \frac{r_2}{r_1} + (\zeta_1 - \zeta_2) \right]; \quad (6.67)$$

безнапорный пласт

$$a = 0,445 \frac{r_2^2}{t} e^{p-\zeta_2}; k = \frac{q}{2\pi (2H_0 - s_2) s_2} p, \quad (6.68)$$

где

$$p = \frac{s_2 (2H_0 - s_2)}{(s_1 - s_2) (2H_0 - s_1 - s_2)} \left[2 \ln \frac{r_2}{r_1} + (\zeta_1 - \zeta_2) \right]. \quad (6.69)$$

Приведенные выше приближенные формулы применимы при следующем условии:

$$\frac{r_2^2}{4at} \leq u_r,$$

где u_r — некоторое предельное значение величины $\frac{r_2^2}{4at}$. Подставляя в это неравенство значение a , получим

$$p \geq p_r + \zeta_2, \quad (6.70)$$

где

$$p_r = \ln \frac{0,562}{u_r}. \quad (6.71)$$

Здесь величина p определяется из формул (6.67) и (6.69), а p_r берется из приведенного выше графика в зависимости от $\frac{m}{r_2}$ и $\frac{l}{m}$. В случае совершенных скважин и при $\frac{m}{r_1} \leq 1$ достаточно соблюдения лишь условия (6.27).

Как и ранее, точность определения k по приближенным формулам — до 5% (при $\zeta = 0$ — до 5—7%).

Во всех рассмотренных выше случаях величина u_r определялась из условия, чтобы сопротивление R по точной формуле (6.6) отличалось от значения R по приближенной формуле

$$R = \ln \frac{0,562}{u} + \zeta \left(\frac{m}{r}, \frac{l}{m} \right) \quad (6.72)$$

не более чем на 5% (ζ в формуле 6.72 находится по уравнению 5.7).

Обобщая условия применения различных методов расчета для пласта ограниченной мощности, можно отметить:

- 1) этот метод применим при $\frac{l}{m} \geq 0,1$;
- 2) если $p > p_r + \zeta$, то при расчетах следует пользоваться формулами для установившегося режима фильтрации.
- 3) если $p < p_r + \zeta$, то следует пользоваться формулами неустановившегося режима фильтрации.

§ 7. ОТКАЧКИ В ПЛАСТАХ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ (установившийся режим фильтрации)

При опытных откачках под пластом неограниченной мощности следует понимать пласт, у которого мощность m значительно больше длины рабочей части скважины l (при $\frac{l}{m} \leq 0,1$). В этом случае уравнения для пласта ограниченной мощности оказываются близкими к более простым уравнениям для пласта бесконечно большой мощности, которыми и следует пользоваться для определения фильтрационных характеристик пласта. Водоприемная часть опытной скважины может быть размещена у кровли или подошвы пласта (первый случай) и внутри пласта (второй случай).

Во втором случае кратчайшее расстояние водоприемной части скважины до кровли или подошвы пласта c не должно быть меньше $\frac{1}{3}m$ ($c > \frac{1}{3}m$), где m — мощность напорного пласта (или глубина безнапорного). Кроме того, длина и расположение открытой части наблюдательных скважин в пласте должны быть такими же, как длина и размещение в пласте водоприемной части центральной скважины.

Решение для скважины в пласте неограниченной мощности было получено Ф. Форхгеймером. Для определения проницаемости пород оно впервые было применено Н. М. Победоносцевым [52].

Это решение, как и в задаче М. Маскета, основано на замене скважины реальной цилиндрической формы линейным стоком той же длины с одинаковой по высоте интенсивностью. Для определения напора в скважине В. М. Насберг в 1946 г. и В. Д. Бабушкин в 1949 г. воспользовались указанной выше гипотезой М. Маскета ($z = \frac{3}{4}l$) и получили формулу для дебита скважины в рассматриваемых условиях. В. Д. Бабушкин тогда же применил эту формулу к определению коэффициента фильтрации по данным откачек [1, 5]. Нами эти решения были уточнены посредством введения средневзвешенного потенциала на поверхности скважины.

В отличие от пласта ограниченной мощности в данном случае коэффициент фильтрации может определяться по одной скважине (центральной или наблюдательной) без введения расстояния до ближайшей границы пласта с заданным напором (т. е. до реки, озера и т. п.). Кроме того, как и в пласте ограниченной мощности, коэффициент фильтрации может быть определен по двум скважинам (центральной и контрольной). Рассмотрим откачку из скважины с водоприемной частью длиной l и радиусом r_0 . Пусть при опытной откачке из этой скважины с дебитом q понижение в центральной скважине равно s_0 , а в контрольной скважине, находящейся на расстоянии r от центральной, оно равно s . Расчетные формулы для определения коэффициента фильтрации по этим данным приводятся ниже.

Определение параметров пласта по одной скважине (центральной или наблюдательной)

Для центральной скважины в случае напорного пласта имеем

$$k = \frac{q \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0} \right)}{2\pi l s_0} = 0,366 \frac{q \lg \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0} \right)}{l s_0}. \quad (7.1)$$

Здесь коэффициент ξ зависит от размещения водоприемной части скважины в пласте. При расположении ее у кровли и подошвы пласта величина $\xi = 1$ и при расположении ее внутри пласта величина $\xi = 2$.

Отметим, что формула (7.1) отличается от аналогичных уравнений Ф. Форхгеймера, Н. К. Гиринского и В. М. Насберга — В. Д. Бабушкина лишь значением числового коэффициента под знаком логарифма. Этот коэффициент у Ф. Форхгеймера равен 2, у Н. К. Гиринского — 1,6 и у В. М. Насберга — В. Д. Бабушкина — 1,32. Коэффициент 1,47 получен, исходя из среднего значения напора на поверхности скважины.

В случае безнапорного пласта для определения k применяется формула (7.1), а величины l и ξ назначаются следующим образом.

При затопленной водоприемной части скважины, когда она размещена внутри пласта или у его подошвы, величина l в (7.1) принимается равной полной длине водоприемной части скважины l_0 , а коэффициент $\xi = 2$ (внутри пласта) и $\xi = 1$ (у подошвы пласта). При незатопленной водоприемной части скважины, когда она располагается у свободной поверхности потока, величина l в формуле (7.1) принимается равной

$$l = l_0 - 0,5s_0, \quad (7.2)$$

где l_0 — погружение водоприемной части скважины под естественный (статический) уровень подземных вод. В этом случае коэффициент $\xi = 1$.

В соответствии с этим при незатопленной скважине формула (1) имеет вид

$$k = 0,366 \frac{q \lg \left(1,47 \frac{l_0 - 0,5s_0}{r_0} \right)}{(l_0 - 0,5s_0) s_0}. \quad (7.3)$$

Формулы (7.1) и (7.3) применимы при $\frac{l}{r_0} \geq 10$.

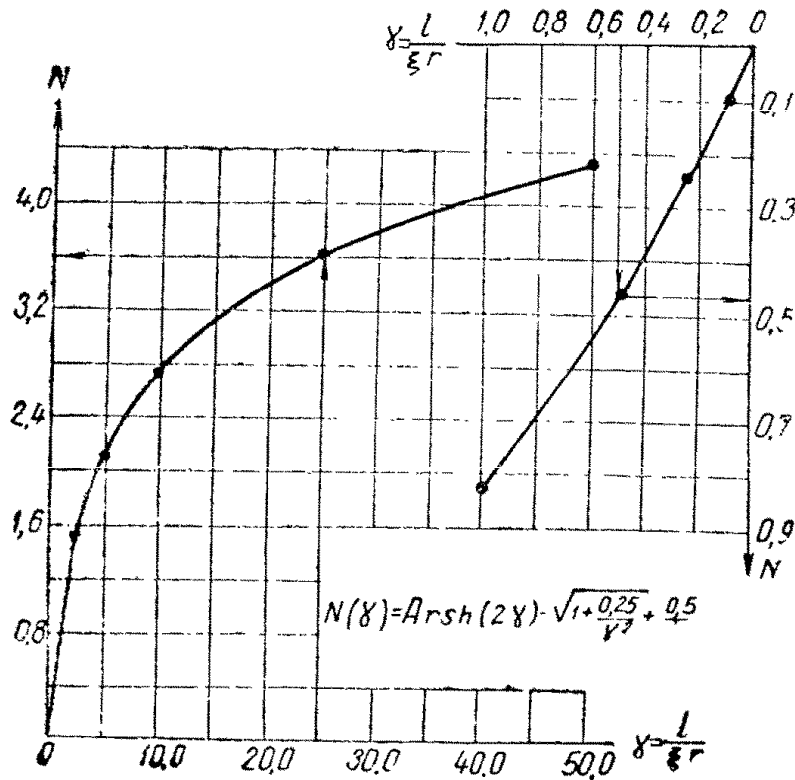


Рис. 32. График зависимости $N = f\left(\frac{l}{\xi r}\right)$

Для наблюдательной скважины в случае напорного пласта имеем

$$k = \frac{q}{2\pi l s} N\left(\frac{l}{\xi r}\right), \quad (7.4)$$

где

$$N\left(\frac{l}{\xi r}\right) = \text{arsh}\left(2 \frac{l}{\xi r}\right) - \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{\xi r}{l}\right)^2} + 0,5 \frac{\xi r}{l}, \quad (7.5)$$

где r — расстояние наблюдательной скважины от центральной. Значения $N\left(\frac{l}{\xi r}\right)$ определяются по графику (рис. 32) при значениях ξ , таких же, как и для центральной скважины.

В случае безнапорного пласта для определения коэффициента фильтрации используются уравнения (7.4) и (7.5). При этом

в случаях расположения водоприемной части скважины у подошвы пласта или внутри его (т. е. при затопленном фильтре) величина l считается равной полной длине рабочей части скважины l_0 . При расположении же рабочей части скважины у свободной поверхности подземных вод величина l определяется по формуле (7.2). Значения коэффициента ξ принимаются те же, что и в случае центральной скважины.

Определение параметров по центральной и наблюдательной скважинам (или по двум наблюдательным скважинам)

В случае центральной и наблюдательной скважин имеем

$$k = \frac{q}{2\pi l (s_0 - s_1)} \left[N\left(\frac{l}{\xi r_0}\right) - N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) \right]. \quad (7.6)$$

Здесь при $\frac{l}{\xi r_0} \geq 10$

$$N\left(\frac{l}{\xi r_0}\right) = \ln\left(1,47 \frac{l}{\xi r_0}\right). \quad (7.7)$$

В случае двух наблюдательных скважин будет следующее:

$$k = \frac{q}{2\pi l (s_1 - s_2)} \left[N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) - N\left(\frac{l}{\xi r_2}\right) \right]. \quad (7.8)$$

В этих формулах s_1 и s_2 — понижения в контрольных скважинах, находящихся на расстояниях r_1 и r_2 от центральной.

Функция $N\left(\frac{l}{\xi r}\right)$ находится по графику (рис. 32). Формулы (7.6) и (7.8) относятся к напорному и безнапорному пластам, причем в случае незатопленного фильтра величина l определяется по формуле (7.2).

§ 8. ОТКАЧКИ В ПЛАСТАХ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ (неустановившийся режим фильтрации)

Действие скважины в пласте неограниченной мощности при неустановившемся режиме фильтрации рассмотрено в работе [14]. Пользуясь приведенным в этой работе решением, можно определять фильтрационные характеристики пород по результатам опытной откачки, используя данные по одной скважине (центральной или наблюдательной) и по двум скважинам (двум наблюдательным или наблюдательной и центральной скважинам).

Ниже приводятся расчетные формулы для определения коэффициента фильтрации k и коэффициента пьезопроводности a при постоянном дебите и постоянном понижении в опытной скважине. Эти формулы близки к аналогичным уравнениям для пласта ограниченной мощности. Они могут быть получены из

этих уравнений, если в них принять коэффициенты несовершенства ζ_0, ζ_1 и ζ_2 равными нулю, и заменить мощность пласта длиной водоприемной части опытной скважины l [14]. Эти формулы пригодны при относительно небольшой длительности откачек. Условия применения их зависят от значения параметра p , характеризующего степень стабилизации фильтрационного потока.

Рассмотрим откачку из скважины с длиной водоприемной части l_0 и радиусом r_0 . Пусть при этой откачке в моменты времени t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) зарегистрированы понижения в опытной скважине s'_0 и s''_0 при дебите $q = \text{const}$ или дебиты q_1 и q_2 при понижении $s_0 = \text{const}$. Пусть в те же моменты времени понижения в первой контрольной скважине равны s'_1 и s''_1 и во второй — s'_2 и s''_2 . Расстояния первой и второй контрольных скважин от опытной пусть будут r_1 и r_2 ($r_1 < r_2$).

Определение параметров пласта по одной скважине

Откачки с постоянным дебитом $q = \text{const}$. В этом случае имеем

$$a = 0,25 \frac{r^2}{u_1 t_1}; \quad (8.1)$$

$$k = - \frac{q}{4\pi l s_1} Ei(-u_1), \quad (8.2)$$

где u_1 находится с помощью способа последовательных приближений из уравнения

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{Ei(-u_1)}{Ei\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}. \quad (8.3)$$

Если величины a и k определяются по центральной скважине, то в этих формулах принимается $r = r_0, s_1 = s'_0, s_2 = s''_0$, где s'_0 и s''_0 — понижения в центральной скважине в моменты времени t_1 и t_2 . Если величины k и a находятся по контрольной скважине, то в этих уравнениях принимается $r = r_1; s_1 = s'_1; s_2 = s''_1$, где s'_1 и s''_1 — понижения в контрольной скважине в те же моменты времени ($s_1 < s_2$). Для центральной и контрольной скважин величина l в формуле (8.2) принимается следующим образом. В случае напорного пласта, а также в случае безнапорного пласта при затопленном фильтре величина l считается равной длине водоприемной части скважины l_0 . В случае безнапорного пласта при незатопленном фильтре величина l принимается равной

$$l = l_0 - 0,25 (s'_0 + s''_0), \quad (8.4)$$

где l_0 — глубина погружения водоприемной части скважины ниже естественного уровня подземных вод;

s_0' и s_0'' — понижения в опытной скважине в моменты времени t_1 и t_2 .

При малых $\frac{r^2}{4at_1}$ (квази-стационарный режим) вместо формул (8.1) — (8.3) имеем

$$a = 0,445 \frac{r^2}{t_1} - e^p; \quad (8.5)$$

$$k = \frac{q}{4\pi l s_1} p = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{l (s_2 - s_1)}, \quad (8.6)$$

где

$$p = \frac{s_1}{s_2 - s_1} \ln \frac{t_2}{t_1}, \quad (8.7)$$

а величина l принимается равной l_0 или находится по формуле (8.4).

Формулы (8.1) — (8.3) применимы при условии

$$-Ei\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right) \leq 2N\left(\frac{l}{\xi r}\right), \quad (8.8)$$

где N определяется уравнением (7.5).

Формулы (8.5) — (8.7) применимы при соблюдении условий

$$\ln \frac{2,25at_2}{r^2} \leq 2N\left(\frac{l}{\xi r}\right), \quad \frac{r^2}{4at_1} \leq 0,15. \quad (8.9)$$

Подставляя в формулы (8.9) значение a по формуле (8.5), получим

$$p \leq p_q, \quad (8.10)$$

$$p \geq 1,32, \quad (8.11)$$

где

$$p_q = 2 \frac{s_1}{s_2} N\left(\frac{l}{\xi r}\right). \quad (8.12)$$

Для центральной скважины при $\frac{l}{\xi r_0} \geq 10$ величина p_q будет

$$p_q = 2 \frac{s_1}{s_2} \ln\left(1,47 \frac{l}{\xi r_0}\right). \quad (8.13)$$

Таким образом, вычислив величины p и p_q , можно выбрать необходимые расчетные формулы для определения k и a .

В формулах (8.12) и (8.13) при размещении фильтра у подошвы или кровли пласта принимается $\xi=1$, а при размещении его внутри пласта будет $\xi=2$. Величина l в формулах (8.12) и (8.13) принимается аналогично указанному выше.

Откачки при постоянном понижении. В случае центральной скважины для напорного и безнапорного пластов величины a и k будут следующими:

$$a = 0,445 \frac{r_0^2}{t_1} e^p; \quad (8.14)$$

$$k = \frac{q_1}{4\pi l s_0} p = 0,183 \frac{q_1 q_2}{q_1 - q_2} \cdot \frac{\lg \frac{t_2}{t_1}}{l s_0}, \quad (8.15)$$

где

$$p = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (8.16)$$

Эти формулы применимы при условиях, когда

$$1,32 \leq p \leq p_q, \quad (8.17)$$

где

$$p_q = 2 \frac{q_2}{q_1} \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0} \right). \quad (8.18)$$

В случае наблюдательной скважины для напорного и безнапорного пласта имеем

$$a = 0,445 \frac{r^2}{t_1} e^p, \quad (8.19)$$

$$k = \frac{q_1}{4\pi l s_1} p = 0,183 \frac{\lg \frac{t_2}{t_1}}{l \left(\frac{s_2}{q_2} - \frac{s_1}{q_1} \right)}, \quad (8.20)$$

где

$$p = \frac{\left(\frac{s_1}{q_1} \right)}{\left(\frac{s_2}{q_2} \right) - \left(\frac{s_1}{q_1} \right)} \ln \frac{t_2}{t_1}; \quad (8.21)$$

Здесь s_1 и s_2 — понижения в наблюдательной скважине в моменты времени t_1 и t_2 ($s_1 = s_1'$; $s_2 = s_2''$); q_1 и q_2 — расходы опытной скважины в те же моменты ($q_1 > q_2$); r — расстояние наблюдательной скважины от центральной. Эти формулы применимы при условиях, когда

$$1,32 \leq p \leq p_q; \quad p_q = 2 \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{q_2}{q_1} N \left(\frac{l}{\xi r} \right), \quad (8.22)$$

где N определяется по формуле (7.5).

Величина ξ в формулах (8.18) и (8.22), как и ранее, считается равной 1 или 2.

Величина l в формулах (8.15), (8.18), (8.20) и (8.22) принимается в случаях затопленных фильтров $l=l_0$ и незатопленных фильтров $l=l_0-0,5 s_0$ (при незатопленных фильтрах величина l равна погружению фильтра ниже естественного уровня подземных вод).

Определение параметров пласта по двум скважинам

При откачках с постоянным дебитом или понижением для определения параметров по двум наблюдательным скважинам имеем

$$a = \frac{r_2^2}{4u_2 t}; \quad (8.23)$$

$$k = -\frac{q_0}{4\pi l s_2} Ei(-u_2). \quad (8.24)$$

Здесь величина u_2 находится из уравнения

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{Ei\left(-u_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)}{Ei(-u_2)}, \quad (8.25)$$

где s_1 и s_2 — понижения в наблюдательных скважинах в один и тот же момент времени t ($s_1 > s_2$);

r_1 и r_2 — расстояния наблюдательных скважин от центральной ($r_1 < r_2$).

При определении параметров по центральной и наблюдательной скважинам в этих формулах вместо r_1 следует принять радиус центральной скважины r_0 и вместо s_1 — понижение в центральной скважине s_0 .

При относительно малых значениях $\frac{r_2^2}{4at}$ (квази-стационарный режим) вместо формул (8.23) — (8.25) имеем:

$$a = 0,445 \frac{r_2^2}{t} e^p; \quad (8.26)$$

$$k = \frac{q}{4\pi l s_2} p, \quad (8.27)$$

где

$$p = 2 \frac{s_2}{s_1 - s_2} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (8.28)$$

При определении параметров по центральной и контрольной скважинам, как и ранее принимается, $r_1=r_0$ и $s_1=s_0$.

Формулы (8.23) — (8.25) относятся к откачкам с постоянным дебитом $q = \text{const}$. Они применимы при условиях, когда

$$p \leq p_q; p_q = \frac{2 \left[N \left(\frac{l}{\xi r_1} \right) - N \left(\frac{l}{\xi r_2} \right) \right]}{1 - \frac{s_2}{s_1}} \quad (8.29)$$

или

$$\ln \frac{r_2}{r_1} \leq N \left(\frac{l}{\xi r_1} \right) - N \left(\frac{l}{\xi r_2} \right), \quad (8.30)$$

где N определяется уравнением (7.5).

При определении параметров по центральной и контрольной скважинам, если $\frac{l}{\xi r_0} \geq 10$, то в условии (8.30) можно принять

$$N \left(\frac{l}{\xi r_0} \right) \approx \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0} \right), \quad (8.31)$$

где r_0 — радиус центральной скважины.

Формулы (8.26) — (8.28) относятся к откачкам с постоянными дебитом и понижением. Они справедливы при соблюдении условия (8.30) и, кроме того, при дополнительном условии

$$p \geq 1,32. \quad (8.32)$$

В уравнении (8.27) при откачках с постоянным дебитом величина $q = q_0 = \text{const}$, а при откачках с постоянным понижением $q = q_t$, где q_t — дебит в момент времени t .

В формулах (8.24), (8.27) и (8.29) — (8.31) величина l принимается: для затопленных фильтров $l = l_0$ и для незатопленных $l = l_0 - 0,5 s_0$, где s_0 — понижение в центральной скважине в момент времени t . Величина ξ в формулах (8.29) — (8.31) равна 1 или 2.

Обобщая условия применения формул для пласта неограниченной мощности, имеем:

- 1) эти формулы применимы при $\frac{l}{m} \leq 0,1$;
- 2) если $p > p_q$, то следует пользоваться формулами для установившегося режима фильтрации (в этом случае по данным откачек определяется величина k);
- 3) если $p < p_q$ и $p < 1,32$, то необходимо применять уравнения для неустановившегося режима фильтрации (по ним определяются величины k и a);
- 4) если $p < p_q$ и, кроме того, $p > 1,32$, то следует пользоваться приближенными формулами, которые в этом случае обеспечивают точность определения водопроницаемости до 10%. Приближенные формулы при соблюдении этих условий применимы для откачек с постоянными дебитом и понижением в опытной скважине.

Следует также отметить, что расчетные формулы для пласта неограниченной мощности могут применяться и при $\frac{l}{m} > 0,1$. Это возможно при определении параметров по одной центральной скважине, если соблюдаются условия $\frac{m}{r_0} > 100$ и $p \leq p_s + \zeta_0$, где значения p , p_s и ζ_0 указаны в главе, относящейся к пласту ограниченной мощности.

§ 9. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОТКАЧЕК

Пример 1. Определить коэффициенты фильтрации и пьезопроводимости по данным откачки из напорного водоносного пласта на опытном кусте с одной наблюдательной скважиной при следующих исходных данных:

длина водоприемной части скважины $l=3$ м, радиус ее $r_0=0,2$ м;

расстояние наблюдательной скважины от опытной $r_1=20$ м;

мощность пласта $m=10$ м;

постоянный дебит во время откачки $q=15$ л/сек = 1 296 м³/сутки.

Таблица 16

Понижения во время откачки

Время в час.	Понижение в м	
	опытная скважина	наблюдательная скважина
$t_0 = 1$	$s_0 = 4,43$	$s_1 = 0,34$
$t_1 = 4$	$s_0' = 4,71$	$s_1' = 0,61$
$t_2 = 24$	$s_0'' = 5,08$	$s_1'' = 0,98$

Расчет производится по формулам § 6.

Расчет по двум скважинам

Коэффициент несовершенства скважин

Для центральной скважины (ζ_0).

При $\frac{l}{m} = \frac{3}{10} = 0,3$ $\frac{m}{r_0} = \frac{10}{0,2} = 50$.

По табл. 12 для этих значений $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r_0}$ находим

$$\zeta_0 \left(\frac{l}{m}; \frac{m}{r_0} \right) = 10,7.$$

Для контрольной скважины (ζ_1).

При $\frac{l}{m} = 0,3$ и $\frac{m}{r} = \frac{10}{20} = 0,5$ по табл. 12 находим $\zeta_1 = 0,003$.

Затем находим k и a для времени $t=1$ суткам.

Величины p и p_r :

$$p = \frac{s_1''}{s_0'' - s_1''} \left[2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \zeta_0 - \zeta_1 \right] =$$

$$= \frac{0,98}{5,08 - 0,98} \left[2 \ln \frac{20}{0,2} + 10,7 - 0,003 \right] = 4,76;$$

$$\frac{m}{r_1} = \frac{10}{20} = 0,5; \quad p_r \approx p_r + \zeta_1 \approx 1,32;$$

$$p > p_r + \zeta_1.$$

Следовательно, коэффициенты k и a можно найти по приближенным формулам:

коэффициент фильтрации

$$k = \frac{q}{4\pi ms_1} \quad p = \frac{1296}{4 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,98} \cdot 4,76 = 50,1 \text{ м/сутки};$$

коэффициент пьезопроводимости

$$a = 0,445 \frac{r_1^2}{t} e^{p-\zeta_1} = 0,445 \frac{20^2}{1} e^{4,76-0,003} = 20\,718 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Определим далее k и a для времени $t=0,167$ суток (4 часа).
Величина p :

$$p = \frac{s_1'}{s_0' - s_1'} \left[2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \zeta_0 - \zeta_1 \right] =$$

$$= \frac{0,61}{4,71 - 0,61} \left[2 \ln \frac{20}{0,2} + 10,7 - 0,003 \right] = 2,96;$$

$$p_r + \zeta_1 \approx 1,32; \quad p > p_r + \zeta_1.$$

Следовательно, можно пользоваться приближенными формулами:
коэффициент фильтрации

$$k = \frac{q}{4\pi ms_1'} \quad p = \frac{1296}{4 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,61} \cdot 2,96 = 50,1 \text{ м/сутки};$$

коэффициент пьезопроводимости

$$a = 0,445 \frac{r_1^2}{t_1} e^{p-\zeta_1} = 0,445 \frac{20^2}{0,167} e^{2,96-0,003} = 20\,508 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Расчет по одной скважине

1) Для центральной скважины

Величина p :

$$p = \frac{s_0'}{s_0' - s_0'} \ln \frac{t_2}{t_1} = \frac{4,71}{5,08 - 4,71} \ln \frac{1}{0,167} = 22,8;$$

$$\zeta_0 = 10,7; \quad \frac{m}{r_0} = \frac{10}{0,2} = 50; \quad \frac{l}{m} = 0,3; \quad p_r(50) = 5,34;$$

$$p_r + \zeta_0 = 5,34 + 10,7 = 16,04.$$

Следовательно, $p > p_r + \zeta_0$, и потому можно пользоваться приближенными формулами:

коэффициент пьезопроводимости

$$a = 0,445 \frac{r_0^2}{t_1} e^{p-\zeta_0} = 0,445 \frac{0,2^2}{0,167} e^{22,8-10,7} = 19\,118 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

коэффициент фильтрации

$$k = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{m (s_0'' - s_0')} = 0,183 \frac{1296 \lg \frac{1}{0,167}}{10 (5,08 - 4,71)} = 49,8 \text{ м/сутки}.$$

2) Для наблюдательной скважины

Величина p :

$$p = \frac{s_1'}{s_1'' - s_1'} \ln \frac{t_2}{t_1} = \frac{0,61}{0,98 - 0,61} \ln \frac{1}{0,167} = 2,95.$$

Величина p_r

$$\frac{l}{m} = \frac{3}{10} = 0,3; \quad \frac{m}{r_1} = \frac{10}{20} = 0,5; \quad p_r \approx 1,32.$$

Величина ζ

$$\frac{m}{r_1} = 0,5; \quad \zeta_1 = 0,003.$$

Следовательно, $p > p_r + \zeta_1$.

Коэффициент пьезопроводимости

$$a = 0,445 \frac{r_1^2}{t_1} e^{p-\zeta_1} = 0,445 \frac{20^2}{0,167} e^{2,95-0,003} = 20\,302 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Коэффициент фильтрации

$$k = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{m (s_1'' - s_1')} = 0,183 \frac{1296 \lg \frac{1}{0,167}}{10 (0,98 - 0,61)} = 49,8 \text{ м/сутки}.$$

Далее найдем a и k по точной формуле

$$\frac{s_1'}{s_1''} = \frac{R(u_1)}{R\left(u_1, \frac{t_1}{t_2}\right)}.$$

Принимаем

$$u = u_1 = 0,03;$$

$$R(u_1) = -E_i(-u_1) = -E_i(-0,03) = 2,96.$$

Далее

$$u_2 = u_1 \frac{t_1}{t_2} = 0,03 \cdot 0,167 = 0,005;$$

$$R\left(u_1, \frac{t_1}{t_2}\right) = -E_i\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right) = -E_i(-0,005) = 4,73.$$

Далее определяем

$$\frac{s_1'}{s_1''} = \frac{0,61}{0,98} = 0,622; \quad \frac{R(u_1)}{R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)} = \frac{2,96}{4,73} = 0,626.$$

Следовательно, величина u_1 найдена правильно.

Величины a и k :

$$a = \frac{r_1^2}{4u_1 t_1} = \frac{20^2}{4 \cdot 0,03 \cdot 0,167} = 19\,960 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$k = \frac{q}{4\pi m s_1}, \quad R(u_1) = \frac{1296}{4 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,61} \cdot 2,96 = 50,1 \text{ м/сутки}.$$

Пример 2. Определить параметры по данным откачки в напорном пласте неограниченной мощности (по центральной скважине). Расчет производится по формулам § 8.

Дано: длина водоприемной части скважины $l=20$ м; радиус ее $r_0=0,2$ м; дебит $q=q_0=2$ л/сек $=172,8$ м³/сутки; понижения: через $t_1=0,25$ суток $s_1=9,35$ м, через $t_2=0,5$ суток $s_2=10,07$, через $t_3=1$ сутки $s_3=10,25$.

Определяем величины p и p_q для периодов времени t_1 и t_2 :

$$p = \frac{s_1}{s_2 - s_1} \ln \frac{t_2}{t_1} = \frac{9,35}{10,07 - 9,35} \ln \frac{0,5}{0,25} = 9;$$

$$p_q = 2 \frac{s_1}{s_2} \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0}\right) = 2 \frac{9,35}{10,07} \ln \left(1,47 \frac{20}{1 \cdot 0,2}\right) = 9,27.$$

Так как $p < p_q$ и $p > 1,32$, то можно воспользоваться приближенными формулами неустановившейся фильтрации.

Параметры a и k :

$$a = 0,445 \frac{r_0^2}{t_1} e^p = 0,445 \frac{0,2^2}{0,25} e^9 = 577 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$k = \frac{q}{4\pi l s_1} p = \frac{172,8}{4 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 9,35} 9 = 0,653 \text{ м/сутки}.$$

Величины p и p_q для периодов времени t_3 и t_2 :

$$p = \frac{s_2}{s_3 - s_2} \ln \frac{t_3}{t_2} = \frac{10,07}{10,25 - 10,07} \ln \frac{1}{0,5} = 38,8;$$

$$p_q = 2 \frac{s_2}{s_3} \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0}\right) = 2 \frac{10,07}{10,25} \ln \left(1,47 \frac{20}{1 \cdot 0,2}\right) = 9,81.$$

Здесь $p > p_q$, и потому пользуемся уравнениями установившейся фильтрации.

Коэффициент фильтрации

$$k = \frac{q_0 \ln \left(1,47 \frac{l}{\xi r_0}\right)}{2\pi l s_3} = \frac{q_0 p_q}{4\pi l s_2} = \frac{172,8 \cdot 9,81}{4 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10,07} = 0,67 \text{ м/сутки}.$$

Пример 3. Определить параметры по данным той же откачки, что и в примере 2, используя показания контрольной скважины. Расчет производится по формулам § 8.

Дано: расстояние контрольной скважины от центральной $r=6,88$ м; дебит $q_0=172,8$ м³/сутки; понижения: через $t_1=0,25$ суток $s_1=2$ м, спустя $t_2=0,5$ суток $s_1=2,72$ м.

Определяем величины p и p_q для периодов времени t_1 и t_2 :

$$p = \frac{s_1'}{s_1'' - s_1'} \ln \frac{t_2}{t_1} = \frac{2}{2,72 - 2} \ln \frac{0,5}{0,25} = 1,93;$$

$$\frac{l}{\xi r} = \frac{20}{6,88} = 2,92; \quad p_q = 2 \frac{s_1'}{s_1''} N\left(\frac{l}{\xi r}\right) = 2 \frac{2}{2,72} \cdot 1,68 = 2,47.$$

Так как $p < p_q$ и $p > 1,32$, то можно воспользоваться приближенными формулами.

Параметры a и k :

$$a = 0,445 \frac{r^2}{t_1} e^p = 0,445 \frac{6,88^2}{0,25} e^{1,93} = 580 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$k = \frac{q_0}{4\pi l s_1'} p = \frac{172,8}{4 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 2} 1,93 = 0,653 \text{ м/сутки}.$$

ОПЫТНЫЕ НАГНЕТАНИЯ

§ 10. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПЫТНЫХ НАГНЕТАНИЙ И ИХ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Опытные нагнетания разделяют на два основных типа, а именно:

- нагнетания в неводоносные породы;
- нагнетания в водоносные породы.

В каждом из этих случаев в зависимости от мощности пласта нагнетания подразделяются на следующие виды:

- пласт ограниченной мощности;
- пласт неограниченной мощности.

Кроме того, в зависимости от гидравлического режима различают нагнетания:

- с постоянным давлением;
- с постоянным расходом.

Обычно нагнетания производятся при отсутствии наблюдательных скважин. Однако в целях дополнительного контроля при оценке параметров желательно иметь одну контрольную скважину, в которой регистрируется появление воды при нагнетании в неводоносные породы и величина напора при нагнетании в водоносный пласт.

Таким образом, при нагнетаниях в водоносные и неводоносные породы можно выделить шесть различных расчетных схем, которые различаются мощностью пласта, режимом нагнетания и наличием (или отсутствием) наблюдательной скважины.

При нагнетаниях в водоносные породы для этих случаев применимы расчетные формулы, приведенные выше для опытных откачек. В этих формулах необходимо лишь вместо понижения (s) принимать повышение напора при нагнетаниях, взятое с обратным знаком ($-s$). При нагнетаниях в неводоносные породы для указанных случаев применяются иные формулы, учитывающие насыщение пород водой в процессе нагнетания.

В настоящем разделе мы приводим расчетные формулы только для неводоносных пород.

При этом в пластах относительно небольшой мощности (например, до 5—7 м) целесообразно производить нагнетание при вскрытии пласта на всю его мощность. Поэтому в таких пластах

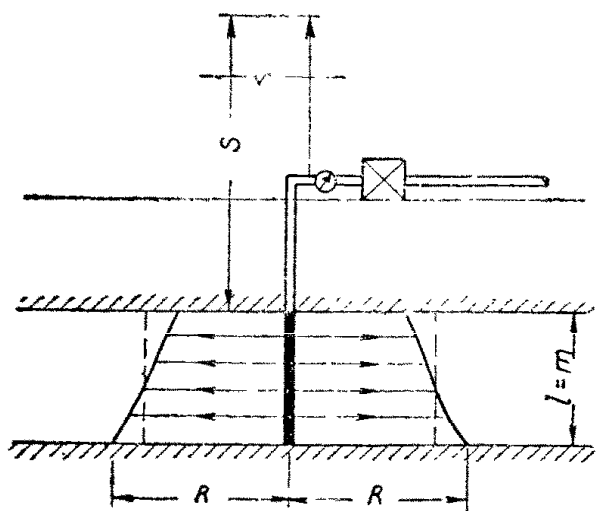


Рис. 33. Схема к расчету фильтрационного потока при нагнетании воды в совершенную скважину в неводоносных породах

рассматриваются нагнетания в совершенные скважины (рис. 33). В пластах же относительно большой мощности (более 7 м) обычно целесообразно производить нагнетание при частичном вскрытии пласта. Поэтому в таких пластах рассматривается нагнетание в несовершенные скважины при размещении опытного интервала у относительно непроницаемых кровли или подошвы пласта (рис. 34, случай а) или при размещении опытного интервала внутри пласта (рис. 34, случай б).

В первом случае при нагнетаниях вода движется только в стороны от скважины по горизонтальным линиям тока (рис. 33). Во втором — при нагнетаниях вода движется вверх, вниз и в стороны от скважины

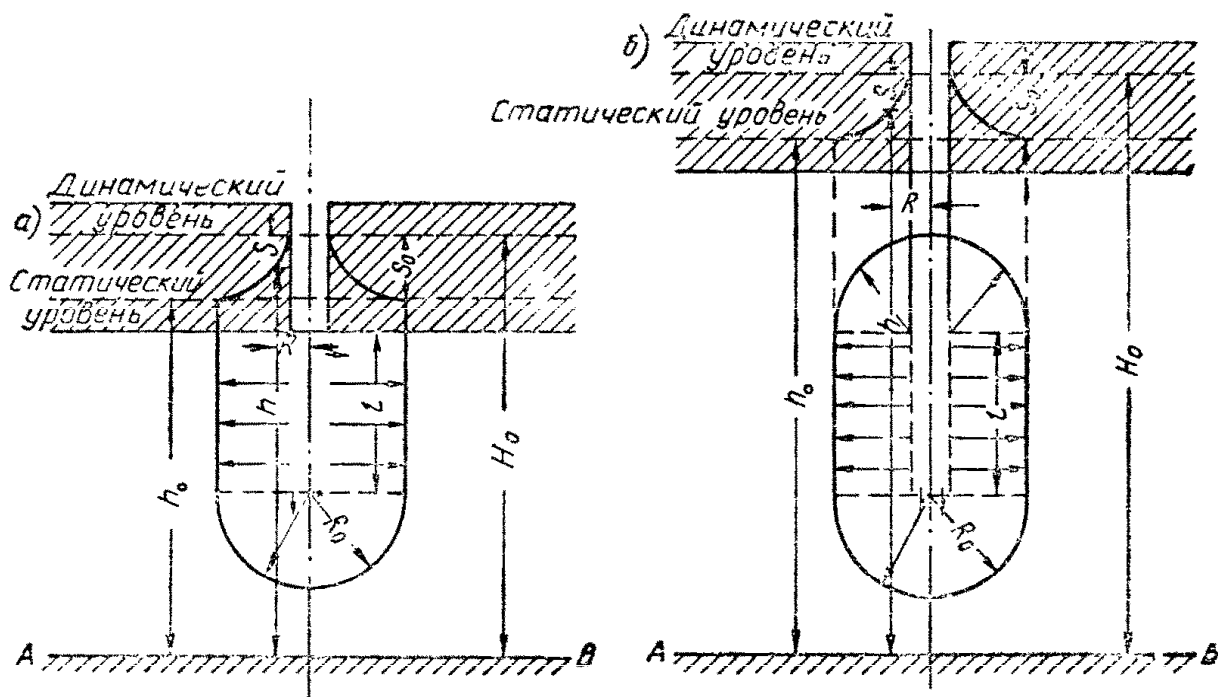


Рис. 34. Схема к расчету фильтрационного потока при наливах воды в несовершенную скважину в неводоносных породах

а — опытный интервал примыкает к кровле пласта; б — опытный интервал находится внутри пласта

(рис. 34). При этом за кратковременный период нагнетания вода обычно не глубоко проникает в пласт.

Указанные две расчетные схемы совершенной и несовершенной скважин являются основными. Для этих схем фильтрация воды рассматривается нами с учетом сил давления и сил сопротивления движению. Упругие силы в воде и в породах учитываются лишь в отдельных случаях (при большой длительности нагнетаний). Гравитационными силами мы во всех случаях пренебрегаем. Это допущение приемлемо при условии, что напор на забое скважины s_0 по крайней мере в 10—12 раз превышает мощность пласта в случае совершенных скважин m и высоту зоны насыщения пород в случае несовершенных скважин (h).

Во всех случаях при нагнетаниях рассматривается неустановившийся режим фильтрации.

Нагнетания чаще всего производятся в скальных и полускальных породах. Для этих пород часто характерно преобладание трещин, вытянутых вдоль плоскостей напластования (т. е. в горизонтальной или слабо наклонной плоскости). В таких случаях проницаемость пород по горизонтальному направлению обычно во много раз больше, чем по вертикальному.

Подобные случаи четко ориентированной горизонтальной трещиноватости следует рассматривать по схеме фильтрации в предельно-анизотропной среде, у которой водопроницаемость по вертикали равна нулю.

В случае совершенной скважины, если пренебречь гравитационными силами, решения для изотропной и указанной выше анизотропной сред оказываются одинаковыми.

В случае несовершенной скважины в такой анизотропной среде движение будет происходить только по горизонтальным путям, и поэтому несовершенную скважину следует рассматривать как совершенную при мощности пласта, равной длине опытного интервала. При таком характере трещиноватости определение параметров по данным нагнетаний следует производить, пользуясь формулами для совершенных скважин.

Опытные нагнетания являются основным методом оценки водопроницаемости неводоносных трещиноватых скальных и полускальных пород.

В водоносных скальных и полускальных породах следует предпочитать опытные откачки, не требующие устройства водопровода.

Обычно к нагнетаниям относят опыты, при которых давление на устье скважины является положительным. Некоторые авторы (например, Н. Н. Биндеман) под нагнетанием понимают такой опыт, при котором уровень воды в скважине находится выше верхнего конца ее рабочей части или фильтра (в отличие от наливов, когда этот уровень находится ниже верха открытой части скважины).

§ 11. КОНСТРУКЦИЯ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В состав опытной установки для нагнетаний, схематически изображенной на рис. 35, входят следующие основные элементы.

1. *Опытная скважина* (рис. 35):

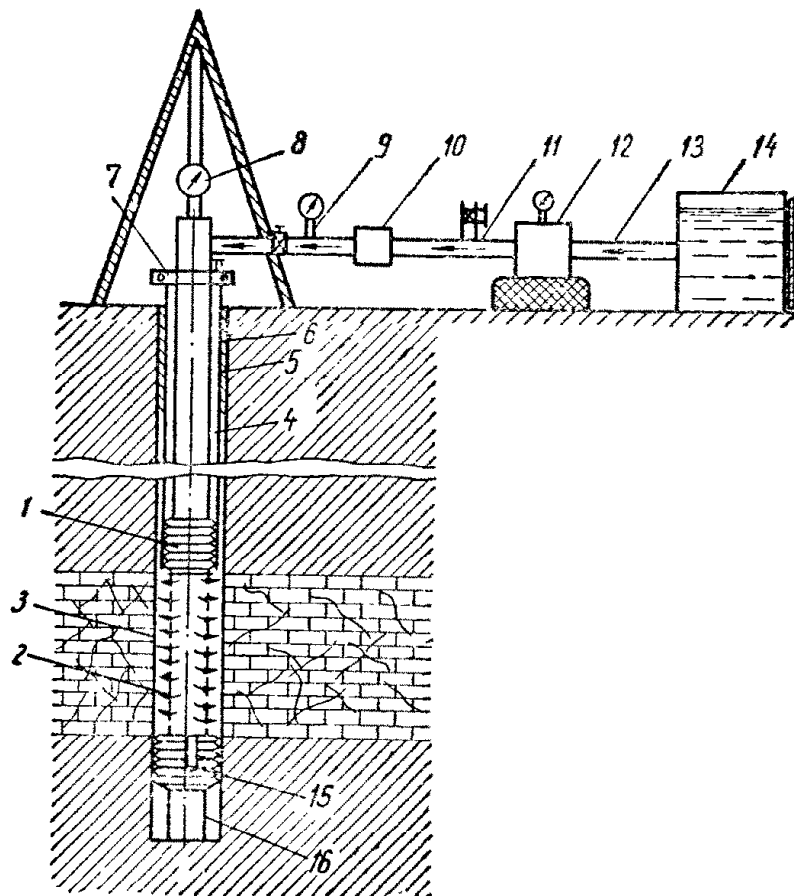


Рис. 35. Общая схема опытной установки для нагнетания воды в скважину

1 — гидравлический пакер или тампон; 2 — перфорированная часть рабочей колонны труб; 3 — испытываемая часть скважины (опытный интервал); 4 — нагнетательная колонна труб; 5 — обсадная труба; 6 — цементная пробка; 7 — глухой хомут; 8 — распределительная головка тампона с манометром; 9 — подводящая труба с вентилем и манометром; 10 — водомер; 11 — ипорный патрубок со сбросным вентилем; 12 — нагнетательный насос с манометром; 13 — всасывающий патрубок; 14 — мерная емкость; 15 — забойный манометр; 16 — упорные штанги

а) нижняя рабочая часть скважины (опытный интервал — 3) с установленным в ней следующим оборудованием:

тампон или гидравлический пакер, устраняющий поступление нагнетаемой воды в ствол скважины выше и ниже опытного интервала;

перфорированная часть рабочей колонны, через которую нагнетаемая вода поступает в опытный интервал скважины;

упорная часть рабочей колонны — упорные штанги;

забойный манометр, указывающий рабочее давление при нагнетании, геликсного типа или оборудованный электрическим датчиком, который устанавливается в рабочей колонне труб на уровне подошвы опробуемого интервала скважины (пласта);

б) верхняя нерабочая часть скважины с установленным в ней следующим оборудованием:

нагнетательная колонна;

кондуктор или обсадная труба с поднятым доверху цементом между стенкой скважины и наружной обсадной трубой;

глухой хомут, поддерживающий рабочую колонну и предотвращающий возможность переливания воды из затрубного пространства наружу;

распределительная головка тампона с манометром, показывающим давлением нагнетаемой воды на устье скважин.

2. *Оборудование для нагнетания воды и водопроводящая система* (рис. 35). Оно состоит из следующих элементов:

подводящий патрубок с вентилем и манометром;

водомер;

напорный патрубок со сбросным вентилем;

нагнетательный насос с манометром на выбросе, приводимый в движение двигателем внутреннего сгорания или электромотором;

всасывающий патрубок или гибкий резиновый шланг;

мерная емкость для воды с водомерным стеклом.

3. *Буровая вышка и вспомогательное оборудование для монтажа опытной установки* (рис. 35).

Тампонирующие устройства. При проходке скважин, используемых для опытных нагнетаний, следует по возможности стремиться к сохранению естественной структуры пород в стенках скважин. Для этого проходка скважин обычно ведется колонковым способом, причем диаметр опытных скважин должен быть не менее 76 мм. Максимальный диаметр скважин для опытных нагнетаний обычно не превышает 127 мм. Породы, залегающие ниже опытного интервала, тщательно цементируются, а выше опытного интервала перекрываются обсадными трубами. Намеченные для производства нагнетаний интервалы скважины обычно оставляют открытыми. Если же среди них имеются слои легко обваливающихся пород, то производится установка перфорированной трубы. Для того чтобы избежать растекания воды по стволу скважины за трубами, устанавливают тампоны. При наличии водоупорной кровли сжатие тампона производится в пределах ее, а при отсутствии этой кровли устанавливаются тампоны заведомо большей длины, чем радиус растекания воды при опытном нагнетании (в этом случае в процессе опыта поступление воды в ствол скважины выше тампона исключается)

Существуют следующие тампонирующие устройства:

типов «Днепрострой» и «Вашкур»;

конструкции С. А. Коля;

штанговый тампон конструкции Ф. А. Кулибабы и П. С. Сорокина (1951);
гидравлические пакеры.

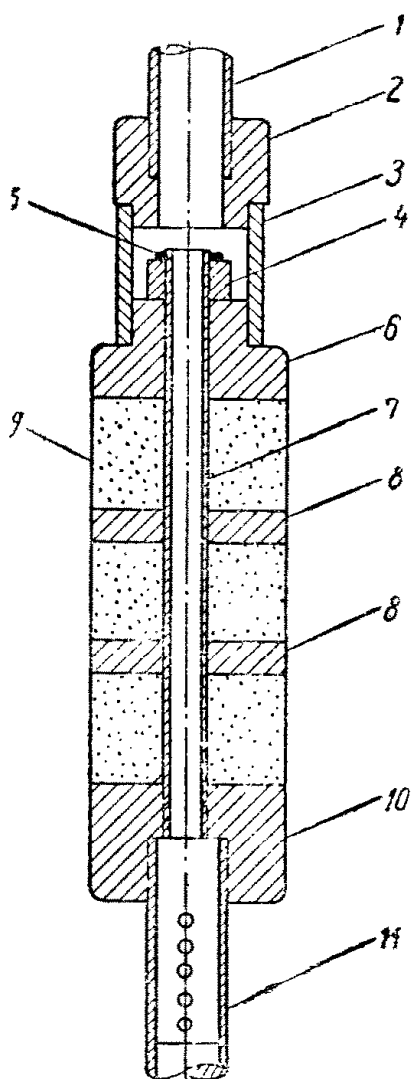


Рис. 36. Схема устройства штангового тампона

1 — нагнетательные трубы (штанги); 2 — тампон; 3 — цилиндр-ограничитель; 4 — кольцеводержатель; 5 — резиновый сальник-амортизатор; 6 — нажимной переходник; 7 — шток; 8 — направляющие кольца; 9 — резиновые кольца; 10 — опорный переходник; 11 — перфорированный патрубок

Первые три типа тампонов, подробно описанные в литературе, имеют ряд технических недостатков и пригодны главным образом для производства опытных нагнетаний при глубинах опробуемых интервалов до 50 м.

При проведении опытов на глубинах более 50 м целесообразно пользоваться штанговыми тампонами конструкции Ф. В. Кулибабы и П. С. Сорокина или гидравлическими пакерами, применяемыми на нефтяных скважинах и способными выдерживать большие давления. Общий вид штангового тампона показан на рис. 36. Принцип действия его заключается в том, что на нагнетательные штанги производится давление, которое, будучи передано ими на сам тампон, приводит к смятию и расширению резиновых колец, упирающихся в стенки скважины. Тампон состоит из 10 основных деталей. На переходник из нагнетательных труб (или штангу) и тампон навинчен цилиндр-ограничитель диаметром 85—87 мм и длиной 370 мм. В нижний конец цилиндра-ограничителя ввинчен нажимной переходник, имеющий внутреннюю цилиндрическую расточку для свободного прохода штока. Шток изготавливается из штанги диаметром 33—23 или 42—33 мм. Верхний конец имеет внешнюю резьбу под кольцеводержатель и резиновый сальник-амортизатор. Нижний конец нарезан под опорный переходник. В опорный переходник ввинчен перфорированный патрубок, называемый фильтром-хвостовиком, который имеет снизу резьбу под нижние опорные штанги. На шток надевают три комплекта резиновых колец с двумя направляющими металлическими кольцами. Резиновые кольца изготавливаются из техни-

ческой эластичной резины толщиной 10—20 мм или более, а каждый комплект имеет толщину 250 мм. Общая длина тампона 1500—1600 мм, а примерный вес 85-мм тампона около 25—30 кг. Для герметизации соединения смазыва-

ют жидким суриком или смолой и подматывают пенковыми подмотками. Частичное обжатие тампона происходит уже в момент его спуска в скважину за счет веса верхней нагнетательной колонны штанг. Полное обжатие тампона при небольшой глубине установки происходит в принудительном порядке с по-

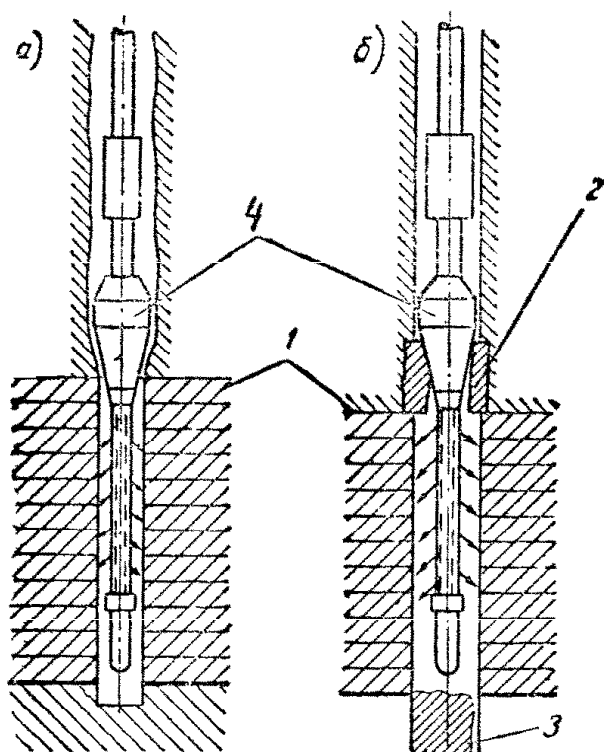


Рис. 37. Схема применения конического пакера в незакрепленной скважине при нагнетании в пласт

а — нагнетание в пласт без специальной изоляции от соседних пластов; *б* — нагнетание в пласт, изолированный от соседних пластов; 1 — испытуемый пласт; 2 — цементный мост (разрушенный); 3 — цементный мост (неразрушенный); 4 — пакер

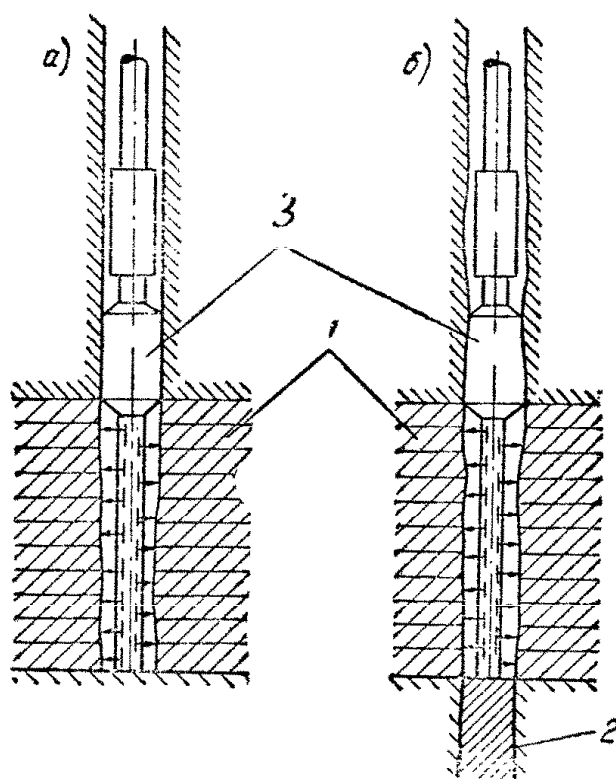


Рис. 38. Схема применения цилиндрического пакера в незакрепленной скважине при нагнетании в пласт

а — нагнетание в пласт без специальной изоляции от соседних пластов; *б* — нагнетание в пласт, изолированный от нижележащего пласта; 1 — испытуемый пласт; 2 — цементный мост; 3 — пакер

мощью дополнительной нагрузки на нагнетательные штанги верхней колонны от рычага кремольеры станка. Практически установлено, что для срабатывания тампона описанной конструкции нужна нагрузка в 1200 кг. При создании больших давлений в интервале опробования (порядка 10—15 ат и более) целесообразно применять гидравлические пакеры. Принцип действия различных типов пакеров заключается в том, что герметичность достигается за счет дополнительной нагрузки на пакер от веса рабочей колонны или за счет давления нагнетаемой жидкости, распирающей стенки пакера. Примеры применения различных типов пакеров (конических и цилиндрических) в различных видах скважин показаны на рис. 37—39).

Основными деталями пакера являются:

запорное устройство в его верхней части (обычно — стеклян-

ные пластины, разбиваемые специальным грузом при работе пакера);

собственно пакеры (резиновые манжеты);

перфорированная труба, находящаяся ниже пакера, через которую нагнетаемая вода поступает в пласт.

Пакер спускается в скважину на бурильных трубах или на комбинированной колонне, составленной из бурильных и насосно-компрессорных труб,

причем общий вес колонны должен быть достаточным для герметизации скважин сжатием пакера.

Для определения давления в опытном интервале во время нагнетания необходимо определить потери напора на сопротивление в трубах по формулам трубной гидравлики или путем специальных опытов на месте для каждого вида нагнетательной установки в отдельности. Если при нагнетании используется тампон конструкции С. А. Коля, то эти потери могут определяться непосредственным измерением давления во внутренней трубе манометром. В этом

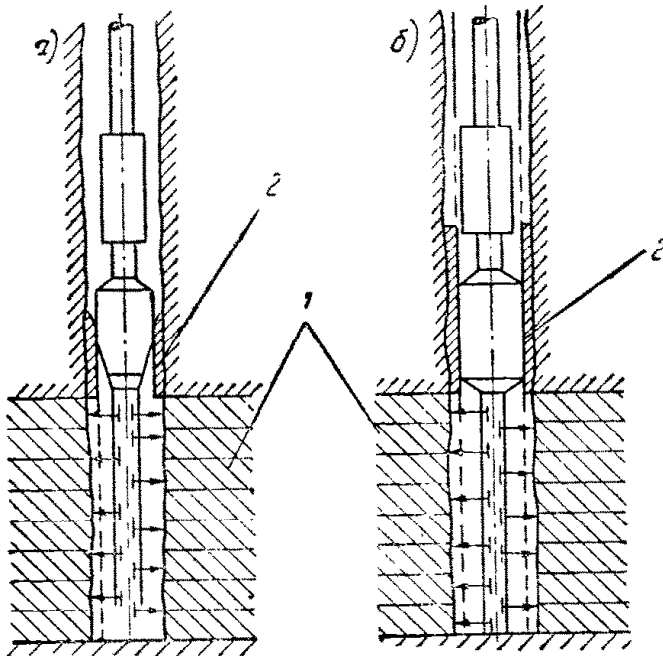


Рис. 39. Схема применения конического и цилиндрического пакеров при нагнетании воды в скважину с частично закрепленным стволом (а) и в скважину с негерметичной колонной (б)

1 — испытуемый пласт; 2 — заливка цементом

случае вода нагнетается по кольцевому пространству между двумя трубами, причем на нижнем конце внутренней трубы имеются отверстия, через которые поступает вода, а напор ее измеряется манометром на оголовке.

Во внешней трубе также имеются отверстия, расположенные ниже тампона, через которые вода поступает в пласт.

Для непосредственного замера рабочего давления в опытном интервале используются еще забойные манометры или электрические датчики, устанавливаемые в колонне нагнетательных труб на уровне подошвы опробуемого интервала.

Для замера рабочего давления в опытном интервале пласта могут быть рекомендованы следующие типы глубинных самопишущих манометров, характеристики которых даны в табл. 17.

Оборудование для нагнетания воды и водоподводящая система. Подача воды в скважину при проведении опытного нагнетания должна быть равномерной и непрерывной. Непрерывность подачи воды обеспечивается спаренными градуированными

Технические характеристики глубинных манометров

Показатели	Поршневые самопишущие глубинные манометры МГП-2 и МГП-3	Самопишущий глубинный манометр МГГ-1	Самопишущий глубинный манометр МГЛ-5
Пределы измерения в кг/см^2	0—80; 0—160; 0—300	0—50; 0—100; 0—120; 0—200; 0—250	0—80; 0—160; 0—300
Рабочая температура в град.	10—100	10—100	10—100
Тип часового механизма	МГМ-1 и МГМ-24	МГМ-1	РР-19
Продолжительность одного оборота барабана в час.	1 для МГМ-1 и 24 для МГМ-24	—	—
Продолжительность работы часового механизма в час.	15 для МГМ-1 и 36 для МГМ-24	10	240
Габаритные размеры в мм (диаметр, длина)	32/1650	35/1300	102/1100
Вес в кг	6,5	7	50

ми баками, соединенными тройником. Если имеется возможность контролировать расход воды водомером, баки можно не тарифировать.

Для подачи воды в баки наиболее применимы центробежные многокамерные насосы большой производительности, которые могут применяться и для нагнетания воды в скважину. Тип нагнетающего насоса выбирается в зависимости от величины водопоглощения и требуемого давления. Для высоких расходов воды (порядка 5—8 л/сек и более) следует применять центробежные насосы соответствующих производительности и давления, приводимые в движение электромотором или двигателем внутреннего сгорания. Поскольку заранее не всегда можно точно предвидеть возможный расход воды при нагнетании, следует предусмотреть наличие насосов как небольшой производительности (до 2 л/сек), так и более высокой (до 10 л/сек).

При проведении нагнетаний с небольшими расходами (порядка 1—3 л/сек) можно рекомендовать применение поршневых насосов, используемых для промывки скважин при колонковом бурении типов Е, НА-75/25, 100/30, 200/30, ЗИФ-200/40, 9-ГР и

Техническая характеристика насосов

Тип насоса	Характеристика																								
Е и НА-75/25	Оба насоса — вертикальные плунжерные, в общем почти однотипные, отличающиеся лишь размером цилиндров и формой клапанов																								
100/30 и 200/30	Горизонтальные двухцилиндровые поршневые насосы двойного действия. Производительность насосов переменная и регулируется изменением длины хода поршня от максимальной до нуля. Оба насоса способны подавать соответственно до 100 и 200 л/мин (1,7 и 3,4 л/сек) воды при давлении в 30 атм																								
ЗИФ-200/40	Горизонтальный двухцилиндровый поршневой насос двойного действия с механическим приводом. Производительность до 200 л/мин (3,4 л/сек) при давлении в 40 атм																								
9-ГР	<p>Горизонтальный поршневой двухцилиндровый насос двойного действия, состоящий из двух блоков: гидравлического и механического. Число цилиндров—2, диаметр сменных цилиндрических втулок—100, 115, 125 мм, ход поршня—250 мм, число двойных ходов поршня—44—90 в мин.</p> <p>Производительность насоса в л/сек. при коэффициенте наполнения 0,9 и 90 об/мин:</p> <table data-bbox="603 1205 1385 1305"> <tr> <td>при втулке диаметром 100 мм</td> <td>10,8</td> </tr> <tr> <td> " " " 115 "</td> <td>14,6</td> </tr> <tr> <td> " " " 125 "</td> <td>17,45</td> </tr> </table> <p>Наибольшее допустимое давление в кг/см²</p> <table data-bbox="603 1361 1385 1462"> <tr> <td>при втулке диаметром 100 мм</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td> " " " 115 "</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td> " " " 125 "</td> <td>24</td> </tr> </table> <p>Производительность насоса в л/сек при коэффициенте наполнения 0,9 и 44 об/мин:</p> <table data-bbox="603 1563 1385 1664"> <tr> <td>при втулке диаметром 100 мм</td> <td>4,77</td> </tr> <tr> <td> " " " 115 "</td> <td>6,44</td> </tr> <tr> <td> " " " 125 "</td> <td>7,68</td> </tr> </table> <p>Наибольшее допускаемое давление в кг/см²:</p> <table data-bbox="603 1731 1385 1832"> <tr> <td>при втулке диаметром 100 мм</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td> " " " 115 "</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td> " " " 125 "</td> <td>50</td> </tr> </table> <p>Приводная мощность в л. с. 60 Длина в мм 2630 Ширина в мм 1480 Вес насоса в кг 2430</p>	при втулке диаметром 100 мм	10,8	" " " 115 "	14,6	" " " 125 "	17,45	при втулке диаметром 100 мм	39	" " " 115 "	29	" " " 125 "	24	при втулке диаметром 100 мм	4,77	" " " 115 "	6,44	" " " 125 "	7,68	при втулке диаметром 100 мм	80	" " " 115 "	60	" " " 125 "	50
при втулке диаметром 100 мм	10,8																								
" " " 115 "	14,6																								
" " " 125 "	17,45																								
при втулке диаметром 100 мм	39																								
" " " 115 "	29																								
" " " 125 "	24																								
при втулке диаметром 100 мм	4,77																								
" " " 115 "	6,44																								
" " " 125 "	7,68																								
при втулке диаметром 100 мм	80																								
" " " 115 "	60																								
" " " 125 "	50																								

др. Ниже приводятся технические характеристики этих насосов (табл. 18).

Если в процессе нагнетаний расход воды превышает 3—5 л/сек, то целесообразно применять насос типа 9-ГР или соответствующий центробежный насос, описанный во второй главе.

При проведении опытных нагнетаний следует учитывать возможность кольматации стенок скважины и пор пласта, что приводит иногда к значительному искажению водопроницаемости пород у стенок скважины. В связи с этим следует стремиться к использованию чистой осветленной воды, не содержащей взвешей и гидроокиси железа [2].

Способы нагнетания и методика проведения опытов

В зависимости от последовательности опробования различных участков исследуемой толщи пород, вскрытых опытной скважиной, и соотношения порядка производства испытаний с бурением скважины различают следующие способы нагнетания:

1) участковые — по ходу бурения опытной скважины в направлении сверху вниз (метод нисходящих зон Люжона);

2) участковое и суммарное с постоянным положением одинарного тампона на верхней границе исследуемой толщи при постоянном наращивании ее по мере углубления скважины;

3) суммарное — в скважину, законченную бурением с переменным положением одинарного тампона и постоянным забоем;

4) позонное — в скважину, законченную бурением, в восходящем порядке (способ «снизу вверх») с изоляцией сверху одинарным тампоном и последовательной цементацией опробованных участков.

При производстве работ по перечисленным схемам во всех случаях, когда в скважину опущены обсадные трубы, сжатие тампона происходит при непосредственном примыкании его к фрезеру обсадной колонны.

Нагнетание по первому способу производится на интервалах длиной до 5 м. Сначала скважина пробуривается до глубины нижней границы верхнего участка, который изолируется сверху одинарным тампоном. После проведения нагнетания в этот участок нагнетается цементный раствор. После его затвердения через него пробуриваются следующие 5 м ствола скважины. На нижней границе первого интервала устанавливается тампон и производится нагнетание. Затем второй интервал цементируется, разбуривается и подготавливается следующий интервал для нагнетания и т. д.

При нагнетании по второму способу в процессе бурения на верхней границе исследуемой толщи пород закрепляется тампон достаточно большого диаметра, чтобы через него можно было продолжать бурение скважины. Углубив после установки там-

пона скважину на глубину первого намеченного к испытанию интервала, бурение останавливают (забой скважины доводят по возможности до полного пласта породы). Удалив буровой снаряд, через ранее установленный тампон производят нагнетание.

После опробования первого участка скважину углубляют на глубину второго интервала и снова производят нагнетание через тот же тампон. В этом случае поглощение происходит суммарно на обоих участках. Далее пробуривают следующий интервал и нагнетают суммарно в зону трех участков и т. д. При больших водопоглощениях суммарное нагнетание неприменимо.

При суммарных и участковых нагнетаниях в законченную бурением скважину с постоянным забоем и переменным положением тампона (третий способ) опробование обычно начинают снизу, обжимая тампон на верхней границе первого нижнего участка. Затем оно производится суммарно для двух нижних участков, затем трех нижних участков и т. д. Частная характеристика водопоглощения по зонам, как и в выше описанном случае, получается по разности из отдельных суммарных нагнетаний.

При нагнетании в отдельные участки законченной бурением скважины в восходящем порядке с последующей цементацией опробованных зон опробование начинается с нижнего участка, для чего он изолируется сверху одинарным тампоном. После нагнетания вынимают из скважины тампон с колонной труб, а опробованный участок цементируют или забрасывают пластичной глиной. Затем снова устанавливают тампон (но уже у кровли второго опробуемого интервала) и опробуют его с последующим тампонажем глиной или цементацией и т. д.

Этот способ находит применение главным образом в сильно трещиноватых породах, когда водопоглощение при суммарном опробовании превышает мощность насосной установки и возникает опасность утечки воды в нижележащие зоны.

При участковых нагнетаниях с изоляцией испытываемых участков сдвоенными тампонами имеется возможность охарактеризовать водопроницаемость всех опробованных зон исследуемой толщи. Этот способ удобен и при большом водопоглощении, так как дает возможность ограничивать размеры испытываемых интервалов и уменьшать расходы воды до желаемых пределов.

При отсутствии в кровле опробуемого интервала надежного водоупора необходимы длинные тампоны (бóльшие радиуса растекания воды при нагнетании).

В состав работ по опытному нагнетанию в подготовленные скважины входят следующие операции:

- 1) измерение уровня воды в скважинах перед нагнетанием (если нагнетание производится в водоносный пласт);
- 2) установка тампонов и проверка герметичности их обжатия;

- 3) проведение нагнетания;
- 4) замер расходов воды и давлений на манометрах в процессе нагнетания;
- 5) выпуск воздуха из нагнетательных труб;
- 6) повторные замеры уровня воды в скважине при перестановке тампонов;
- 7) записи в журнале нагнетаний;
- 8) ликвидация скважины после испытания.

При установке тампона в соответствии с намеченной глубиной длина внутренней колонны труб подбирается такой, чтобы она выступала над внешней колонной на 0,25—0,5 м. Трубы должны быть герметичными. Качество обжатия тампона проверяется кратковременным пробным нагнетанием в течение 10—15 мин. с небольшими перемещениями тампона. Важно установить утечку воды в обход колец тампона. При небольшой трещиноватости прорвавшаяся из тампона вода поднимается по затрубному пространству и может изливаться на поверхность. При большой трещиноватости вода может поглощаться участками скважин, лежащими выше тампона. В этом случае прорыв воды через тампон может быть установлен только путем измерения ее уровня в затрубном пространстве и сопоставления данных двух следующих друг за другом измерений уровня.

Для определения удельного водопоглощения или коэффициента фильтрации скважины нагнетание производится на двух-трех различных ступенях повышенного давления. По этим данным определяют форму кривой зависимости между напором и расходом воды.

Нагнетание при постоянном повышении давления ведется 0,5—1 час. При постоянном дебите продолжительность непрерывного нагнетания должна быть не менее 0,25—0,5 часа.

При нагнетании через специальный кран следует периодически выпускать воздух, скапливающийся в головке тампонажного устройства. Наблюдения за давлением по манометру и за расходом воды в процессе опыта ведутся через равные промежутки времени, а при наличии самопишущих приборов — постоянно в ходе всего опыта. Отсчеты по манометру ведутся с точностью до 0,05 атм.

§ 12. НАГНЕТАНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ ПЛАСТА (совершенные скважины)

Для определения коэффициента фильтрации k и трещиноватости пород n можно использовать известные уравнения инъекции жидкости в пористую среду. Общая теория инъекции жидкости в пористую среду, заполненную другой жидкостью при различной вязкости, плотности и упругости обеих жидкостей, изложена в работах Н. Н. Веригина [18] и Л. И. Рубинштейна [55].

Для наших целей мы будем пользоваться решением задачи о нагнетании жидкости в совершенную скважину в неводоносных породах.

При нагнетании воды в неводоносные породы из их трещин и пор вытесняется воздух. Ввиду малой вязкости воздуха по сравнению с вязкостью воды его сопротивлением можно пренебречь, принимая вязкость воздуха равной нулю. Тогда движение воды при нагнетании уже не будет зависеть от физических характеристик воздуха (его вязкости, плотности и упругости).

Кроме того, мы пренебрегаем гравитационными силами и упругостью воды. Для принятых выше условий имеем следующие основные уравнения:

$$q = 2\pi Rnl \frac{dR}{dt}; \quad (12.1)$$

$$q = \frac{2\pi k(s + 0,5l)l}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (12.2)$$

где q — дебит опытной скважины; s — напор воды над верхом опытного интервала;

$l = m$ — длина интервала;

r_0 — его радиус;

R — радиус проникновения нагнетаемой воды в неводоносную породу за время t ;

k, n — коэффициенты фильтрации и трещиноватости породы.

Нагнетания с постоянным расходом скважины ($q = \text{const}$)

При $q = \text{const}$ напор s со временем возрастает. В этом случае уравнение (12.1) интегрируется непосредственно, что дает

$$n = \frac{qt}{\pi l (R^2 - r_0^2)}. \quad (12.3)$$

При отсутствии наблюдательной скважины необходимо подставить в последние два уравнения $s = s_1, s_2$; $R = R_1, R_2$ и $t = t_1, t_2$ и из полученных четырех уравнений найти n, k, R_1 и R_2 . Тогда коэффициент трещиноватости будет

$$n = \frac{qt_1}{\pi l r_0^2} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^\alpha. \quad (12.4)$$

или

$$\lg n = \lg \frac{qt_1}{\pi l r_0^2} - \alpha \lg \frac{t_2}{t_1}, \quad (12.5)$$

где

$$\alpha = \frac{s_1 + 0,5l}{s_2 - s_1}. \quad (12.6)$$

Коэффициент фильтрации k определится из формулы

$$k = \frac{q \ln \frac{R_1}{r_0}}{2\pi (s_1 + 0,5l) l} = \frac{q \ln \frac{R_2}{r_0}}{2\pi (s_2 + 0,5l) l} = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{(s_2 - s_1) l}, \quad (12.7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_1 &\approx \sqrt{\frac{qt_1}{\pi nl}} = r_0 \sqrt{\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^\alpha}; \\ R_2 &\approx \sqrt{\frac{qt_2}{\pi nl}} = r_0 \sqrt{\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\alpha+1}}. \end{aligned} \right\} \quad (12.8)$$

Здесь α выражается по формуле (12.6). В этих формулах s_1 и s_2 — напоры воды в скважине, измеряемые от верха опытного интервала в моменты времени t_1 и t_2 после начала нагнетания ($t_2 > t_1$; $s_2 > s_1$); R_1, R_2 — радиусы распространения нагнетаемой воды вдоль трещин породы к моментам времени t_1 и t_2 после начала нагнетания.

При наличии одной наблюдательной (контрольной) скважины, фиксирующей время появления воды в ней t_r , коэффициент трещиноватости пород определяется по формуле (12.3):

$$n = \frac{qt_r}{\pi l (r^2 - r_0^2)}, \quad (12.9)$$

а коэффициент фильтрации пород находится из формулы (12.2), т. е.

$$k = \frac{q \ln \frac{r}{r_0}}{2\pi (s_r + 0,5l) l} = 0,366 \frac{q \lg \frac{r}{r_0}}{(s_r + 0,5l) l}. \quad (12.10)$$

В этих формулах:

r — расстояние наблюдательной скважины от центральной;
 t_r — время появления воды в наблюдательной скважине после начала нагнетания;

s_r — напор в опытной скважине над верхом ее водоприемной части в момент времени t_r после начала нагнетания (все остальные обозначения те же, что и выше).

Отметим, что наблюдательная скважина в этих опытах должна быть заглублена до отметки середины водоприемной части опытной скважины.

Нагнетания с постоянным забойным давлением ($s = \text{const}$)

При $s = \text{const}$ дебит q со временем уменьшается. Поэтому в уравнение (12.1) необходимо подставить значение q из уравнения (12.2) и затем произвести интегрирование. Тогда получим, что

$$n = \frac{4k(s + 0,5l)t}{r_0^2 M}; \quad (12.11)$$

$$M = \left(\frac{R}{r_0}\right)^2 \left(2 \ln \frac{R}{r_0} - 1\right) + 1, \quad (12.12)$$

где все обозначения прежние. При отсутствии наблюдательных скважин в уравнениях (12.2) и (12.11) принимается $t=t_1, t_2$;

$q=q_1, q_2$; $R=R_1, R_2$ и из полученных четырех уравнений находятся R_1, R_2, n и k . При расчетах рекомендуется предварительно определять радиус фильтрации воды по трещинам R_1 за период нагнетания t_1 .

Радиус R_1 находится сначала приблизительно по графику рис. 40 или по формуле

$$\frac{R_1}{r_0} \approx \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\frac{\beta}{2}}$$

или

$$\lg \frac{R_1}{r_0} = 0,5 \beta \lg \frac{t_2}{t_1}, \quad (12.13)$$

где

$$\beta = \frac{q_2}{q_1 - q_2}, \quad (12.14)$$

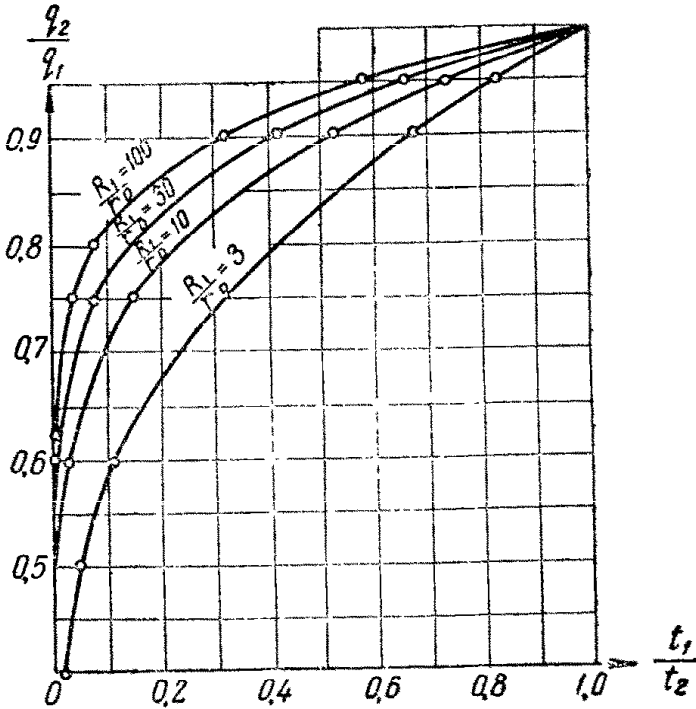


Рис. 40. График для определения радиуса растекания воды R_1 при нагнетании в совершенную скважину с постоянным напором на забое

а затем уточняется с помощью способа последовательных приближений по уравнению

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 \left(2 \ln \frac{R_1}{r_0} - 1\right) + 1}{\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^p \left(p \ln \frac{R_1}{r_0} - 1\right) + 1}, \quad (12.15)$$

где

$$p = 2 \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 2 \frac{q_1}{q_2}. \quad (12.16)$$

В этих уравнениях r_0 — радиус опытного интервала, а q_1 и q_2 — дебиты опытной скважины в моменты времени t_1 и t_2 после начала нагнетания ($t_2 > t_1$ и $q_2 < q_1$).

При найденном таким образом радиусе R_1 далее определяется:

коэффициент фильтрации пород

$$k = \frac{q_1 \ln \frac{R_1}{r_0}}{2\pi l(s + 0,5l)} = 0,366 \frac{q_1 \lg \frac{R_1}{r_0}}{l(s + 0,5l)}; \quad (12.17)$$

коэффициент их трещиноватости

$$n = \frac{4k(s + 0,5l)t_1}{r_0^2 \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^2 \left(2 \ln \frac{R_1}{r_0} - 1 \right) + 1 \right]} = 1,47 \frac{q_1 t_1 \lg \frac{R_1}{r_0}}{r_0^2 l \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^2 \left(4,61 \lg \frac{R_1}{r_0} - 1 \right) + 1 \right]}. \quad (12.18)$$

Здесь l — длина опытного интервала и s — напор в опытной скважине, измеряемый от верха опытного интервала (величина s во время нагнетания постоянна).

При наличии одной наблюдательной скважины, фиксирующей время появления в ней воды t_r , коэффициент фильтрации определяется по формуле (12.2):

$$k = \frac{q_t \ln \frac{r}{r_0}}{2\pi l(s + 0,5l)} = 0,366 \frac{q_t \lg \frac{r}{r_0}}{l(s + 0,5l)}, \quad (12.19)$$

а коэффициент трещиноватости — по формуле (12.11):

$$n = \frac{4k(s + 0,5l)t_r}{r_0^2 \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \left(2 \ln \frac{r}{r_0} - 1 \right) + 1 \right]} \approx \frac{1,47 q_t t_r \lg \frac{r}{r_0}}{r^2 l \left(4,61 \lg \frac{r}{r_0} - 1 \right)}. \quad (12.20)$$

Здесь q_t — дебит опытной скважины в момент времени t_r , когда в наблюдательной скважине впервые отмечено появление воды, а r — расстояние наблюдательной скважины от центральной.

В обоих рассмотренных случаях при наличии контрольной скважины можно найти также коэффициент пьезопроводности a . В этом случае следует воспользоваться теорией инъекции жидкости в пористую среду при упругом режиме фильтрации [18]. Из формулы (2.21) работы [18] имеем

$$a = \frac{r^2}{4t_r \ln \frac{q t_r}{\pi l r^2 n}}, \quad (12.21)$$

где пористость n должна быть определена из формул (12.4) или из (12.18). В частности, если подставить формулу (12.4) в формулу (12.21), то будет

$$a = \frac{r^2}{4t_r \ln \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^\alpha \frac{t_r}{t_1}} ;$$

$$\alpha = \frac{s_1 + 0,5l}{s_2 - s_1}, \quad (12.22)$$

где r — путь, пройденный водой, нагнетаемой в скважину за время t_r .

§ 13. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАГНЕТАНИЙ В СОВЕРШЕННЫЕ СКВАЖИНЫ

Пример 1. Определить коэффициент фильтрации k и коэффициент трещиноватости (n) неводоносных пород по данным опытных нагнетаний в совершенную скважину при постоянном дебите $q = \text{const}$. Расчет производится по формулам § 12.

Исходные данные: радиус рабочей части скважины $r_0 = 0,041$ м; длина опытного интервала $l = 4$ м; $q = 0,5$ л/сек = 43,2 м³/сутки; расстояние от опытной до наблюдательной скважины $r = 2$ м; высота напоров в скважине: при $t_1 = 15$ мин. = 0,0104 суток $s_1 = 42$ м, при $t_2 = 40$ мин. = 0,0278 суток $s_2 = 50$ м; время появления воды в наблюдательной скважине, считая с момента начала опыта, $t_r = 160$ мин. = 0,111 суток; высота давления в опытной скважине в момент, когда промачивание распространилось до наблюдательной скважины, $s_r = 61,5$ м.

Для центральной (опытной) скважины

По формулам (12.6) и (12.4) имеем

$$\alpha = \frac{s_1 + 0,5l}{s_2 - s_1} = \frac{42 + 0,5 \cdot 4}{50 - 42} = 5,5;$$

$$n = \frac{qt_1}{\pi l r_0^2} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^\alpha = \frac{43,2 \cdot 0,0104}{3,14 \cdot 4 \cdot 0,00168} \left(\frac{15}{40} \right)^{5,5} = 0,0967 \quad (n \approx 10\%).$$

По формуле (12.7) определяем коэффициент фильтрации:

$$k = 0,183 \frac{q \lg \frac{t_2}{t_1}}{(s_2 - s_1) l} = 0,183 \frac{43,2 \lg \frac{40}{15}}{(50 - 42) \cdot 4} = 0,105 \text{ м/сутки}.$$

Определим радиус растекания по формуле (12.8), т. е.

$$R_t = \sqrt{\frac{qt}{\pi l n}}.$$

Для $t_1 = 15$ мин. = 0,0104 суток и $t_2 = 40$ мин. = 0,0278 суток получаем

$$R_1 = \sqrt{\frac{43,2 \cdot 0,0104}{3,14 \cdot 4 \cdot 0,0967}} = 0,608 \text{ м};$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{43,2 \cdot 0,0278}{3,14 \cdot 4 \cdot 0,0967}} = 0,994 \text{ м}.$$

Для наблюдательной скважины

По формуле (12.9) имеем:

$$n = \frac{qt_r}{\pi lr^2} = \frac{43,2 \cdot 0,111}{3,14 \cdot 4 \cdot 2^2} = 0,0967 \quad (n \approx 10\%),$$

По формуле (12.10) будет

$$k = 0,366 \frac{q \lg \frac{r}{r_0}}{(s_r + 0,5 l) l} = 0,366 \frac{43,2 \lg \frac{2}{0,041}}{(61,5 + 0,5 \cdot 4) 4} = 0,105 \text{ м/сутки.}$$

Пример 2. Определить коэффициенты фильтрации и трещиноватости неводоносных пород по данным опытных нагнетаний в совершенную скважину при постоянном напоре $s = \text{const}$. Расчет производится по формулам § 12.

Исходные данные: радиус скважины $r_0 = 0,041$ м; длина опытного интервала $l = 4$ м; дебит при $t_1 = 15$ мин. $= 0,0104$ суток $q_1 = 1$ л/сек $= 86,4$ м³/сутки; $t_2 = 40$ мин. $= 0,0278$ суток $q_2 = 0,9$ л/сек $= 77,6$ м³/сутки; высота столба воды над кровлей пласта в течение всего опыта поддерживается постоянной и равна $s = 60$ м; расстояние от опытной до наблюдательной скважины $r = 4$ м; время появления воды в наблюдательной скважине с момента начала опыта $t_r = 68$ мин. $= 0,0472$ суток, а расход воды по центральной скважине в это время $q_t = 0,85$ л/сек $= 73,6$ м³/сутки.

Для центральной (опытной) скважины

Определяем величину $\frac{R_1}{r_0}$ по графику на рис. 40. При $\frac{q_2}{q_1} = 0,9$ и $\frac{t_1}{t_2} = 0,375$ имеем $\frac{R_1}{r_0} = 65$; затем уточняем $\frac{R_1}{r_0}$ с помощью способа последовательных приближений по уравнениям (12.15) и (12.16):

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 (2 \ln \frac{R_1}{r_0} - 1) + 1}{\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^p (p \ln \frac{R_1}{r_0} - 1) + 1};$$

$$p = 2 \frac{q_1}{q_2} = 2 \frac{1}{0,9} = 2,22.$$

Тогда

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{65^2 (2 \ln 65 - 1) + 1}{65^{2,22} (2,22 \ln 65 - 1) + 1} = 0,355 < 0,375.$$

Примем $\frac{R_1}{r_0} = 55$.

Тогда по вышеприведенным формулам получим

$$\frac{55^2 (2 \ln 55 - 1) + 1}{55^{2,22} (2,22 \ln 55 - 1) + 1} = 0,368 < 0,375.$$

Примем $\frac{R_1}{r_0} = 50$.

Тогда

$$\frac{50^2 (2 \ln 50 - 1) + 1}{50^{2,22} (2,22 \ln 50 - 1) + 1} = 0,376 \approx 0,375.$$

Для дальнейших расчетов принимаем

$$\frac{R_1}{r_0} = 50. \text{ Тогда } R_1 = 50 r_0 = 50 \cdot 0,041 = 2,05 \text{ м};$$

$$\lg \frac{R_1}{r_0} = \lg 50 = 1,699.$$

По формулам (12.19) и (12.20) имеем

$$k = 0,366 \cdot \frac{q_1 \lg \frac{R_1}{r_0}}{l(s + 0,5 l)} = 0,366 \frac{86,4 \cdot 1,699}{4(60 + 0,5 \cdot 4)} = 0,216 \text{ м/сутки};$$

$$n = 1,47 \frac{q_1 t_1 \lg \frac{R_1}{r_0}}{R_1^2 l \left(4,61 \lg \frac{R_1}{r_0} - 1 \right)} =$$

$$= 1,47 \frac{86,4 \cdot 0,0104 \cdot 1,699}{4,2 \cdot 4 \cdot (4,61 \cdot 1,699 - 1)} = 0,0195 \text{ (} n \approx 2\% \text{)}.$$

Для наблюдательной скважины

По формулам (12.19), (12.20) имеем

$$k = 0,366 \frac{q_t \lg \frac{r}{r_0}}{l(s + 0,5 l)} = 0,366 \frac{73,6 \lg \frac{4}{0,041}}{4(60 + 0,5 \cdot 4)} = 0,216 \text{ м/сутки};$$

$$n = 1,47 \frac{q_t t_r \lg \frac{r}{r_0}}{r^2 l \left(4,61 \lg \frac{r}{r_0} - 1 \right)} = 1,47 \frac{73,6 \cdot 0,0472 \cdot 1,989}{4^2 \cdot 4 \cdot (4,61 \cdot 1,989 - 1)} = 0,0195.$$

§ 14. НАГНЕТАНИЯ ПРИ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ ПЛАСТА (несовершенные скважины)

При большой мощности водопроницаемых пород (примерно при $m > 5 \div 7$ м) описанный выше способ имеет ограниченную область применения, так как он приводит к осреднению фильтрационных характеристик на большую глубину, не позволяя выяснить их изменения в пределах слоя значительной мощности.

Поэтому при значительной мощности пород следует производить нагнетания в несовершенную скважину, размещенную у относительно водоупорной кровли (подошвы) пласта или внутри его на достаточном удалении от подошвы и кровли.

При этом ввиду больших давлений и ограниченности зоны растекания можно пренебречь силами тяжести и упругости и учитывать лишь силы давления и сопротивления движению.

Однако и при таких допущениях точное решение задачи является весьма сложным. Поэтому мы воспользуемся приближенным ее решением, основанным на предположении, что изотропные породы можно рассматривать как предельно анизотропные, имеющие весьма большую проницаемость вдоль поверхностей равного напора (давления). Форму этих поверхностей у скважины будем считать заданной, представляющей собой некоторую комбинацию цилиндра и полусфер.

Гидродинамическая схема фильтрации для данного случая изображена на рис. 41. Область насыщения грунта водой при нагнетаниях состоит из цилиндра и двух полусфер радиусом R . Фильтрация из скважины происходит по радиальным прямым aa . Прямые, выходящие из верхнего и нижнего концов опытного интервала, представляют собой радиусы полусфер с центрами на концах скважины. Прямые, отходящие от боковой поверхности скважины, представляют собой радиусы цилиндра, ось которого совпадает с осью скважины. Эти радиальные прямые являются линиями тока.

Поверхности полусфер A и боковая поверхность цилиндра B являются изобарами и одновременно поверхностями равного напора (поскольку влияние силы тяжести не учитывается). Крайняя внешняя изобара ограничивает собой область водонасыщения пород при нагнетании. В процессе нагнетания эта поверхность удаляется от скважины, и область водонасыщения возрастает. Если скважина примыкает к малопроницаемым породам кровли или подошвы пласта, то одна из полусфер будет отсутствовать.

При принятых допущениях дифференциальные уравнения описывающие фильтрацию при нагнетании воды в неводоносную породу, имеют вид

$$q = -k(2\pi r^2 \xi + 2\pi rl) \frac{dh}{dr}; \quad (14.1)$$

$$q = (2\pi r^2 \xi + 2\pi lr) n \frac{dr}{dt}, \quad (14.2)$$

где h — напор в сечении потока радиусом r в момент времени t ;
 l — длина опытного интервала;
 q — дебит скважины;

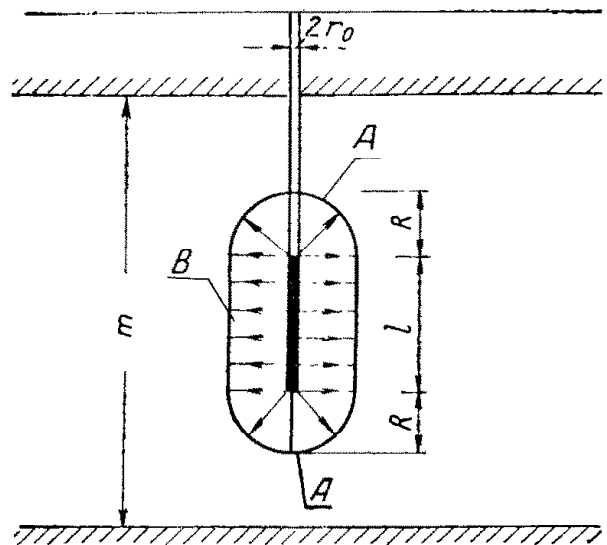


Рис. 41. Гидродинамическая схема фильтрации при нагнетаниях воды в несовершенную скважину в сухих породах

ξ — коэффициент, зависящий от числа полусфер (в случае удаления скважины от малопроницаемых пород $\xi=2$, а в случае примыкания ее к этим породам $\xi=1$).

Выражения в круглых скобках уравнений (14.1) и (14.2) представляют собой сумму поверхностей полусфер радиусом r и боковой поверхности цилиндра высотой l и радиусом r .

Для нагнетаний с постоянным дебитом $q=\text{const}$ уравнения (14.1) и (14.2) интегрируются независимо друг от друга.

В результате, получаются два уравнения, в которые входят время t , радиус проникновения (растекания) $R(t)$, напор в скважине $s(t)$, а также постоянные величины k, n, r_0, l, q . Принимая в этих уравнениях $t=t_1, t_2; s=s_1, s_2$ и $R=R_1, R_2$, получаем систему из четырех уравнений с неизвестными R_1, R_2, k, n (напоры s_1, s_2 в моменты времени t_1, t_2 и дебит q измеряются при нагнетании и являются известными). Из этих уравнений находятся параметры k и n .

Для нагнетаний с постоянным напором $s=\text{const}$ сначала интегрируется уравнение (14.1), затем значение $q(R)$ из него подставляется в равенство (14.2) и производится интегрирование последнего при $s=\text{const}$.

В результате, получаются два уравнения, в которые входят $t, R(t), q(t)$ и постоянные величины k, n, r_0, l, s .

При $t=t_1, t_2; q=q_1, q_2$ и $R=R_1, R_2$ будем иметь четыре уравнения с неизвестными k, n, R_1, R_2 (дебиты q_1, q_2 в моменты t_1, t_2 и напор $s=\text{const}$ являются известными). Из этих уравнений, как и раньше, находятся k и n .

Ниже приводятся расчетные формулы для обоих рассматриваемых случаев.

Нагнетания с постоянным расходом скважины ($q = \text{const}$)

Как указывалось выше, для определения k и n должны быть известны напоры в опытной скважине s_1 и s_2 в моменты времени t_1 и t_2 после начала нагнетания (напоры s_1 и s_2 измеряются от верха водоприемной части скважины). Кроме того, должны быть заданы длина и радиус водоприемной части скважины l и r_0 , а также дебит ее $q=\text{const}$.

По этим данным вначале находится радиус растекания воды R_1 , соответствующий моменту времени t_1 .

Этот радиус определяется способом последовательных приближений из уравнений

$$u = \frac{2}{3} \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + \gamma \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^2 - 1 \right]; \quad (14.3)$$

$$v = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R_1}}; \quad (14.4)$$

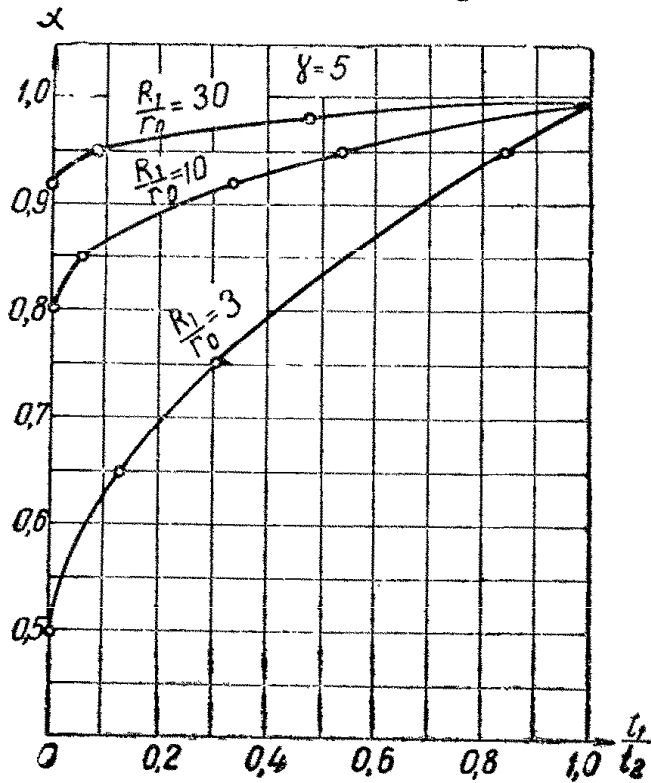
$$\frac{R_2}{r_0} = \frac{\frac{v}{\gamma e^\alpha}}{1 + \gamma - e^\alpha}; \quad (14.5)$$

$$u = \frac{t_1}{t_2} \left\{ \frac{2}{3} \left[\left(\frac{R_2}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + \gamma \left[\left(\frac{R_2}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \quad (14.6)$$

где

$$\alpha = \frac{s_1 + 0,5l}{s_2 + 0,5l}; \quad (14.7)$$

$$\gamma = \frac{l}{\xi r_0}. \quad (14.8)$$



Здесь R_1 и R_2 — радиусы проникновения воды в породу в моменты времени t_1 и t_2 .

Величина ξ зависит от расположения опытного интервала внутри слоя исследуемых пород. При расположении этого интервала у относительно водоупорной кровли или подошвы слоя величина $\xi = 1$, а при размещении его внутри слоя величина $\xi = 2$.

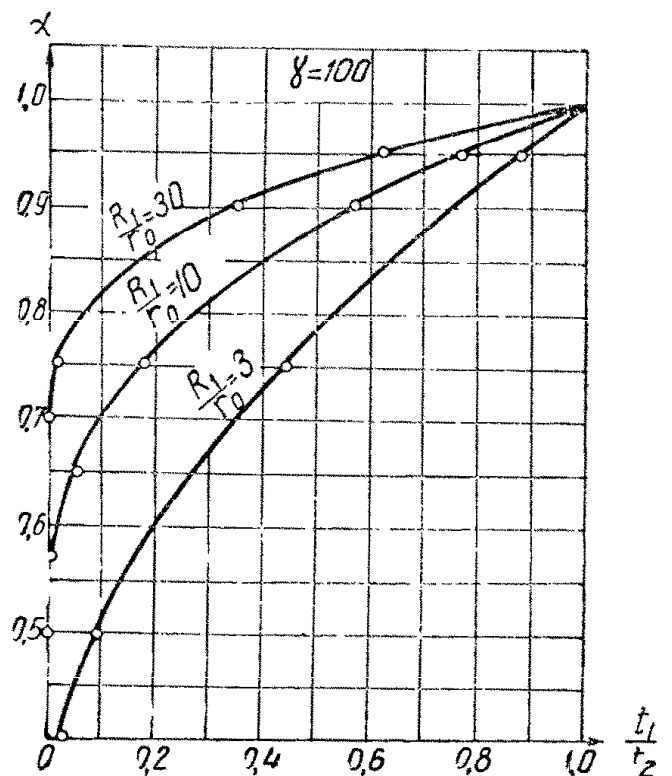
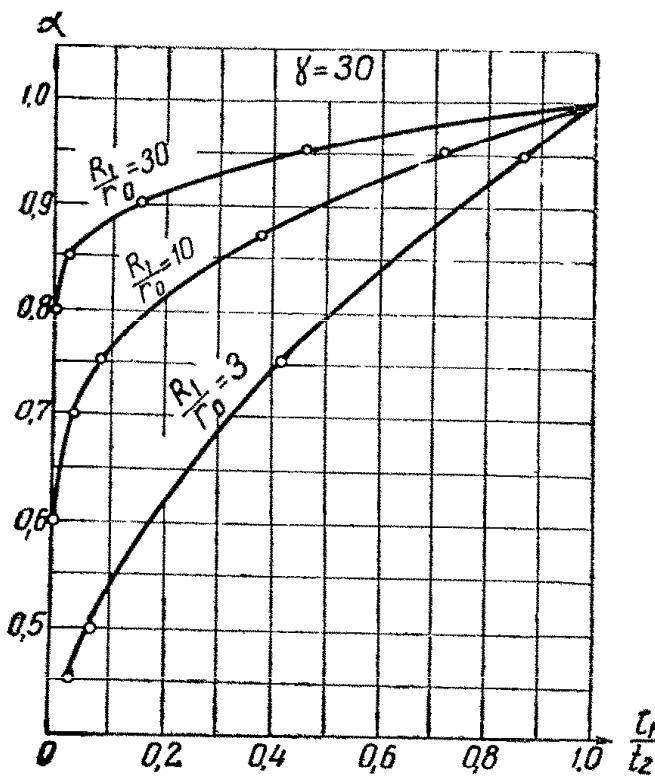


Рис. 42. График для определения радиуса растекания воды R_1 при нагнетаниях в несовершенную скважину с постоянным дебитом

Для определения R_1 по приведенным выше уравнениям необходимо принять два-три различных значения R_1 и подсчитать для них u по уравнению (14.3), v по уравнению (14.4), $\frac{R_2}{r_0}$ по уравнению (14.5) и u по уравнению (14.6). Затем следует построить кривые зависимости u по уравнениям (14.3) и (14.6) от R_1 . Точка пересечения этих кривых определит искомое значение R_1 .

Для упрощения вычислений R_1 по уравнениям (14.3) — (14.8) следует пользоваться графиками

$$\frac{R_1}{r_0} = f \left(\gamma, \frac{t_1}{t_2}, \alpha \right).$$

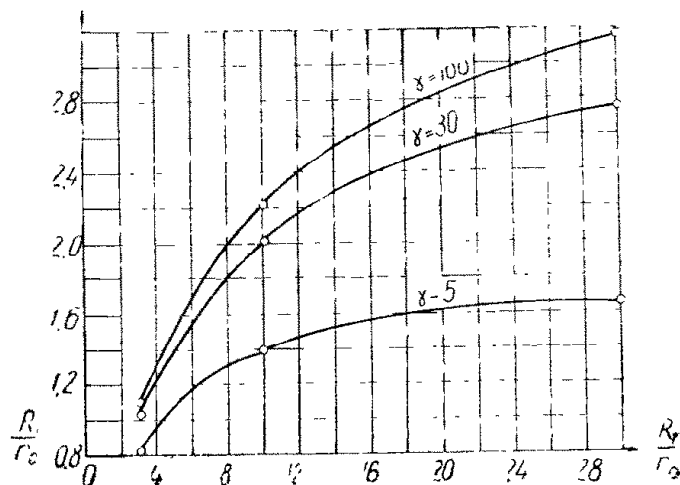
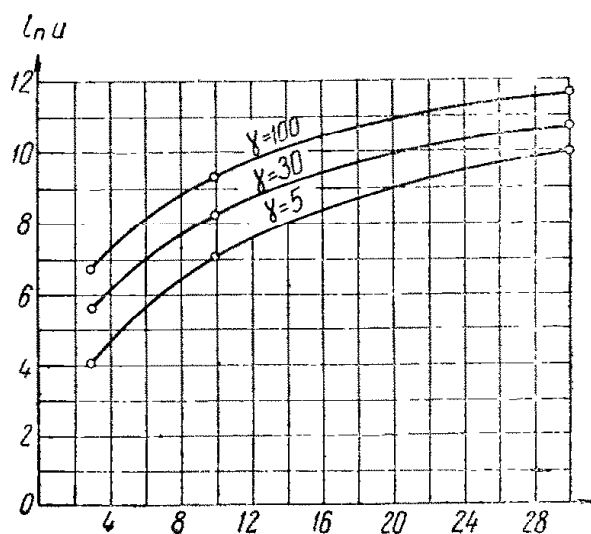


Рис. 43. График функции u для расчета нагнетания в несовершенную скважину при постоянном расходе

Рис. 44. Кривые зависимости $v = f \times \left(\frac{R_1}{r_0}, \gamma \right)$

приведенными на рис. 42 и позволяющими сразу ориентировочно найти величину R_1 , а затем уточнить ее по уравнениям (14.3) — (14.8).

При найденном значении R_1 следует снова подсчитать u , v и $\frac{R_2}{r_0}$ по уравнениям (14.3) — (14.5).

Далее, по найденным таким образом величинам v и u , определяются величины k и n :

$$k = \frac{q v(R_1)}{2\pi l(s_1 + 0,5l)} ; \quad (14.9)$$

$$n = \frac{q t_1}{\pi \xi r_0^3 u(R_1)} , \quad (14.10)$$

где u и v находятся по уравнениям (14.3) и (14.4) или из графиков рис. 43, 44.

При наличии наблюдательной скважины в ней отмечается время t_r , в течение которого вода фильтруется от опытной сква-

жины до наблюдательной, находящейся от нее на расстоянии r . Для этого же момента времени t_r фиксируется напор в опытной скважине s_r .

По этим данным с помощью формул (14.9) и (14.10) сразу находятся величины k и n :

$$k = \frac{qv(r)}{2\pi l (s_r + 0,5l)} ; \quad (14.11)$$

$$n = \frac{qt_r}{\pi r_0^3 \xi u(r)} , \quad (14.12)$$

где

$$v(r) = \ln \frac{1 + \frac{l}{\xi r_0}}{1 + \frac{l}{\xi r}} ; \quad (14.13)$$

$$u(r) = \frac{2}{3} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + \frac{l}{r_0 \xi} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (14.14)$$

Величины u и v можно также определять по графикам рис. 43, 44, принимая в них $R_1=r$.

Нагнетания с постоянным напором ($s = \text{const}$)

Пусть в скважину длиной l и радиусом r_0 производится нагнетание при постоянном напоре в скважине $s = \text{const}$ (напор s измеряется от горизонтальной плоскости, проходящей через верх водоприемной части скважины).

Тогда для определения k и a в процессе нагнетания необходимо зарегистрировать расходы скважины q_1 и q_2 , соответствующие моментам времени t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$; $q_2 < q_1$). По этим данным вначале находится радиус растекания воды R_1 к моменту времени t_1 . Этот радиус находится по графикам (рис. 45).

$$\frac{R_1}{r_0} = f\left(\frac{t_1}{t_2}, \frac{q_2}{q_1}, \gamma\right),$$

где

$$\gamma = \frac{l}{\xi r_0}. \quad (14.15)$$

При этом, как и ранее, в случае размещения опытного интервала у кровли или подошвы пласта величина $\xi=1$, а при размещении его внутри пласта $\xi=2$.

Затем величина R_1 должна быть уточнена по способу последовательных приближений из следующего уравнения:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{u(R_1)}{u(R_2)}. \quad (14.16)$$

Здесь

$$u(R) = \left[\left(\frac{R}{r_0} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{R}{r_0} + \frac{1}{2} \gamma \right) - \frac{1}{6} \gamma^3 \right] \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R}} - \frac{1}{6} \gamma \left[\frac{R}{r_0} \left(\frac{R}{r_0} + \gamma \right) - (1 + \gamma) - \gamma^2 \ln \frac{R}{r_0} \right], \quad (14.17)$$

где $R=R_1, R_2$, причем

$$R_2 = \frac{l}{\xi} \cdot \frac{e^{\frac{v(R_1)}{\alpha}}}{1 + \gamma - e^{\frac{v(R_1)}{\alpha}} + \gamma}. \quad (14.18)$$

Величины v, γ и α равны

$$v(R_1) = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R_1}}; \quad (14.19)$$

$$\gamma = \frac{l}{\xi r_0}; \quad \alpha = \frac{q_2}{q_1}. \quad (14.20)$$

Вычисления по этим уравнениям производятся следующим образом. Сначала определяются α и γ из уравнений (14.20) и по графикам $\frac{R_1}{r_0} = f\left(\frac{t_1}{t_2}, \alpha, \gamma\right)$ находится ориентировочное значение $\frac{R_1}{r_0}$. Далее принимают два значения $\frac{R_1}{r_0}$, одно из которых несколько больше, а другое несколько меньше величины $\frac{R_1}{r_0}$, найденной по графику (рис. 45). Для этих значений $\frac{R_1}{r_0}$ по формулам (14.19) и (14.18) подсчитывают v и R_2 , а по формуле (14.17) определяют $u(R_1)$ и $u(R_2)$. Подставляя полученные значения u в формулу (14.16), находят два значения $\frac{t_1}{t_2}$. Затем наносят их на график $\frac{t_1}{t_2} = f\left(\frac{R_1}{r_0}\right)$ и по нему находят $\frac{R_1}{r_0}$, соответствующее заданной величине $\frac{t_1}{t_2}$.

По найденной таким образом величине $\frac{R_1}{r_0}$ из формул (14.19) и (14.17) находят $v(R_1)$ и $u(R_1)$.

Далее определяются фильтрационные характеристики k и n , равные

$$k = \frac{q_1 v(R_1)}{2\pi(s + 0,5l)l}; \quad (14.21)$$

$$n = \frac{kl(s + 0,5l) t_1}{\xi r_0^3 u(R_1)} = \frac{q_1 t_1}{2\pi \xi r_0^3} \cdot \frac{v(R_1)}{u(R_1)}. \quad (14.22)$$

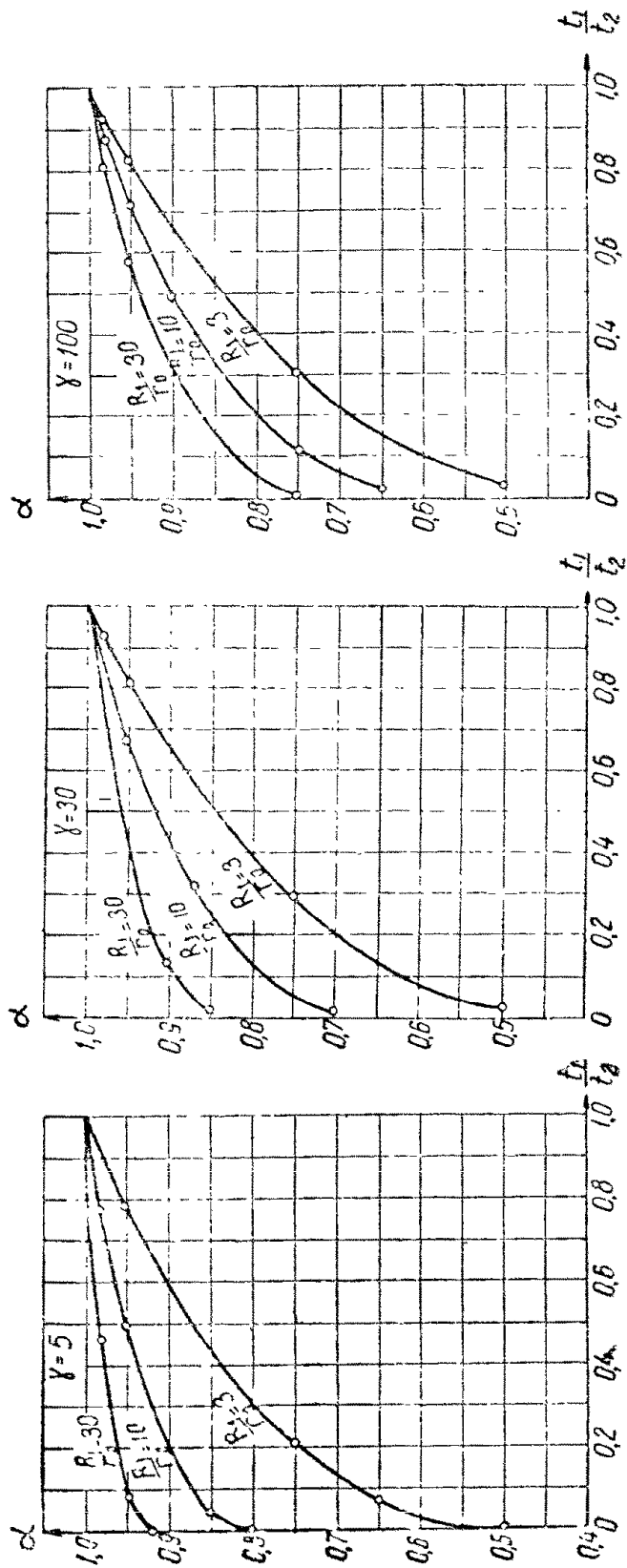


Рис. 45. График для определения радиуса растекания воды R_1 при нагнетаниях в несовершенную скважину с постоянным напором на забое

Здесь

$$v(R_1) = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R_1}}; \quad (14.23)$$

$$u(R_1) = \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{R_1}{r_0} + \frac{1}{2} \gamma \right) - \frac{1}{6} \gamma^3 \right] v(R_1) - \frac{1}{6} \gamma \left[\frac{R_1}{r_0} \left(\frac{R_1}{r_0} + \gamma \right) - (1 + \gamma) - \gamma^2 \ln \frac{R_1}{r_0} \right]; \quad (14.24)$$

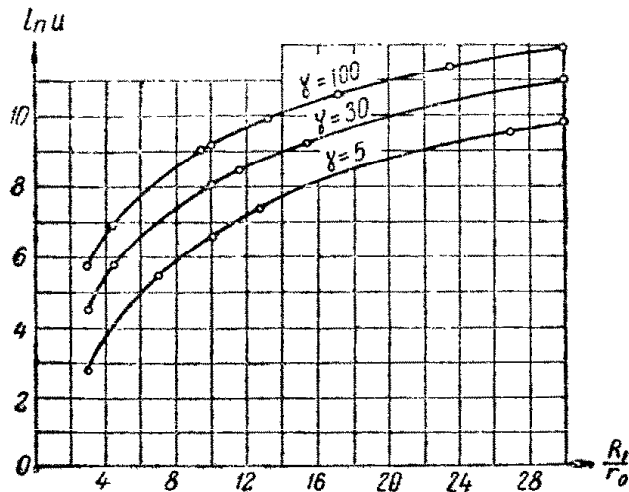


Рис. 46. График функции u для расчета нагнетания в несовершенную скважину при постоянном напоре на забое

$$\gamma = \frac{l}{\xi r_0}, \quad (14.25)$$

где все обозначения аналогичны предыдущим.

Для вычисления v и u можно пользоваться графиками рис. 44 и 46.

При наличии наблюдательной скважины для определения k и n не требуется вычислять радиусы растекания R_1 и R_2 .

Достаточно в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии r от центральной, отметить время

появления в ней воды t_r и соответствующий этому времени дебит опытной скважины q_r .

По этим данным величины k и n находятся из формул типа (14.21) — (14.25).

$$k = \frac{q_r v(r)}{2\pi(s+0,5l)l}; \quad (14.26)$$

$$n = \frac{q_r t_r}{2\pi \xi r_0^3} \cdot \frac{v(r)}{u(r)}, \quad (14.27)$$

где, как и раньше,

$$v(r) = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{r}}; \quad (14.28)$$

$$u(r) = \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{r}{r_0} + \frac{1}{2} \gamma \right) - \frac{1}{6} \gamma^3 \right] v(r) - \frac{1}{6} \gamma \left[\frac{r}{r_0} \left(\frac{r}{r_0} + \gamma \right) - (1 + \gamma) - \gamma^2 \ln \frac{r}{r_0} \right]. \quad (14.29)$$

Величины $v\left(\gamma, \frac{r}{r_0}\right)$ и $u\left(\gamma, \frac{r}{r_0}\right)$ можно находить по графикам рис. 44, 46, принимая в них $R_1=r$.

§ 15. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАГНЕТАНИЙ В НЕСОВЕРШЕННЫЕ СКВАЖИНЫ

Пример 1. Определить k и n по данным нагнетания с постоянным расходом $q=\text{const}$. Расчет производится по формулам § 14. Исходные данные примем те же, что и в § 13, но при меньшем дебите: $q=\text{const}=0,25$ л/сек = $=21,6$ м³/сутки; при $t_1=15$ мин. = $0,0104$ суток $s_1=42$ м; при $t_2=40$ мин. = $0,0278$ суток $s_2=50$ м; длина рабочей части фильтра, примыкающего к кровле пласта, $l=4$ м, радиус рабочей части скважины $r_0=0,041$ м.

По этим данным находим сначала радиус растекания воды R_1 , соответствующий моменту времени $t_1=15$ мин. = $0,0104$ суток, пользуясь для этого методом последовательных приближений. Величина $\xi=1$, так как фильтр примыкает к кровле водоносного горизонта:

$$\alpha = \frac{s_1 + 0,5 l}{s_2 + 0,5 l} = \frac{42 + 0,5 \cdot 4}{50 + 0,5 \cdot 4} = 0,846;$$

$$\gamma = \frac{l}{r_0 \xi} = \frac{4}{0,041 \cdot 1} = 97,6 > 10;$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{15}{40} = 0,375.$$

Пользуясь графиком рис. 42, при $\gamma=100$ имеем

$$\frac{R_1}{r_0} = 10$$

или

$$R_1 = 0,041 \cdot 10 = 0,41 \text{ м.}$$

Далее уточняем значение $\frac{R_1}{r_0}$ по формулам (14.3)–(14.6):

$$u = \frac{2}{3} \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + \gamma \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^2 - 1 \right] =$$

$$= \frac{2}{3} (10^3 - 1) + 97,6 (10^2 - 1) = 10\,328;$$

$$v = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R_1}} = \ln \frac{1 + 97,6}{1 + 97,6 \cdot 0,1} = 2,22,$$

$$\frac{R_2}{r_0} = \frac{\frac{v}{\gamma e^\alpha}}{1 + \gamma - e^{\frac{v}{\alpha}}} = \frac{97,6 e^{0,846 \cdot 2,22}}{1 + 97,6 - e^{\frac{2,22}{0,846}}} = 15,9;$$

$$R_2 = 0,041 \cdot 15,9 = 0,65 \text{ м;}$$

$$u = \frac{t_1}{t_2} \left\{ \frac{2}{3} \left[\left(\frac{R_2}{r_0} \right)^3 - 1 \right] + \gamma \left[\left(\frac{R_2}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right\} =$$

$$= 0,375 \left[\frac{2}{3} (15,9^3 - 1) + 97,6 (15,9^2 - 1) \right] = 10\,220 \approx 10\,328.$$

Следовательно, $\frac{R_1}{r_0}$ и $\frac{R_2}{r_0}$ найдены правильно.

Находим величины k и n по формулам (14.9) и (14.10):

$$k = \frac{qv(R_1)}{2\pi l(s_1 + 0,5l)} = \frac{21,6 \cdot 2,22}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 44} = 0,044 \text{ м/сутки};$$

$$n = \frac{qt_1}{\pi \xi r_0^3 u(R_1)} = \frac{21,6 \cdot 0,0104}{3,14 \cdot 1(0,041)^3 \cdot 10\,328} = 0,12 \quad (n \approx 12\%).$$

Пример 2. Определить k и n по данным нагнетания с постоянным напором $s = \text{const}$. Расчет производится по формулам § 14. Исходные данные: $r_0 = 0,041$ м; $l = 1,23$ м (фильтр примыкает к кровле пласта и потому $\xi = 1$); при $t_1 = 15$ мин. $= 0,0104$ суток $q_1 = 2,59$ м³/сутки; при $t_2 = 40$ мин. $= 0,0278$ суток $q_2 = 2,33$ м³/сутки; $s = 60$ м $= \text{const}$.

По формуле (14.20) имеем

$$\gamma = \frac{l}{\xi r_0} = \frac{1,23}{1 \cdot 0,041} = 30; \quad \frac{t_1}{t_2} = 0,375;$$

$$\alpha = \frac{q_2}{q_1} = \frac{2,33}{2,59} = 0,9.$$

По графику (рис. 45) $\frac{R_1}{r_0} = f\left(\frac{t_1}{t_2}, \alpha, \gamma\right)$ находим

$$\frac{R_1}{r_0} = 15,2; \quad \frac{r_0}{R_1} = 0,0657; \quad R_1 = 0,62 \text{ м}.$$

Проверяем значение $\frac{R_1}{r_0}$ по формулам (14.19) — (14.16).

Находим $v(R_1)$ и $\frac{R_2}{r_0}$:

$$v(R_1) = \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R_1}} = \ln \frac{1 + 30}{1 + 30 \cdot 0,0657} = 2,345;$$

$$\frac{v}{\alpha} = 2,61;$$

$$R_2 = \frac{l}{\xi} \cdot \frac{e^{\frac{v}{\alpha}}}{1 + \gamma - e^{\frac{v}{\alpha}}} = 1,23 \frac{e^{2,61}}{1 + 30 - e^{2,61}} = 0,961;$$

$$\frac{R_2}{r_0} = \frac{0,961}{0,041} = 23,4.$$

Далее по формуле (14.17), т. е.

$$u(R) = \left[\left(\frac{R_2}{r_0} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{R}{r_0} + \frac{\gamma}{2} \right) - \frac{\gamma^3}{6} \right] \ln \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \frac{r_0}{R}} -$$

$$- \frac{1}{6} \gamma \left[\frac{R}{r_0} \left(\frac{R}{r_0} + \gamma \right) - (1 + \gamma) - \gamma^2 \ln \frac{R}{r_0} \right].$$

Вычисляем $u(R_1)$ и $u(R_2)$:

$$\begin{aligned} u(R_1) &= \left[15,2^2 \left(\frac{15,2}{3} + \frac{30}{2} \right) - \frac{30^3}{6} \right] 2,345 - \\ &- \frac{30}{5} [15,2(15,2+30) - (1+30) - 30^2 \ln 15,2] = 11\,078; \\ u(R_2) &= \left[23,4^2 \left(\frac{23,4}{3} + \frac{30}{2} \right) - \frac{30^3}{6} \right] 2,345 - \\ &- \frac{30}{5} [23,4(23,4+30) - (1+30) - 30^2 \ln 23,4] = 28\,440. \end{aligned}$$

По уравнению (14.16) получаем

$$\frac{t_1}{t_2} = 0,375 = \frac{u(R_1)}{u(R_2)} = \frac{11\,078}{28\,440} = 0,389 \approx 0,375.$$

Окончательно для дальнейших расчетов принимаем

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{r_0} &= 15,2; \quad R_1 = 15,2r_0 = 15,2 \cdot 0,041 = 0,62 \text{ м}; \\ \frac{R_2}{r_0} &= 23,4; \quad R_2 = 0,96. \end{aligned}$$

Далее по формулам (14.21) и (14.22) находим

$$\begin{aligned} k &= \frac{q_1 v(R_1)}{2\pi(s+0,5l)l} = \frac{2,59 \cdot 2,345}{2 \cdot 3,14(60 + 0,5 \cdot 1,23)1,23} = 0,013 \text{ м/сутки}; \\ n &= \frac{q_1 t_1}{2\pi \xi r_0^3} \cdot \frac{v(R_1)}{u(R_1)} = \\ &= \frac{2,59 \cdot 0,0104}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,041^3} \cdot \frac{2,345}{11\,078} = 0,0132 (n \approx 1,3\%). \end{aligned}$$

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОПЫТНЫЕ НАЛИВЫ В СКВАЖИНЫ

§ 16. КЛАССИФИКАЦИЯ НАЛИВОВ В СКВАЖИНЫ И ИХ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

При наливах воды в скважины уровень воды в них находится ниже устья скважины. Поэтому при наливах в отличие от нагнетаний давление на устье скважины равно атмосферному. Опытные наливы могут производиться как в водоносные, так и в неводоносные породы.

При наливах в водоносные породы возможны те же случаи, что и при опытных откачках: наливы в пластах ограниченной и неограниченной мощности; в напорных и безнапорных пластах; при постоянном дебите и понижении; при наличии наблюдательных скважин и при отсутствии их.

Во всех этих случаях для определения фильтрационных характеристик пород используются те же расчетные формулы, что и при опытных откачках. Отличие состоит лишь в том, что в этих формулах вместо понижения уровня (s) принимается повышение уровня ($-s$).

Следует отметить, что наливы в водоносные породы могут быть заменены откачками, не требующими дополнительных затрат на подачу воды к опытным скважинам. Ввиду этого наливы в водоносные породы, как и нагнетания, следует применять главным образом в сравнительно малопроницаемых породах, не требующих больших расходов воды.

В этих случаях наливы из-за меньших расходов воды являются более предпочтительными, чем нагнетания.

В водоносных породах очень удобны также микроналивы по методике Е. В. Симонова и автора [17].

Ниже мы рассматриваем только наливы в неводоносные породы. Они могут быть двух типов:

наливы воды в скважины до уровня, находящегося выше верха опытного интервала (в этом случае у скважины имеет место напорно-безнапорная фильтрация);

наливы воды в скважины до уровня, находящегося в пределах опытного интервала (в этом случае у скважины будет иметь место безнапорная фильтрация).

В обоих случаях наливывы могут производиться в совершенные (при относительно небольшой мощности пласта) и в несовершенные скважины (при большой мощности пласта).

При наливвах первого типа характер фильтрационного потока принципиально аналогичен потоку при нагнетаниях, рассмотренному выше. Именно для достаточно большого напора над верхом опытного интервала по сравнению с мощностью пласта (совершенная скважина) и высотой зоны растекания (несовершенная скважина) здесь, как и при нагнетаниях, можно пренебречь силами тяжести. Тогда для определения параметров будут применимы приведенные ранее формулы, относящиеся к нагнетаниям в совершенную и несовершенную скважины.

При наливвах второго типа характер фильтрационного потока существенно иной.

Здесь напор в скважине меньше мощности пласта и высоты зоны растекания, гравитационные силы играют главную роль и фильтрация воды при наливве описывается иными уравнениями, чем в первом случае.

Ниже рассматриваются наливвы в совершенные скважины при положении динамического уровня воды в пределах рабочей части скважины.

При этом в соответствии с имеющимися решениями приводятся формулы для определения параметров в следующих двух случаях:

наливвы в изотропные породы при постоянном расходе;

наливвы в анизотропные породы с малой проницаемостью по вертикали при постоянном напоре.

В обоих этих случаях фильтрация будет неустановившейся.

В первом случае наливвы рассматриваются на основе гипотезы Дюпюи — Буссинеска, согласно которой горизонтальные составляющие скорости постоянны по высоте. Иначе говоря, здесь рассматривается первая схема предельно анизотропной среды по Г. К. Михайлову, в которой проницаемость по вертикальному направлению считается бесконечно большой. При этом используется решение Г. И. Баренблатта и В. М. Шестакова [8].

Во втором случае фильтрация воды рассматривается на основе предпосылки Шовгенова — Биндемана, согласно которой вертикальная составляющая скорости считается равной нулю. В этом случае рассматривается вторая схема предельно анизотропной среды по Г. К. Михайлову, в которой проницаемость по вертикальному направлению считается равной нулю.

Наливвы в несовершенные скважины ввиду сложности их расчета не рекомендуются.

§ 17. ОПЫТНЫЕ НАЛИВВЫ В СКВАЖИНЫ В ИЗОТРОПНЫХ ПОРОДАХ

Г. И. Баренблаттом и В. М. Шестаковым (1956 г.) разработана методика расчета коэффициента фильтрации (k) и актив-

ной пористости, (n) по данным наливов в неводоносные изотропные породы, подстилаемые горизонтальным водоупором.

Сущность метода сводится к наливу воды в совершенную скважину с постоянным расходом и наблюдению за изменением во времени положения свободной поверхности.

Наблюдения ведутся как в опытной, так и в наблюдательной скважинах, располагающихся на расстоянии r от центральной, причем величина r не должна превышать половины высоты столба воды в центральной скважине (см. рис. 47).

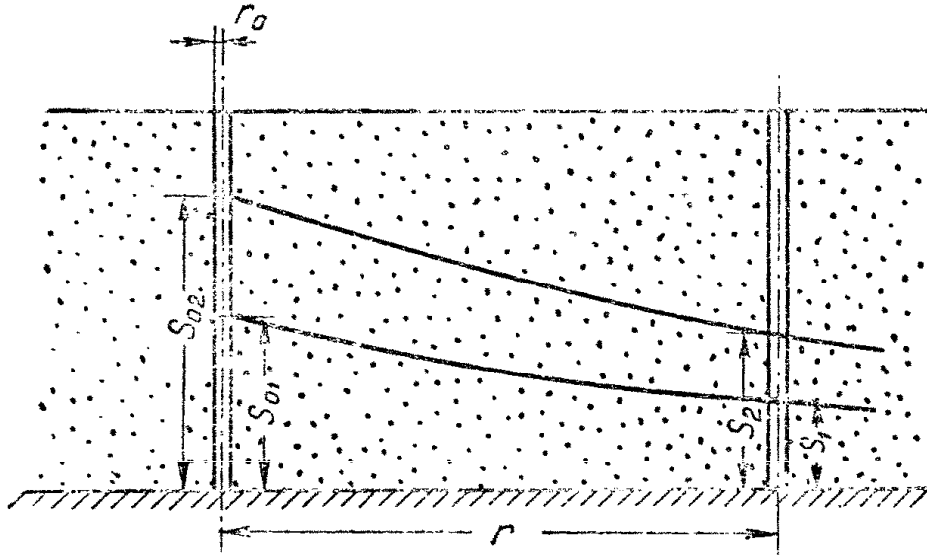


Рис. 47. Схема к расчету фильтрационного потока при наливах воды в совершенную скважину в неводоносных изотропных породах (с постоянным дебитом)

Для расчета фильтрационных характеристик грунта необходимо иметь не менее двух измерений уровней воды в опытной (центральной) и наблюдательной скважинах на моменты времени $t = t_1$ и $t = t_2$, а также соответствующие данные по замеру расхода воды q .

Тогда для центральной (опытной) скважины:

$$k = \frac{0,16q}{s_{02}^2 - s_{01}^2} \ln \frac{t_2}{t_1}; \quad (17.1)$$

$$n = 0,28 \frac{\alpha^2}{r_0^2} \sqrt{kq}, \quad (17.2)$$

где

$$\alpha = \sqrt{t_1 t_2} \left(\frac{\sqrt{34a_1^2 + 18,6a_3} - 5,8a_1}{a_2} \right)^2, \quad (17.3)$$

$$a_1 = \sqrt[4]{t_2} - \frac{s_{01}}{s_{02}} \sqrt[4]{t_1}; \quad (17.4)$$

$$a_2 = \sqrt{t_2} - \frac{s_{01}}{s_{02}} \sqrt{t_1}; \quad (17.5)$$

$$a_3 = \frac{s_{02} - s_{01}}{s_{01}} a_2, \quad (17.6)$$

где s_{01} и s_{02} — понижения в центральной скважине в моменты t_1 и t_2 .

Для наблюдательной скважины:

$$k = \frac{q}{\pi s^2} F^2(\xi), \quad (17.7)$$

где

$$\xi = \frac{\alpha}{\sqrt{t}}, \quad (17.8)$$

а при $\xi > 0,1$

$$F(\xi) \approx 2,23 - 1,39 \sqrt{\xi} - 0,12 \xi; \quad (17.9)$$

$$n = 0,28 \frac{\alpha^2}{r^2} \sqrt{kq}. \quad (17.10)$$

В последнем случае величина α также определяется по формуле (17.3), но отношение $\frac{s_{01}}{s_{02}}$ заменяется на

$\frac{s_1}{s_2}$, где s_1 и s_2 — высота

столба воды в наблюдательной скважине соответственно в моменты времени t_1 и t_2 .

В формуле (17.2) r_0 — радиус центральной скважины, а в формуле (17.10) r — расстояние от центральной до наблюдательной скважины;

s — уровень воды в наблюдательной скважине.

Величина $F(\xi)$ определяется из графика, приведенного на рис. 48, или из формулы (17.9) в зависимости от величины $\xi = \frac{\alpha}{\sqrt{t}}$.

При этом по формуле (17.7) расчет ведется отдельно для момента времени t_1 :

$$k = \frac{q}{\pi s_1^2} f^2(\xi_1); \quad \xi_1 = \frac{\alpha}{\sqrt{t_1}} \quad (17.11)$$

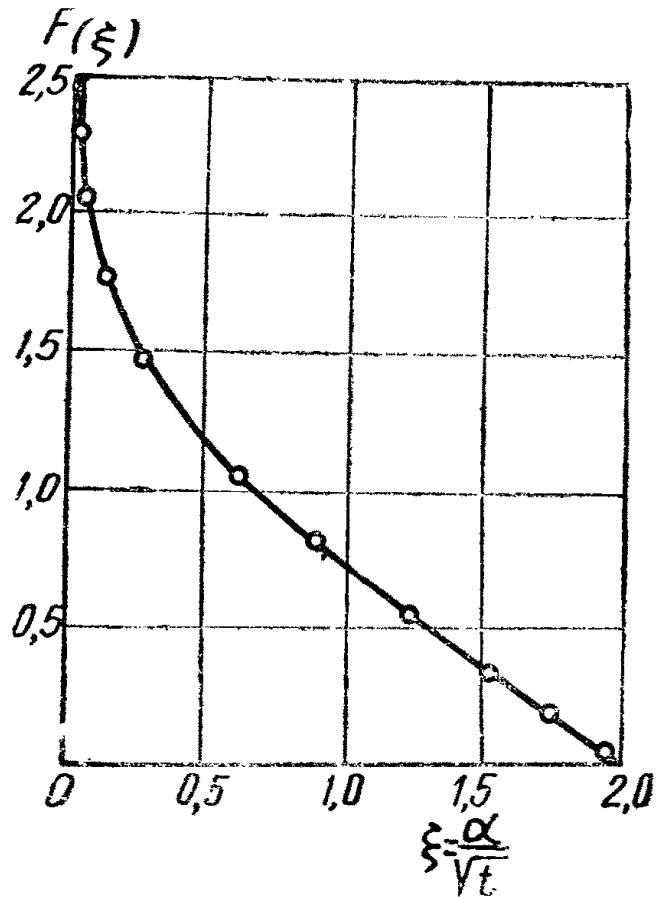


Рис. 48. График зависимости $F=f(\xi)$

и для момента времени t_2 :

$$k = \frac{q}{\pi s_2^2} F^2(\xi_2); \quad \xi_2 = \frac{\alpha}{V t_2}. \quad (17.12)$$

Для более точных расчетов на практике целесообразно иметь две наблюдательные скважины.

Следует отметить, что выражение (17.1) совпадает с формулой Н. Н. Веригина для опытных откачек (6.20).

§ 18. ОПЫТНЫЕ НАЛИВЫ В СКВАЖИНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ ПОРОДАХ

Если проницаемость исследуемых пород в горизонтальном направлении значительно больше проницаемости в вертикальном, то их следует рассматривать как предельно анизотропные, у которых проницаемость по вертикали равна нулю.

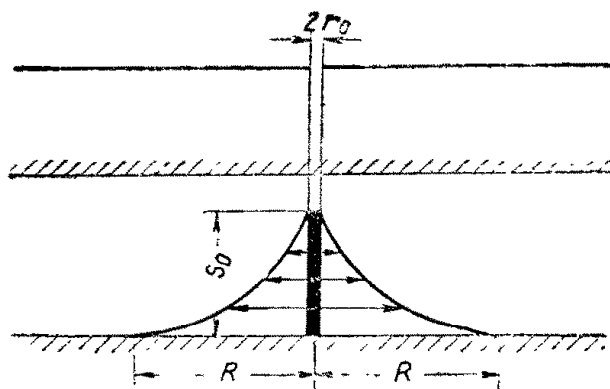


Рис. 49. Схема к расчету фильтрационного потока при наливах воды в совершенную скважину в неводоносных анизотропных породах (с постоянным напором)

Гидродинамическая схема фильтрации при наливах в такие породы показана на рис. 49.

В данных условиях имеет место фильтрация со свободной поверхностью. Напорная фильтрация, которая при нагнетаниях в эти породы занимает большую часть потока, в данном случае отсутствует вовсе.

В отличие от наливов в изотропные породы фильтрационные струйки (линии тока) здесь будут приурочены к направлению наибольшей проницаемости, т. е. будут горизонтальны.

Ниже рассматривается налив в скважину для случая постоянного напора в ней $s_0 = \text{const}$ (решение для случая постоянного расхода еще не найдено). При этом учитываются силы давления, тяжести и сопротивления движению. Упругими силами ввиду их малости мы пренебрегаем.

Пусть в скважину радиусом r_0 , заложенную в анизотропных породах, наливается вода, причем высота ее столба, равная s_0 , поддерживается постоянной в течение всего налива.

В моменты времени t_1 и t_2 после начала налива дебиты скважины соответственно равны q_1 и q_2 ($t_1 < t_2$; $q_1 > q_2$). Поместим начало координат в точке пересечения скважины с водоупором.

Если при наливе в скважину линии тока горизонтальны, то напор s в любой точке потока с координатами y и r будет

$$s = s_0 - (s_0 - y) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (18.1)$$

где R — радиус растекания фильтрационных вод на высоте y ; отсюда дебит скважины в любой момент времени t будет

$$q = -2\pi k \int_0^{s_0} R \left| \frac{\partial s}{\partial r} \right|_{r=R} dy = 2\pi k \int_0^{s_0} \frac{s_0 - y}{\ln \frac{R}{r_0}} dy. \quad (18.2)$$

Вместе с тем

$$q = 2\pi n \int_0^{s_0} R \frac{dR}{dt} dy. \quad (18.3)$$

В обоих этих уравнениях радиус R зависит от y и t . Приравнявая правые части этих равенств, найдем

$$n \frac{dR}{dt} = \frac{k(s_0 - y)}{R \ln \frac{R}{r_0}}. \quad (18.4)$$

Интегрируя это равенство при $y = \text{const}$, найдем $R(y, t)$. Подставляя полученное таким образом значение R в формулу (18.2), определим $q(t)$. Таким образом, мы получим два уравнения, в которые входят радиус растекания по подошве пласта (при $y=0$) $R(t)$, дебит $q(t)$ и постоянные k, n, s_0, r_0 .

Зная расходы q_1 и q_2 для двух моментов времени t_1 и t_2 , как и ранее, получим систему из четырех уравнений с неизвестными k, n, R_1, R_2 . Окончательные расчетные формулы для данного случая приводятся ниже.

Опытные наливыв при отсутствии наблюдательной скважины

В этом случае сначала находится радиус растекания воды по подошве пласта R_1 , соответствующий моменту времени t_1 .

Он определяется по графику $\frac{R_1}{r_0} = f\left(\frac{t_1}{t_2}, \frac{q_2}{q_1}\right)$ (рис. 50).

Найденная величина R_1 далее уточняется по следующим уравнениям:

$$u = \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 \left(2 \ln \frac{R_1}{r_0} - 1\right) + 1; \quad (18.5)$$

$$v = \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^4 \left(4 \ln \frac{R_1}{r_0} - 3\right) + 4 \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 - 1; \quad (18.6)$$

$$\omega = \left(1 + u \frac{t_2}{t_1}\right) - \sqrt{\left(u \frac{t_2}{t_1}\right)^2 + 2u \frac{t_2}{t_1} - \frac{q_2}{q_1} \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 v} \quad ; \quad (18.7)$$

$$u = \frac{t_1}{t_2} [\omega (\ln \omega - 1) + 1] \quad (18.8)$$

Задаваясь двумя значениями величины $\frac{R_1}{r_0}$; большей и меньшей величины $\frac{R_1}{r_0}$ по графику (рис. 50), необходимо для каждого из них определить u по уравнению (18.5) и v по уравнению (18.6).

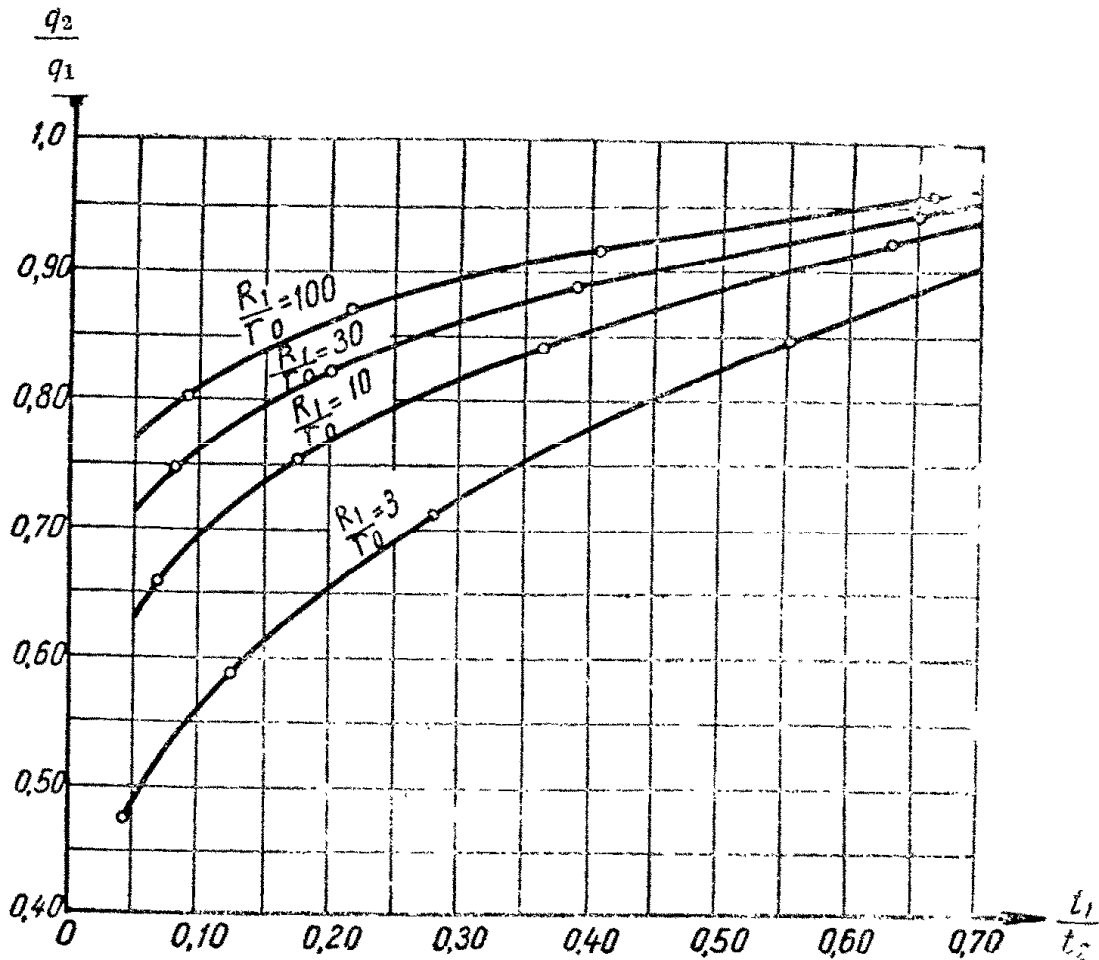


Рис. 50. График для определения радиуса растекания воды по подошве пласта R_1 при наливах в совершенную скважину с постоянным напором на забое

Найденные значения u и v подставляются в уравнение (18.7) и находятся величины ω , а затем по ним подсчитываются величины u из уравнения (18.8).

Далее строятся кривые $u = f\left(\frac{R_1}{r_0}\right)$ по уравнениям (18.5) и (18.8). Точка пересечения этих кривых определит искомое значение $\frac{R_1}{r_0}$. Зная R_1 , можно найти радиус растекания воды для момента времени t_2 , равный

$$R_2 = r_0 \sqrt{\omega} \quad (18.9)$$

Впрочем для определения k и n величина R_2 не требуется. Величина k определяется по формуле:

$$k = \frac{q_1}{\pi s_0^2} \cdot \frac{u^2}{v}, \quad (18.10)$$

где u и v выражаются аналогично предыдущему при значении $\frac{R_1}{r_0}$, найденном из уравнений (18.5) — (18.8).

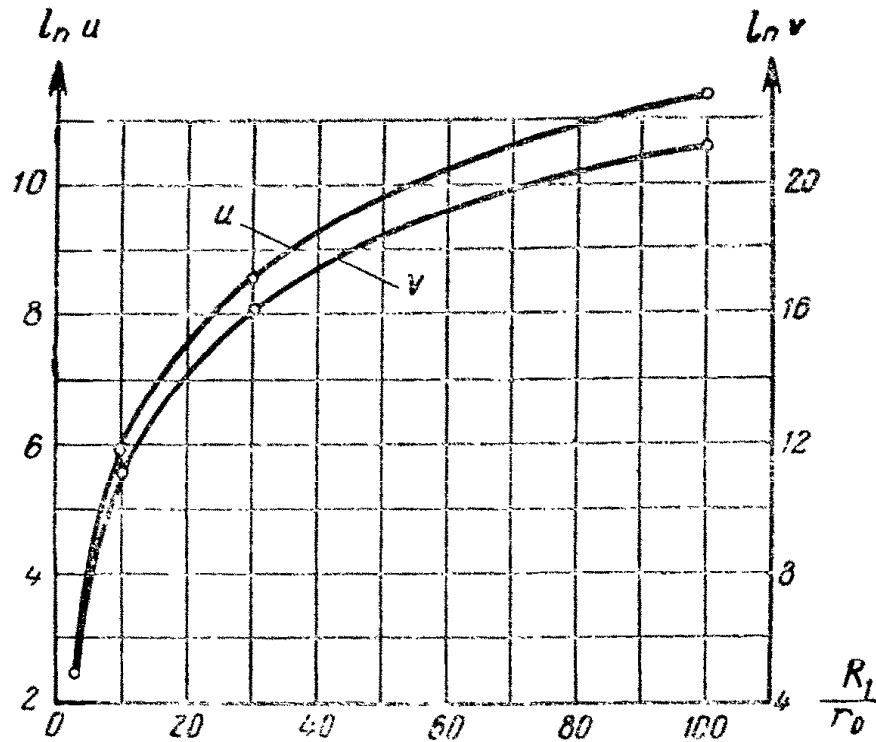


Рис. 51. График функций u и v для расчета налива в совершенную скважину при постоянном напоре на забое

Для определения u и v используются графики рис. 51, построенные по уравнениям (18.5) и (18.6).

Величина n находится по формуле

$$n = \frac{4ks_0 t_1}{r_0^2 u} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_1 t_1}{s_0 r_0^2} \cdot \frac{u}{v}, \quad (18.11)$$

где u и v находятся по формулам (18.5) и (18.6).

Опытные наливы при наличии наблюдательной скважины

Наблюдательная скважина при наливах должна иметь ту же глубину, что и опытная скважина, с тем, чтобы забои обеих скважин находились на одинаковой отметке.

Во время наливов в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии r от опытной, фиксируется время появления во-

ды после начала опыта t_r и отмечается дальнейшее повышение в ней уровня воды.

Величины k и n подсчитываются по формулам того же типа, что и для центральной скважины, но в них вместо R_1 , t_1 , q_1 вводятся величины r , t_r и q_r , где q_r — дебит опытной скважины в момент времени t_r , в который вода доходит до наблюдательной скважины.

Тогда расчетные формулы для k и n принимают вид

$$k = \frac{q_r}{\pi s_0^2} \cdot \frac{u_r^2}{v_r}, \quad (18.12)$$

$$n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_r t_r}{s_0 r_0^2} \cdot \frac{u_r}{v_r}, \quad (18.13)$$

$$u_r = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \left[\ln \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1 \right] + 1; \quad (18.14)$$

$$v_r = \left(\frac{r}{r_0}\right)^4 \left[\ln \left(\frac{r}{r_0}\right)^4 - 3 \right] + 4 \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1. \quad (18.15)$$

Для определения k и n можно также использовать данные о повышении уровня воды в наблюдательной скважине s в момент времени $t > t_r$, когда радиус растекания воды R больше расстояния между опытной и наблюдательной скважинами ($R > r$).

В этом случае расчет k и n ведется по формулам

$$k = \frac{q}{\pi (s_0 - s)^2} \cdot \frac{u_r^2}{v_r}; \quad (18.16)$$

$$n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{qt}{r_0^2 (s_0 - s)} \cdot \frac{u_r}{v_r}, \quad (18.17)$$

где s — высота столба воды (напор) в контрольной скважине в момент времени t после начала налива;

q — дебит опытной скважины в тот же момент времени;

s_0 — высота столба воды (напор) в центральной скважине ($s_0 = \text{const}$), а u_r и v_r выражаются по уравнениям (18.14) и (18.15). Из изложенного следует, что определение k и n при наличии наблюдательной скважины проще, чем при ее отсутствии, так как в этом случае отпадает необходимость вычисления радиуса растекания R_1 .

Кроме того, в этом случае для вычисления k и n достаточно знать дебит опытной скважины q и напор в наблюдательной скважине s для какого-либо одного момента времени t .

При отсутствии же контрольной скважины для вычисления k и n необходимы данные о дебитах опытной скважины q_1 и q_2 для двух моментов времени t_1 и t_2 .

При известных значениях k и n для любого момента времени $t = t_1$, решая совместно уравнения (18.10) и (18.11), можно най-

ти радиус растекания воды в плоскости подошвы скважины R_1 и дебит скважины q_1 .

Кроме того, для любого времени $t = t_1$ можно построить кривую растекания $s = f(r)$. Уравнение этой кривой получается из равенств (18.16) и (18.17), если из них исключить дебит q .

Отметим, что описанный здесь способ определения фильтрационных характеристик анизотропных пород может применяться при наливах как в совершенные, так и в несовершенные скважины. В обоих случаях напоры в опытной и наблюдательной скважинах s_0 и s отсчитываются от горизонтальной плоскости, проходящей через забой этих скважин.

Этим данный способ отличается от способа Г. И. Баренблатта и В. М. Шестакова для изотропных пород, который может применяться лишь при совершенных скважинах.

§ 19. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАЛИВОВ

Налив в совершенную скважину при постоянном напоре на забое

Расчет производится по формулам § 18.

Исходные данные: $s_0 = 12$ м = const — напор на забое; при $t_1 = 120$ мин. = 0,083 суток $q_1 = 0,02$ л/сек = 1,73 м³/сутки; при $t_2 = 360$ мин. = 0,249 суток $q_2 = 0,015$ л/сек = 1,30 м³/сутки; $r_0 = 0,1$ м — радиус опытной скважины.

Сначала определяем по графику на рис. 50 величину $\frac{R_1}{r_0}$ в зависимости от $\frac{q_2}{q_1}$ и $\frac{t_1}{t_2}$:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{120}{360} = 0,33; \quad \frac{q_2}{q_1} = \frac{0,015}{0,02} = 0,75; \quad \frac{R_1}{r_0} = 3,82.$$

Затем делаем проверку по способу последовательных приближений, пользуясь уравнениями (18.5) — (18.8):

$$u = \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 \left(2 \ln \frac{R_1}{r_0} - 1\right) + 1 = (3,82)^2 (2 \ln 3,82 - 1) + 1 = 25,5;$$

$$v = \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^4 \left(4 \ln \frac{R_1}{r_0} - 3\right) + 4 \left(\frac{R_1}{r_0}\right)^2 - 1 =$$

$$= (3,82)^4 (4 \ln 3,82 - 3) + 4 (3,82)^2 - 1 = 560;$$

$$\omega = \left(1 + u \frac{t_2}{t_1}\right) - \sqrt{\left(u \frac{t_2}{t_1}\right)^2 + 2u \frac{t_2}{t_1} - \frac{q_2}{q_1} \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 v} =$$

$$= (1 + 3 \cdot 25,5) - \sqrt{(3 \cdot 25,5)^2 + 2 \cdot 25,5 \cdot 3 - 0,75 \cdot 3^2 \cdot 560} = 77,5 - 47,2 = 30,3;$$

$$u = \frac{t_1}{t_2} [\omega (\ln \omega - 1) + 1] = 0,33 [30,3 (\ln 30,3 - 1) + 1] = 24,4 < 25,5.$$

Примем, что $\frac{R_1}{r_0} = 3,3$.

Тогда по аналогии с предыдущим имеем

$$u = 3,3^2 (2 \ln 3,3 - 1) + 1 = 16,11;$$

$$v = 3,3^4 (4 \ln 3,3 - 3) + 4 \cdot 3,3^2 - 1 = 254,1;$$

$$\omega = (1 + 3 \cdot 16,11) - \sqrt{(3 \cdot 16,11)^2 + 2 \cdot 16,11 \cdot 3 - 0,75 \cdot 3^2 \cdot 254,1} = 22,5.$$

Проверяем:

$$u = 0,33 [22,5 (\ln 22,5 - 1) + 1] = 16 \approx 16,1.$$

По формулам (18.16) и (18.17) находим k и n :

$$k = \frac{q_1}{\pi s_0^2} \cdot \frac{u^2}{v} = \frac{1,73 \cdot 16,11^2}{3,14 \cdot 12^2 \cdot 254,1} = 0,0039 \text{ м/сутки};$$

$$n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q \cdot t_1}{s_0 r_0^2} \cdot \frac{u}{v} = \frac{4 \cdot 1,73 \cdot 0,083}{3,14 \cdot 12 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{16,11}{254,1} = 0,097 \text{ (} n = 9,7\% \text{)}.$$

Налив в совершенную скважину при постоянном расходе

Расчеты производятся по формулам § 17.

Исходные данные: $r_0 = 0,1$ м; $q = 0,02$ л/сек = $1,73$ м³/сутки; при $t_1 = 120$ мин. = $0,083$ суток; $s_{01} = 3,5$ м; при $t_2 = 240$ мин. = $0,166$ суток $s_{02} = 4$ м.

По формулам (17.3) — (17.6) находим

$$a_1 = \sqrt[4]{t_2} - \frac{s_{01}}{s_{02}} \sqrt[4]{t_1} = \sqrt[4]{0,166} - \frac{3,5}{4} \sqrt[4]{0,083} = 0,169;$$

$$a_2 = \sqrt{t_2} - \frac{s_{01}}{s_{02}} \sqrt{t_1} = \sqrt{0,166} - \frac{3,5}{4} \sqrt{0,083} = 0,155;$$

$$a_3 = \frac{s_{02} - s_{01}}{s_{01}} a_2 = \frac{4 - 3,5}{3,5} \cdot 0,155 = 0,0221;$$

$$\alpha = \sqrt{t_1 t_2} \left(\frac{\sqrt{34 \cdot a_1^2 + 18,6 a_3 - 5,8 a_1}}{a_2} \right)^2 =$$

$$= \sqrt{0,083 \cdot 0,166} \left(\frac{\sqrt{34 \cdot 0,169^2 + 18,6 \cdot 0,0221 - 5,8 \cdot 0,169}}{0,155} \right)^2 = 0,185.$$

По формуле (17.1) определяем

$$k = \frac{0,16q}{[s_{02}^2 - s_{01}^2]} \ln \frac{t_2}{t_1} = \frac{0,16 \cdot 1,73}{4^2 - 3,5^2} \ln \frac{240}{120} = \frac{0,16 \cdot 1,73}{3,75} \ln 2 = 0,0511 \text{ м/сутки}.$$

Затем по формуле (17.2) определяем

$$n = 0,28 \frac{\alpha^2}{r_0^2} \sqrt{kq} = 0,28 \frac{0,185^2}{0,1^2} \sqrt{0,0511 \cdot 1,73} = 0,285 \text{ (} n = 28,5\% \text{)}.$$

ГЛАВА ПЯТАЯ
ОПЫТНЫЕ НАЛИВЫ В ШУРФЫ

§ 20. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Наливы воды в шурфы для оценки водопроницаемости грунтов впервые были предложены А. К. Болдыревым [12]. По способу А. К. Болдырева налив производится на дно шурфа при постоянной глубине слоя воды $h_0 = 5 \div 15$ см и продолжается до тех пор, пока расход воды, затрачиваемый на фильтрацию, стабилизируется и окажется более или менее постоянным. Расчет коэффициента фильтрации производится по уравнению установившейся фильтрации, причем капиллярные силы и растекание воды в стороны не учитываются. Коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$k = \frac{Q}{\omega} = q, \quad (20.1)$$

где Q — расход воды;

ω — площадь сечения шурфа. Градиент фильтрации J считается здесь равным единице.

Нестеров существенно усовершенствовал методику А. К. Болдырева, установив в центре шурфа кольцо (трубу), в котором во время налива поддерживается тот же уровень, что и в шурфе. Благодаря этому боковое растекание воды, фильтрующейся через дно кольца, резко уменьшается, что с достаточным основанием позволяет не учитывать его при определении водопроницаемости.

В таком видоизмененном виде метод Болдырева — Нестерова применяется до настоящего времени.

Н. К. Гиринский предложил учитывать боковое растекание потока при расчете водопроницаемости, не вводя центрального кольца. При этом боковое растекание воды из шурфа Н. К. Гиринский оценивает на основе точного решения задачи Н. Е. Жуковского о растекании фильтрационного потока, вытекающего изпод шпунта (в условиях плоского движения). Результаты исследования этой плоской задачи были распространены Н. К. Ги-

ринским на пространственную задачу фильтрации из шурфа, и таким образом приближенно был определен коэффициент растекания потока [26].

Автор в 1938 г. предложил полностью устранить боковое растекание потока. Для этого вместо налива одновременно в шурф и кольцо было рекомендовано производить налив в режущий цилиндр (трубу), насаживаемый на монолит грунта цилиндрической формы, который вырезается на дне шурфа [19].

Таким образом, вопрос об учете растекания воды при наливах был с достаточной степенью точности решен и притом различными способами.

Однако недостатком метода Болдырева—Нестерова оставалась значительная длительность опыта, достаточная для того, чтобы можно было пренебрегать капиллярными силами в грунтах. Кроме того, этот метод оказывался неприменимым в тех случаях, когда глубина от дна шурфа до капиллярной каймы грунтовых вод H невелика по сравнению с капиллярным вакуумом грунта h_k . В этом случае градиент фильтрации

$$J = \frac{H + h_0 + h_k}{H}, \quad (20.2)$$

может существенно отличаться от единицы. Именно он превышает единицу более чем на 10% уже при $\frac{H}{h_k} \leq 10$.

Следовательно, для определения k с точностью до 10% необходимо, чтобы мощность зоны аэрации H была, по крайней мере, в 10 раз больше капиллярного вакуума h_k . При величине $h_k = 0,2 \div 1$ м минимально необходимая мощность H оказывается равной 2—10 м, что значительно ограничивает область применения способа Болдырева—Нестерова.

Ввиду этого Н. Н. Биндеман уточнил метод Болдырева—Нестерова, предложив определять коэффициент фильтрации по формуле

$$k = \frac{ql}{h_0 + h_k + l}, \quad (20.3)$$

где l — глубина зоны промачивания грунта под дном шурфа, определяемая посредством раскопки после налива;

q — единичный дебит налива, соответствующий глубине l [10, 11].

Этот способ позволяет уменьшить длительность опытов и дает возможность проводить их при любой мощности зоны аэрации. Однако величина h оценивается здесь приближенно, что может привести к существенной ошибке. Для устранения указанных недостатков способа Болдырева—Нестерова было предложено определять фильтрационные характеристики грунтов по данным налива, пользуясь уравнениями неустановившейся фильтрации.

Так, в 1938 г. автором был предложен способ налива в цилиндр с монолитом грунта при свободном падении уровня воды, а в 1946 г. — способ налива в шурф при постоянном уровне воды, примененный тогда же на ирригационных изысканиях в Сальянской степи (Азербайджанская ССР). В обоих случаях фильтрационные характеристики грунта определялись по уравнениям неустановившегося движения. В 1956 г. несколько иные предложения были сделаны Н. Н. Биндеманом. Эти способы определения водопроницаемости грунтов позволяют проводить наливы при любой мощности зоны аэрации H , а также уменьшают длительность опытов и необходимый расход воды.

Вместе с тем эти способы позволяют определять не только водопроницаемость грунта k , но также дефицит насыщения грунта μ и капиллярный вакуум h_k , благодаря чему устраняется неопределенность при оценке h_k в уравнении (20.3).

Эти характеристики по уравнениям неустановившегося движения могут определяться многократно для одного и того же опыта, что открывает возможность взаимоконтроля результатов опытов. При значительной длительности опытов водопроницаемость грунта может оцениваться и по формуле А. К. Болдырева для установившегося режима, что также является дополнительной проверкой.

Ниже излагаются способы определения k, μ и h_k для неустановившегося режима фильтрации, из которых при большой длительности опытов, как частный случай, получается и способ Болдырева—Нестерова.

При этом для устранения бокового растекания применяется одновременный налив в шурф и центральное кольцо в его центре и налив в режущий цилиндр, содержащий монолит грунта, или используется прием Н. К. Гиринского, позволяющий учесть боковое растекание при расчетах.

При отсутствии бокового растекания дифференциальное уравнение фильтрации воды при наливе имеет вид (одномерная задача)

$$\mu \frac{dl}{dt} = k \frac{h + h_k + l}{l} = q, \quad (20.4)$$

где l — глубина промачивания грунта в момент времени t ;

h — глубина воды в шурфе в тот же момент времени;

$q = \frac{Q}{\omega}$ — дебит в тот же момент времени на единицу площади кольца.

Эти уравнения интегрируются для случаев постоянного напора $h = h_0 = \text{const}$ и постоянного расхода $q = \text{const}$.

В результате получаются два уравнения, связывающие q (или объем воды v), h, l, t, k, h_k и μ , из которых определяются фильтрационные характеристики грунта k, μ и h_k .

Решение рассматриваемой задачи о наливе для случая $h = \text{const}$ получено Цункером (1931 г.), для случая $q = \text{const}$ и $h_k = 0$ — Н. Н. Веригиным (1950 г.), а для случая $q = \text{const}$ и $h_k \neq 0$ — П. Я. Полубариновой-Кочиной (1953 г.) и в несколько иной постановке Чжао Пей-Ю (1956 г.).

Для определения фильтрационных характеристик грунта при $q = \text{const}$ необходима кривая зависимости напора в шурфе от времени $h = f(t)$ и скорости подъема уровня в шурфе от времени $u = f(t)$.

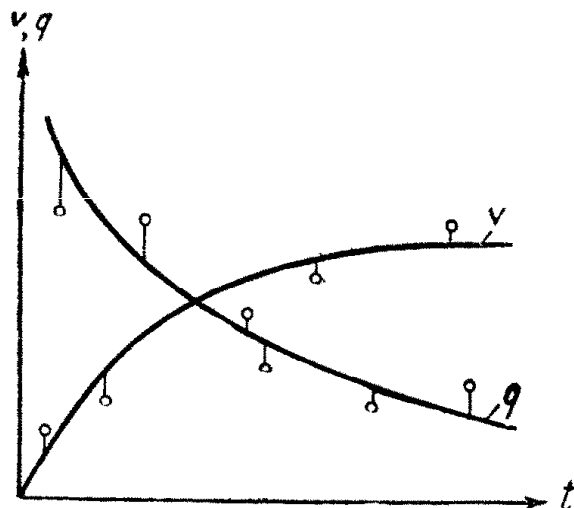


Рис. 52. Кривые зависимости $q=f(t)$ и $v=f(t)$

Для определения тех же характеристик при $h = h_0 = \text{const}$ необходимы кривые зависимости $q=f(t)$ и $v=f(t)$, где v — суммарный объем воды, израсходованной на налив с начала опыта. Эти кривые строятся по экспериментальным точкам, исходя из условия, чтобы суммы отклонений точек вверх и вниз от кривой по абсолютной величине были одинаковы (рис. 52).

Кроме того, в конце опыта (для момента времени t_2) посредством раскопки шурфа должна быть определена глубина промачивания грунта l .

§ 21. НАЛИВЫ В ШУРФЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ РАСХОДЕ ($q = \text{const}$)

Рассмотрим налив воды в шурф с центральным кольцом площадью ω . Пусть в шурф и кольцо производится налив с дебитом на единицу площади q , одинаковым для шурфа и кольца и постоянным во времени. Тогда глубина воды в кольце и шурфе h будет повышаться со скоростью u . Предположим, что по истечении времени t_1 глубина воды в шурфе и кольце достигла величины h_1 . В это время вода из шурфа и кольца была удалена и произведена раскопка дна шурфа, в результате которой определена глубина промачивания грунта l .

По этим данным и экспериментальным кривым $h = f(t)$ и $u = f(t)$ недостаток насыщения μ и коэффициент фильтрации k определяются следующим образом:

$$\mu = \frac{qt_1 - h_1}{l}; \quad (21.1)$$

$$k = \frac{(q - u)^2}{(1 - \mu)(q - u) + q\mu}. \quad (21.2)$$

Эти формулы применимы при следующем условии:

$$t_1 \geq 20 \frac{h_k}{q}, \quad (21.3)$$

где h_k — предполагаемая высота капиллярного вакуума грунта.

При соблюдении условия (21.3) капиллярными силами можно пренебрегать.

В формуле для k величина u представляет собой скорость подъема уровня в кольце, определяемую по кривой $h = f(t)$. При отсутствии капиллярных сил в грунте эта скорость постоянна во времени.

За счет влияния капиллярных сил скорость u с течением времени сначала уменьшается и затем становится почти постоянной.

При расчетах рекомендуется принимать u для моментов времени $t > 0,5 t_1$, когда скорость u становится примерно постоянной.

Описанный способ определения k и μ рекомендуется для песчаных грунтов со слабо выраженными капиллярными свойствами.

Если скорость подъема уровня в шурфе u по сравнению с расходом q очень мала ($\frac{u}{q} \leq 0,1$), то в формуле (21.2) можно принять $u \approx 0$ и тогда будет $k = q$, что аналогично формуле А. К. Болдырева.

По данным опытов с постоянным расходом возможно определение и капиллярного вакуума h_k , но в этом случае расчет крайне усложняется.

§ 22. НАЛИВЫ В ШУРФЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

Рассмотрим налив воды в шурф и установленное в его центре кольцо с площадью поперечного сечения ω . Будем считать, что налив воды в шурф и кольцо произведен мгновенно до одинаковой глубины (напора) h_0 . В дальнейшем расходы воды, поступающие в шурф и кольцо, регулируются таким образом, что напор h_0 остается постоянным и одинаковым в шурфе и кольце. Тогда расход воды q , поступающей в кольцо, будет с течением времени уменьшаться. Пусть в моменты времени t_1 и t_2 после начала налива дебиты воды, поступающей на единицу площади кольца, равны q_1 и q_2 , а объемы воды, израсходованной на налив в кольцо (без объема начального залива), равны v_1 и v_2 .

Допустим далее, что в момент времени t_2 подача воды в шурф прекращена, оставшаяся там вода откачена и произведена раскопка шурфа.

Пусть глубина промачивания грунта под кольцом в момент времени t_2 оказалась равной l_2 .

Тогда фильтрационные характеристики k , μ и h_k могут быть найдены по объемам или расходам воды на моменты времени t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$).

Определение фильтрационных характеристик по объемам воды на два момента времени t_1 и t_2

Сначала находится величина

$$\alpha_t = \frac{l_1}{h_0 + h_k},$$

которая определяется по графику рис. 53 в зависимости от $\alpha_t = \frac{t_1}{t_2}$ и $\alpha_v = \frac{v_1}{v_2}$ и затем уточняется по уравнению

$$\alpha_1 = \frac{\ln(1 + \alpha_t) - \alpha_t \ln\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_v}\right)}{1 - \frac{\alpha_t}{\alpha_v}}. \quad (22.1)$$

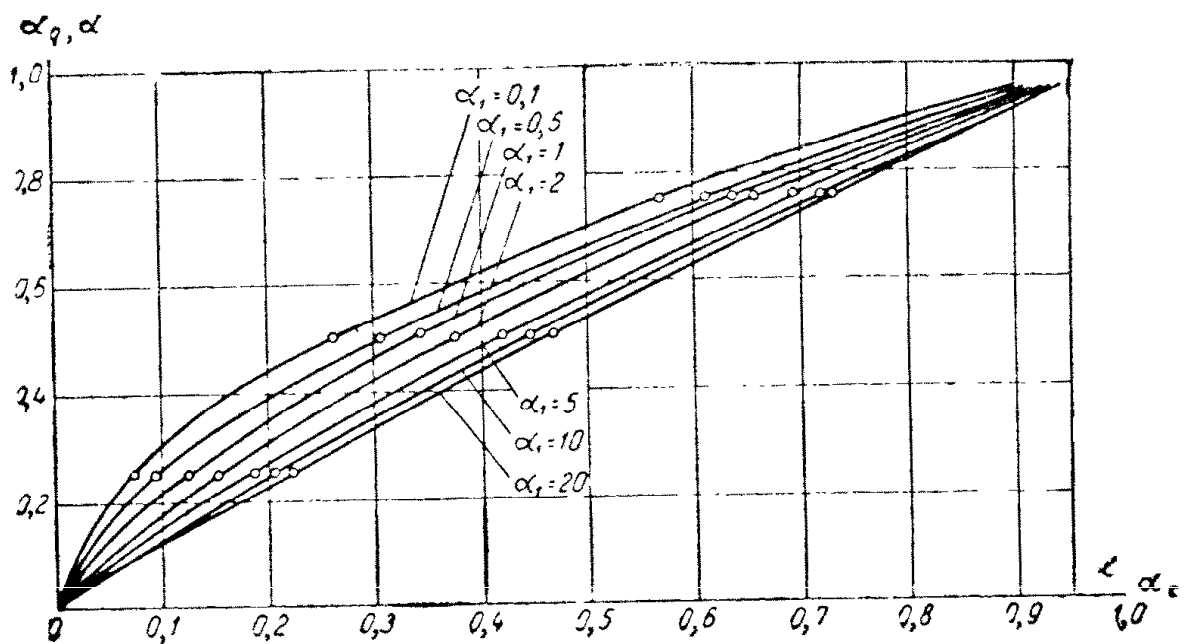


Рис. 53. График зависимости $\alpha_1 = f(\alpha_t, \alpha_v)$ для налива в шурф при постоянном напоре h_0

Для этого в правую часть уравнения (22.1) подставляется значение α_1 по графику и находится уточненная величина α_1 . Если последняя значительно отличается от значения α_1 по графику, то она снова подставляется в правую часть уравнения (1), и находится новая, уточненная величина α_1 .

Обычно достаточная близость предыдущего и последующего значений α_1 достигается при одном или двух расчетах по уравнению (22.1).

По найденной таким образом величине α_1 далее определяют

$$l_1 = \alpha_v l_2; \quad (22.2)$$

$$h_K = \frac{l_1}{\alpha_1} - h_0 = \frac{\alpha_v}{\alpha_1} l_2 - h_0; \quad (22.3)$$

$$\mu = \frac{v_2}{\omega l_2}; \quad (22.4)$$

$$k = \mu \frac{h_0 + h_K}{t_1} B(\alpha_1) = \frac{v_1}{\omega t_1 \alpha_1} B(\alpha_1), \quad (22.5)$$

где

$$B(\alpha_1) = \alpha_1 - \ln(1 + \alpha_1). \quad (22.6)$$

Величина $B(\alpha)$ может определяться по табл. 19.

Таблица 19

Значения функции $B(\alpha)$

α	$B(\alpha)$	α	$B(\alpha)$	α	$B(\alpha)$	α	$B(\alpha)$
0	0	1,8	0,77	4,6	2,88	7,4	5,27
0,1	0,00469	2	0,9	4,8	3,04	7,6	5,45
0,2	0,0177	2,2	1,04	5	3,21	7,8	5,62
0,3	0,0376	2,4	1,18	5,2	3,38	8	5,8
0,4	0,0637	2,6	1,32	5,4	3,54	8,2	5,98
0,5	0,0945	2,8	1,47	5,6	3,71	8,4	6,16
0,6	0,13	3	1,61	5,8	3,88	8,6	6,34
0,7	0,169	3,2	1,76	6	4,05	8,8	6,52
0,8	0,212	3,4	1,92	6,2	4,22	9	6,7
0,9	0,258	3,6	2,07	6,4	4,4	9,2	6,88
1	0,307	3,8	2,23	6,6	4,57	9,4	7,06
1,2	0,412	4	2,39	6,8	4,75	9,6	7,24
1,4	0,525	4,2	2,55	7	4,92	9,8	7,42
1,6	0,644	4,4	2,71	7,2	5,1	10	7,6

Из формулы (22.5) видно, что в нее не входят l_2 и h_K . Отсюда следует, что коэффициент фильтрации может быть найден и без раскопки шурфа для определения глубины промачивания к концу опыта l_2 .

Определение фильтрационных характеристик по расходам воды на два момента времени

Сначала, как и ранее, находится величина $\alpha_1 = \frac{l_1}{h_0 + h_K}$. Она определяется в зависимости от $\alpha_q = \frac{q_2}{q_1}$ и $\alpha_t = \frac{t_1}{t_2}$ по графику рис. 53 и уточняется по уравнению

$$\alpha_1 = \frac{\ln(1 + \alpha_1) - \alpha_t \ln\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_q}\right)}{1 - \frac{\alpha_t}{\alpha_q}}. \quad (22.7)$$

Это уравнение отличается от выражения (22.1) только тем, что в нем вместо величины α_v входит величина α_q .

Уточнение α_1 по уравнению (22.7) производится так же, как и при определении характеристик по суммарным объемам воды v_1 и v_2 .

При найденном значении α_1 и глубине промачивания l_2 далее находятся

$$l_1 = \frac{l_2}{\alpha_q}; \quad (22.8)$$

$$h_k = \frac{l_1}{\alpha_1} - h_0 = \frac{l_2}{\alpha_1 \alpha_q} - h_0; \quad (22.9)$$

$$k = \frac{q_1 \alpha_1}{1 + \alpha_1}; \quad (22.10)$$

$$\mu = \frac{kt_1}{(h_0 + h_k)B(\alpha_1)} = \frac{q_1 t_1 \alpha_q \alpha_1^2}{l_2(1 + \alpha_1)B(\alpha_1)}. \quad (22.11)$$

Из уравнения (22.11) также следует, что коэффициент фильтрации не зависит от l_2 и h_k . Поэтому для определения только величины k можно не производить раскопки шурфа и не определять l_2 и h_k .

Если находятся все величины k , μ и h_k , то время t_2 должно быть равно полной длительности опыта, а время t_1 может быть любым, но не слишком малым.

Лучше всего принимать t_1 , исходя из условия, чтобы градиент фильтрации J_1 не превышал 2, что имеет место при $\alpha_1 > 1$.

Если определяется только величина k , то время t_2 может быть любым, а время t_1 должно удовлетворять тому же условию.

§ 23. НАЛИВЫ ВОДЫ В ШУРФЫ ПРИ СВОБОДНОМ ПониЖЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ ПОСЛЕ НАЛИВА

Рассмотрим налив воды в шурф и центральное кольцо в нем при свободном падении уровня после налива.

Пусть в шурф и центральное кольцо залита вода на глубину h_0 , после чего налив прекращен. Допустим, что по истечении времени t_1 уровень воды в шурфе и кольце опустился бы на высоту $s_1 = 0,5h_0$, а по истечении времени t_2 — на высоту $s_2 = h_0$ (т. е. до дна шурфа). По окончании опыта произведена раскопка шурфа, при которой установлено, что глубина промачивания грунта к концу опыта равна l .

По такой же методике может быть произведен налив и в цилиндр, насаженный на монолит грунта в забое шурфа.

По данным описанного опыта сначала находится недостаток насыщения грунта, равный

$$\mu = \frac{h_0}{l}. \quad (23.1)$$

Далее определяется α_t :

$$\alpha_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (23.2)$$

и по графику рис. 54 $\alpha = f\left(\frac{t_1}{t_2}, \mu\right)$ находится величина $\alpha = \frac{h_0}{h_0 + h_k}$.

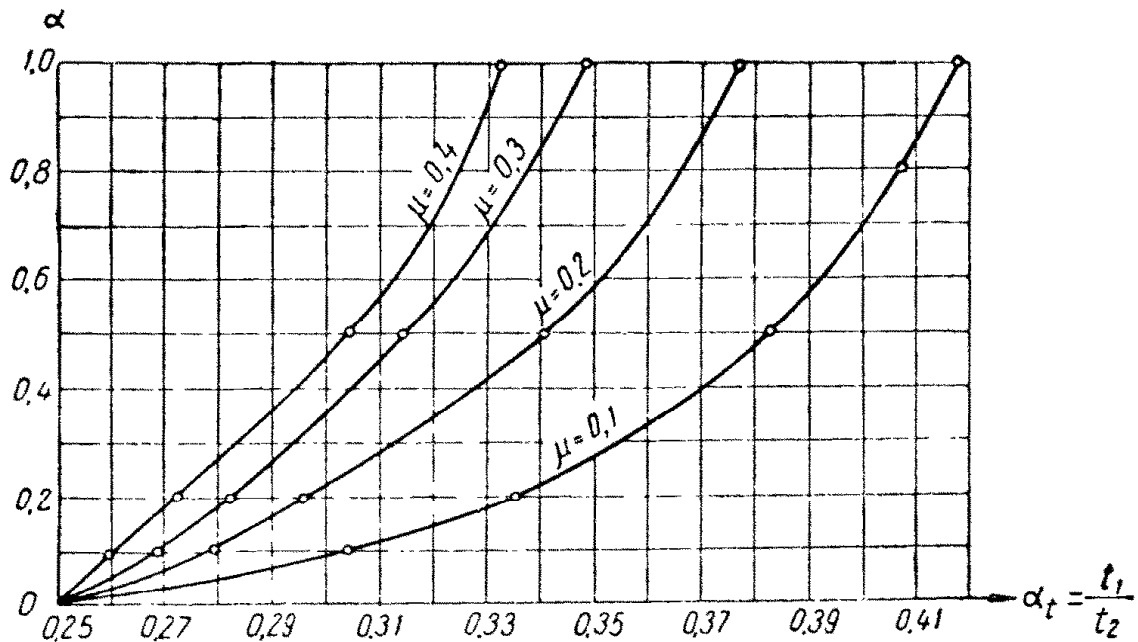


Рис. 54. График зависимости $\alpha = f(\alpha_t, \mu)$ для налива в кольцо при свободном падении уровня воды в нем ($\frac{S}{h_0} = 0,5$)

Затем эта величина уточняется по формуле

$$\alpha = \frac{\varepsilon \left[\ln \left(1 + 0,5 \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) - \alpha_t \ln \left(1 + \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \right]}{0,5 - \alpha_t}, \quad (23.3)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (23.4)$$

Уточнение α производится следующим образом: в правую часть формулы (23.3) подставляется значение α по графику и находится новое значение α ; последнее снова подставляется в правую часть формулы (23.3) и еще раз определяется значение α . Обычно после первого или второго вычисления полученное новое значение α оказывается достаточно близким к предыдущему его значению. Эта величина α и принимается для дальнейшего расчета.

Далее находятся величины h_k и k :

$$h_k = h_0 \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right); \quad (23.5)$$

$$k = \frac{h_0 + h_k}{t_2} \Phi(\mu, \alpha) = \frac{h_0}{\alpha t_2} \Phi(\varepsilon, \alpha). \quad (23.6)$$

Здесь

$$\Phi(\mu, \alpha) = \left[\alpha - \varepsilon \ln \left(1 + \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \right] (1 + \varepsilon), \quad (23.7)$$

где, как и ранее, $\varepsilon = \frac{\mu}{1-\mu}$.

Величина функции $\Phi(\mu, \alpha)$ может определяться также по табл. 20.

Таблица 20

Функции $\Phi(\mu, \alpha)$

$\mu \backslash \alpha$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,05	0,046	0,12	0,21	0,3	0,4	0,49	0,59	0,69	0,79
0,1	0,032	0,095	0,17	0,25	0,35	0,44	0,53	0,63	0,73
0,2	0,02	0,066	0,13	0,21	0,28	0,37	0,46	0,55	0,65
0,3	0,015	0,051	0,1	0,17	0,24	0,32	0,41	0,5	0,59
0,4	0,012	0,042	0,088	0,14	0,21	0,29	0,37	0,46	0,55
0,5	0,0094	0,036	0,076	0,12	0,19	0,26	0,34	0,42	0,52
0,6	0,0075	0,033	0,068	0,11	0,17	0,24	0,32	0,40	0,49

§ 24. НАЛИВЫ В ШУРФЫ ПО МЕТОДУ Н. К. ГИРИНСКОГО

Н. К. Гиринским в 1953 г. получено строгое гидромеханическое решение плоской задачи фильтрации в грунт из канала, ог-

Значения

$h_0 + h_k$ в м	Диаметр см									
	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86	0,84	0,82
0,95	1,12	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,9	0,88	0,86
0,9	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1,01	0,98	0,95	0,93	0,9
0,85	1,25	1,21	1,17	1,14	1,1	1,07	1,04	1,01	0,98	0,95
0,8	1,33	1,28	1,24	1,2	1,17	1,13	1,1	1,07	1,04	1,01
0,75	1,41	1,37	1,32	1,28	1,24	1,2	1,17	1,14	1,1	1,08
0,7	1,51	1,46	1,41	1,37	1,33	1,29	1,25	1,21	1,18	1,15
0,65	1,62	1,57	1,52	1,47	1,42	1,38	1,34	1,30	1,26	1,23
0,6	1,75	1,69	1,64	1,59	1,54	1,49	1,44	1,4	1,36	1,32
0,55	1,9	1,84	1,78	1,72	1,66	1,61	1,56	1,51	1,46	1,42
0,5	2,08	2	1,93	1,87	1,8	1,75	1,7	1,64	1,6	1,55
0,45	2,28	2,2	2,12	2,05	1,98	1,92	1,87	1,81	1,75	1,70
0,4	2,53	2,44	2,36	2,28	2,2	2,12	2,05	1,99	1,92	1,87
0,35	2,84	2,73	2,63	2,53	2,45	2,37	2,29	2,22	2,14	2,09
0,3	3,22	3,09	2,99	2,88	2,78	2,69	2,59	2,5	2,42	2,34
0,25	3,74	3,58	3,44	3,31	3,19	3,08	2,97	2,87	2,77	2,69
0,2	4,42	4,23	4,07	3,92	3,78	3,64	3,5	3,37	3,24	3,13
0,15	5,39	5,15	4,94	4,75	4,56	4,4	4,24	4,09	3,94	3,8
0,1	6,93	6,61	6,3	6,04	5,78	5,56	4,33	5,15	4,94	4,75

ражденного вертикальными непроницаемыми стенками. Из сопоставления сетки движения для этого случая, построенной аналитическим методом, с соответствующей сеткой для пространственной фильтрации из шурфа круглого сечения, построенной графическим способом, им найдена зависимость между фильтрационными расходами из канала и из шурфа [26].

На основании этой зависимости получена следующая расчетная формула для определения коэффициента фильтрации по данным опытного налива:

$$k = \zeta Q, \quad (24.1)$$

где k — коэффициент фильтрации в $m/сутки$;

Q — установившийся расход в $л/мин$;

ζ — размерный коэффициент, зависящий от глубины воды в шурфе (h_0), высоты капиллярного вакуума (h_k) и диаметра цилиндра (d).

Налив воды производится в цилиндр, вдавленный в грунт на глубину в несколько сантиметров (s), при диаметре цилиндра (d), равном 30—50 см. При заглублении цилиндра ниже дна шурфа на $(0,03—0,05)d$ наблюдается снижение фильтрационного расхода соответственно на 6—10% по сравнению с расходом из цилиндра, не вдавленного в грунт, для которого, строго гово-

Таблица 21

коэффициента ζ

цилиндров d в см										
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0,8	0,77	0,76	0,74	0,72	0,7	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63
0,84	0,81	0,79	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,66
0,88	0,86	0,84	0,82	0,8	0,78	0,76	0,74	0,73	0,71	0,7
0,93	0,91	0,88	0,86	0,84	0,82	0,8	0,79	0,77	0,75	0,73
0,99	0,96	0,94	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77
1,05	1,02	1	0,97	0,95	0,92	0,9	0,88	0,86	0,84	0,82
1,12	1,09	1,06	1,03	1	0,98	0,96	0,93	0,91	0,89	0,87
1,19	1,16	1,13	1,1	1,07	1,05	1,02	1	0,98	0,95	0,93
1,28	1,25	1,21	1,18	1,15	1,12	1,1	1,07	1,05	1,02	1
1,38	1,35	1,31	1,28	1,25	1,22	1,18	1,15	1,13	1,1	1,07
1,51	1,47	1,43	1,39	1,35	1,31	1,28	1,25	1,22	1,19	1,16
1,64	1,60	1,55	1,51	1,47	1,43	1,4	1,36	1,33	1,29	1,27
1,81	1,76	1,71	1,66	1,62	1,58	1,54	1,5	1,46	1,42	1,38
2,02	1,97	1,9	1,85	1,8	1,75	1,7	1,65	1,61	1,57	1,53
2,27	2,2	2,13	2,07	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76	1,72
2,6	2,53	2,45	2,38	2,31	2,24	2,17	2,11	2,05	1,99	1,94
3,03	2,93	2,84	2,75	2,67	2,59	2,52	2,45	2,38	2,31	2,26
3,67	3,53	3,41	3,29	3,18	3,08	2,99	2,89	2,81	2,73	2,65
4,6	4,45	4,28	4,13	3,99	3,84	3,71	3,58	3,47	3,36	3,25

ря, и выведена формула (24.1). Таким образом, окончательный расчет следует вести по формуле

$$k = \alpha \zeta Q, \quad (24.2)$$

где k — коэффициент фильтрации в *м/сутки*;

α — поправочный коэффициент, зависящий от диаметра цилиндра (d) и глубины его вдавливания (s). Коэффициент α можно определять по формуле

$$\alpha = 1 + 2 \frac{s}{d}; \quad (24.3)$$

ζ — размерный коэффициент, определяемый из табл. 21, в зависимости от величины $h_0 + h_k$ и диаметра цилиндра d ;
 Q — установившийся расход воды через дно цилиндра в *л/мин*.

При производстве опытов уровень воды в цилиндре поддерживается постоянным при помощи сосуда Мариотта, а при больших расходах воды — при помощи автоматического регулятора конструкции Е. В. Симонова.

В песчаных грунтах при наливах в цилиндры диаметром порядка $d=35$ см для проведения одного опыта достаточно израсходовать 200—400 л воды, а продолжительность опыта может быть ориентировочно принята равной 1—2 час.

§ 25. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ НАЛИВОВ В ШУРФЫ

Пример 1. Определить коэффициент фильтрации, недостаток насыщения и капиллярный вакуум грунта по результатам налива в шурф с центральным кольцом при постоянном напоре. Расчет производится по расходам воды (§ 22).

Исходные данные: диаметр кольца $d=0,3$ м (площадь сечения $0,0706$ м²); напор (глубина воды) в кольце $h_0=0,1$ м; расходы воды, поступающей в кольцо, по истечении времени $t_1=2,4$ час.=0,1 суток и $t_2=6$ час.=0,25 суток составили $Q_1=0,3$ м³/сутки и $Q_2=0,15$ м³/сутки.

Через 6 час. после начала опыта глубина промачивания грунта под кольцом $l_2=1,2$ м.

Определение величин h_k , k и μ приводится ниже.

Единичные расходы

$$q_1 = \frac{0,3}{0,0706} = 4,3 \text{ м/сутки}; \quad q_2 = \frac{0,15}{0,0706} = 2,15 \text{ м/сутки}.$$

Величины α_q и α_t

$$\alpha_q = \frac{q_2}{q_1} = \frac{2,15}{4,3} = 0,5;$$

$$\alpha_t = \frac{t_1}{t_2} = \frac{0,1}{0,25} = 0,4.$$

По графику рис. 53 имеем

$$\alpha_1 = 3,3.$$

Принимая $\alpha_1 = 3,3$ по формуле (22.7), имеем

$$\alpha_1 = \frac{\ln(1 + \alpha_1) - \alpha_t \ln\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_q}\right)}{1 - \frac{\alpha_t}{\alpha_q}} = \frac{\ln 4,3 - 0,4 \ln\left(1 + \frac{3,3}{0,5}\right)}{1 - \frac{0,4}{0,5}} = 3,24.$$

Принимая $\alpha_1 = 3,13$, найдем

$$\alpha_1 = \frac{\ln 4,13 - 0,4 \ln\left(1 + \frac{3,13}{0,5}\right)}{1 - \frac{0,4}{0,5}} = 3,13.$$

Таким образом, $\alpha_1 = 3,13$.

Капиллярный вакуум по формуле (22.9) будет

$$h_k = \frac{l_2}{\alpha_1 \alpha_q} - h_0 = \frac{1,2}{3,13 \cdot 0,5} - 0,1 = 0,667 \text{ м.}$$

Коэффициент фильтрации k по формуле (22.10) составит

$$k = \frac{q_1 \alpha_1}{(1 + \alpha_1)} = \frac{4,3 \cdot 3,13}{1 + 3,13} = 0,326 \text{ м/сутки.}$$

Недостаток насыщения μ по уравнению (22.11) равен

$$\mu = \frac{q_1 t_1 \alpha_q \alpha_1^2}{l_2 (1 + \alpha_1) B(\alpha_1)} = \frac{4,3 \cdot 0,1}{1,2} \cdot \frac{0,5 \cdot 3,13^2}{4,13 \cdot 1,712} = 0,248,$$

где

$$B(\alpha_1) = \alpha_1 - \ln(1 + \alpha_1) = 3,13 - \ln 4,13 = 1,712.$$

Пример 2. Определить коэффициент фильтрации, недостаток насыщения и капиллярный вакуум грунта по результатам налива с центральным кольцом при постоянном напоре. Расчет ведется по объемам воды (§ 22).

Исходные данные: диаметр кольца $d = 0,3$ м; напор (глубина воды) в кольце $h_0 = 0,1$ м; объем воды, поступающей в кольцо по истечении времени $t_1 = 2,4$ часа = 0,1 суток и $t_2 = 8$ час. = 0,3 суток, составил $v_1 = 0,025$ м³ и $v_2 = 0,05$ м³. Через 8 час. после начала опыта глубина промачивания грунта под кольцом $l_2 = 2$ м.

Определение величин h_k , k и μ приводится ниже.

Величина α_1 (по графику рис. 53)

$$\alpha_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{0,025}{0,05} = 0,5;$$

$$\alpha_t = \frac{t_1}{t_2} = \frac{0,1}{0,3} = 0,333;$$

$$\alpha_1 = 0,85.$$

Принимая $\alpha_1 = 0,85$ по формуле (22.1), имеем

$$\alpha_1 = \frac{\ln(1 + \alpha_1) - \alpha_t \ln\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_v}\right)}{1 - \frac{\alpha_t}{\alpha_v}} =$$

$$= \frac{\ln 1,85 - 0,333 \ln \left(1 + \frac{0,85}{0,5}\right)}{1 - \frac{0,333}{0,5}} = 0,854 \approx 0,85.$$

Окончательно принимаем $\alpha_1 = 0,85$.

Капиллярный вакуум h_K по формуле (22.3) будет

$$h_K = \frac{\alpha_1 l_2}{\alpha_1} - h_0 = \frac{0,5 \cdot 2}{0,85} - 0,1 = 1,08 \text{ м.}$$

Коэффициент фильтрации k по уравнению (22.5) равен

$$k = \frac{v_1}{\omega t_1 \alpha_1} B(\alpha_1) = \frac{0,025}{0,07 \cdot 0,1 \cdot 0,85} \cdot 0,235 = 0,987 \text{ м/сутки,}$$

где

$$B(\alpha_1) = \alpha_1 - \ln(1 + \alpha_1) = 0,85 - \ln 1,85 = 0,235.$$

Недостаток насыщения μ по формуле (22.4) составит

$$\mu = \frac{v_2}{\omega l_2} = \frac{0,05}{0,07 \cdot 2} = 0,36.$$

Пример 3. Определить коэффициент фильтрации, недостаток насыщения и капиллярный вакуум грунта по результатам налива в шурф с центральным кольцом при свободном опускании уровня воды в шурфе. Расчет производится по формулам § 23.

Исходные данные: начальный напор (глубина воды) в шурфе и кольце $h_0 = 0,2$; понижение уровня в шурфе и кольце для времени $t_1 = 15$ мин. = $0,0104$ суток составило $s_1 = 0,1$ м, а для времени $t_2 = 45$ мин. = $0,312$ суток оно было $s_2 = h_0 = 0,2$ м; глубина промачивания грунта под кольцом в конце опыта $l = 0,6$ м.

Определение величин h_K, k, μ

Недостаток насыщения μ определяем из формулы (23.1):

$$\mu = \frac{h_0}{l} = \frac{0,2}{0,6} = 0,333.$$

Величина α находится из графика рис. 54.

При $\alpha_t = \frac{t_1}{t_2} = \frac{0,15}{0,45} = 0,333$ и $\mu = 0,333$ имеем $\alpha = 0,88$.

Проверяем значение α по формуле (23.3).

При

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\mu}{1 - \mu} = \frac{0,333}{1 - 0,333} = 0,5; \\ \alpha &= \frac{\varepsilon \left[\ln \left(1 + 0,5 \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) - \alpha_t \ln \left(1 + \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \right]}{0,5 - \alpha_t} = \\ &= \frac{0,5 \ln \left(1 + 0,5 \frac{0,83}{0,5} \right) - 0,333 \ln \left(1 + \frac{0,83}{0,5} \right)}{0,5 - 0,333} = 0,838. \end{aligned}$$

Капиллярный вакуум h_k определяется по формуле (23.5):

$$h_k = h_0 \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) = 0,2 \left(\frac{1}{0,84} - 1 \right) = 0,038 \text{ м.}$$

Коэффициент фильтрации k по уравнению (23.6) будет

$$\begin{aligned} \Phi(\varepsilon, \alpha) &= \left[\alpha - \varepsilon \ln \left(1 + \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \right] (1 + \varepsilon) = \\ &= \left[0,84 - 0,5 \ln \left(1 + \frac{0,84}{0,5} \right) \right] (1 + 0,5) = 0,52. \end{aligned}$$

$$k = \frac{h_0}{\alpha t_2} \Phi(\varepsilon, \alpha) = \frac{0,2}{0,84 \cdot 0,0312} \cdot 0,52 = 3,97 \text{ м/сутки.}$$

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ЗАКОНЕ ФИЛЬТРАЦИИ**

§ 26. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно при скоростях, превышающих критическую скорость $v_{кр}$, линейный закон фильтрации (закон Дарси) нарушается. Тогда фильтрация описывается нелинейным законом вида

$$J = \frac{dh}{dr} = \frac{v}{k} + \beta \left(\frac{v}{k} \right)^2 = \frac{v}{k} \left(1 + \beta \frac{v}{k} \right), \quad (26.1)$$

где v и J — скорость и градиент фильтрации;

k — коэффициент фильтрации;

β — безразмерный параметр фильтрации, характеризующий степень отклонения ее от линейного закона.

При нелинейной фильтрации можно пользоваться всеми методами расчета линейной фильтрации, вводя в соответствующие формулы некоторый приведенный коэффициент фильтрации \bar{k} , меньший действительного k . Из формулы (26.1) этот приведенный коэффициент фильтрации \bar{k} выразится так:

$$\bar{k} = \frac{v}{J} = \frac{k}{1 + \beta \frac{v}{k}}. \quad (26.2)$$

По Д. М. Минцу отклонения от линейного закона фильтрации существуют, вообще говоря, при любой скорости v , но при малых ее значениях эти отклонения невелики. Поэтому критическую скорость $v_{кр}$, при которой закон фильтрации нарушается, следует определять по заданной максимальной ошибке n , имеющей место при расчетах по линейному закону. Примем, что критическая скорость фильтрации $v_{кр}$ соответствует отклонению

k от \bar{k} не более n , т. е. $n \geq \frac{k - \bar{k}}{k}$. Тогда получим

$$\beta \frac{v_{кр}}{k} = \frac{n}{1 - n}; \quad v_{кр} = \frac{k}{\beta} \cdot \frac{n}{1 - n}. \quad (26.3)$$

Вводя отсюда значение β в формулу (26.2), получим следующее:

$$\bar{k} = \frac{k}{1 + \frac{v}{v_{кр}} \cdot \frac{n}{1-n}}. \quad (26.4)$$

Величину n при практических инженерных расчетах можно принимать равной 0,05—0,2, что соответствует допустимой ошибке в 5—20%. При опытных откачках, нагнетаниях и наливах отклонения от линейного закона возникают обычно в призабойной зоне скважин радиусом $r_{кр}$, где скорость фильтрации является наибольшей.

Действие совершенной скважины при нелинейном законе (26.1) и установившемся режиме фильтрации рассматривалось В. М. Насбергом. Для совершенной скважины в напорном пласте имеем

$$v = \frac{q}{2\pi r m}, \quad (26.5)$$

где q — дебит;

m — мощность пласта;

r — радиус цилиндрического сечения потока.

Действие несовершенной скважины при нелинейном законе Шези и установившемся режиме фильтрации рассматривалось в работе [17].

Для несовершенной скважины в напорном пласте приближенно имеем

$$v = \frac{q}{2\pi r m + 2\pi r^2 \alpha}, \quad (26.6)$$

где для фильтра, примыкающего к одному из водоупоров $\alpha = 1$, а для фильтра, удаленного от обоих водоупоров, $\alpha = 2$. Уравнение (26.6) основано на допущении, что на цилиндрической поверхности и полусферах радиусом r скорость фильтрации v всюду одинакова (рис. 41). Чтобы получить формулы для определения коэффициента фильтрации, необходимо значения v по формулам (26.5) и (26.6) подставить в уравнение (26.1) и выполнить интегрирование этого уравнения. Приведем здесь результаты только для совершенных скважин. Подставляя это значение v в уравнение (26.1) и интегрируя, найдем

$$\Delta = \frac{q}{2\pi km} \ln \frac{r}{r_0} + \beta \left(\frac{q}{2\pi km} \right)^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right), \quad (26.7)$$

где Δ — разность напоров в двух цилиндрических сечениях потока с радиусами r и r_0 (r_0 — радиус скважины).

§ 27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПО ОДНОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ

Рассмотрим случай, когда имеется одна наблюдательная скважина, находящаяся на расстоянии r от центральной. В этом случае для определения коэффициента фильтрации k , показателя β и поправочного коэффициента на линейность фильтрации φ необходимо провести два опыта (откачки, нагнетания, налива) с дебитами q_1 и q_2 .

Принимая в формуле (26.7) для этих двух опытов $q = q_1, q_2$ и $\Delta = \Delta_1, \Delta_2$ и решая полученные два уравнения относительно k и β , найдем

$$k = \frac{q_1 \varphi}{2\pi m \Delta_1} \ln \frac{r}{r_0} = k_D \varphi; \quad (27.1)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi m k}{q_1} \right)^2 \frac{\Delta_1 r}{\frac{r}{r_0} - 1} \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) \quad (27.2)$$

или

$$\beta = \frac{r \varphi (\varphi - 1)}{\left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) \Delta_1} \ln^2 \frac{r}{r_0}, \quad (27.3)$$

где

$$\varphi = \frac{1 - \frac{q_1}{q_2}}{1 - \left(\frac{q_1}{q_2} \right)^2 \frac{\Delta_2}{\Delta_1}}; \quad (\varphi \geq 1). \quad (27.4)$$

Здесь Δ_1 — разность понижений в центральной и наблюдательной скважинах при дебите q_1 , а Δ_2 — то же, при дебите q_2 ; k_D — коэффициент фильтрации при линейном законе (по Дюпюи).

Для совершенных скважин в безнапорном потоке приближенно будут справедливы те же уравнения при среднем значении мощности потока m :

$$m = \frac{1}{2} \left[\left(H - \frac{\Delta_1}{2} \right) + \left(H - \frac{\Delta_2}{2} \right) \right] = H - \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{4}, \quad (27.5)$$

где H — естественная глубина потока.

Из уравнений (27.1) и (27.4) видно, что при $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{q_2}{q_1}$ величина $\varphi = 1$ и коэффициент фильтрации k выражаются формулой Дюпюи:

$$k_D = \frac{q_1}{2\pi m \Delta_1} \ln \frac{r}{r_0}. \quad (27.6)$$

При $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2$ величина $\varphi \rightarrow \infty$, а потому и $k \rightarrow \infty$. Сле-

довательно, коэффициент фильтрации, найденный по уравнению нелинейной фильтрации (27.1), всегда больше этого коэффициента, определенного по формуле линейной фильтрации (27.6).

Таким образом, величина $\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ может изменяться лишь в интервале от $\frac{q_2}{q_1}$ до $\left(\frac{q_2}{q_1}\right)^2$. Очевидно, что уравнением линейной фильтрации (27.6) вместо уравнения нелинейной фильтрации (27.1) можно пользоваться при условии

$$\frac{k-k_D}{k} \leq n, \quad (27.7)$$

где n — допустимая ошибка в долях единицы. Подставляя сюда значения k и k_D из формул (27.1) и (27.6), получим

$$\varphi \leq \varphi_{кр} \left(\varphi_{кр} = \frac{1}{1-n} \right) \quad (27.8)$$

или, иначе,

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2 \left[n + \frac{q_1}{q_2} (1-n) \right]. \quad (27.9)$$

Если величина φ по формуле (27.4) удовлетворяет условию

$$1 \leq \varphi \leq \varphi_{кр}; \quad \left(\varphi_{кр} = \frac{1}{1-n} \right), \quad (27.10)$$

то линейный закон фильтрации справедлив и для определения параметров k и a следует пользоваться приведенными выше уравнениями.

Если $\varphi > \varphi_{кр}$, то отклонения от линейного закона превышают максимально допустимую ошибку n . В этом случае величины k и a , найденные по уравнениям линейной фильтрации, должны быть исправлены и приняты равными

$$k = k_D \varphi; \quad a = a_D \varphi, \quad (27.11)$$

где φ выражается по формуле (27.4).

Для расчетов, основанных на линейной теории фильтрации, вместо k следует принимать приведенную величину k по формуле (26.2).

§ 28. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПО ДВУМ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ СКВАЖИНАМ

Рассмотрим случай, когда имеются две наблюдательные скважины, находящиеся на расстояниях r_1 и r_2 ($r_2 > r_1$) от центральной скважины. Примем в формуле (26.7) $r=r_1$, r_2 и $\Delta = \Delta_1$, Δ_2 , где Δ_1 — разность понижений в центральной скважине и в ближайшей к ней первой наблюдательной скважине, а Δ_2 — то же, в центральной скважине и наиболее удаленной от нее наблюда-

тельной скважине. Решая полученные два уравнения относительно k и β , получим следующие расчетные формулы для определения параметров при двух наблюдательных скважинах:

$$k = \frac{q}{2\pi m} \cdot \frac{\rho \ln \frac{r_2}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0}}{\Delta_2 \rho - \Delta_1}; \quad \rho = \frac{1 - \frac{r_0}{r_1}}{1 - \frac{r_0}{r_2}}; \quad (\rho < 1), \quad (28.1)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi m k}{q} \right)^2 \frac{r_0}{1 - \frac{r_0}{r_1}} \cdot \frac{\rho \left(\Delta_1 \ln \frac{r_2}{r_0} - \Delta_2 \ln \frac{r_1}{r_0} \right)}{\rho \ln \frac{r_2}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (28.2)$$

или после исключения k

$$\beta = \frac{r_0}{1 - \frac{r_0}{r_1}} \cdot \frac{\rho \left(\Delta_1 \ln \frac{r_2}{r_0} - \Delta_2 \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \left(\rho \ln \frac{r_2}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0} \right)}{(\Delta_2 \rho - \Delta_1)^2}. \quad (28.3)$$

Если $r_1 \gg r_0$, то $\rho = 1$ и выражение для k будет тем же, что и при линейном законе фильтрации, т. е.

$$k_D = \frac{q}{2\pi m} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\Delta_2 - \Delta_1}, \quad (28.4)$$

и тогда

$$\beta = \frac{r_0 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\Delta_2 - \Delta_1} \left[\frac{\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \ln \frac{r_2}{r_1} - \ln \frac{r_1}{r_0} \right]. \quad (28.5)$$

Примем далее, что относительное отклонение

$$\left| \frac{k - k_D}{k} \right| \leq n. \quad (28.6)$$

Подставляя сюда значения k и k_D и определяя $\varphi = \frac{k}{k_D}$, получим

$$\varphi = \frac{\frac{\Delta_2}{\Delta_1} - 1}{\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \rho - 1} \cdot \frac{\rho \ln \frac{r_2}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (28.7)$$

В отличие от определения k по одной контрольной скважине здесь величина φ может быть большей и меньшей единицы, т. е. возможны случаи $k > k_D$ и $k < k_D$.

Если

$$k > k_D; \quad 1 \leq \varphi \leq \varphi_{кр}; \quad \left(\varphi_{кр} = \frac{1}{1-n} \right), \quad (28.8)$$

то следует пользоваться линейным законом фильтрации. Если

$$k < k_D; \varphi_{кр} \leq \varphi \leq 1; \left(\varphi_{кр} = \frac{1}{1+n} \right), \quad (28.9)$$

то также следует пользоваться законом Дарси. Иначе говоря, если величина φ по формуле (28.7) находится в промежутке между $\varphi_{кр}$ и 1, то линейный закон фильтрации обеспечивает заданную точность расчетов n . В противном случае параметры k и a , найденные на основе закона Дарси, должны быть исправлены по уравнениям (27.11), где φ находится из формулы (28.7).

Кроме того, в этом случае для расчетов на основе линейной теории, как и ранее, требуется определить коэффициент \bar{k}_s по уравнению (26.2). В рассмотренных случаях одной и двух контрольных скважин поправка на нелинейность фильтрации φ выведена нами для установившегося режима фильтрации и для совершенных скважин. Однако приближенно ее можно распространять на неустановившийся режим фильтрации, а также на несовершенные скважины. В этом случае величины k_d и a_d , найденные по уравнениям для нестационарного режима, а также по уравнениям для несовершенных скважин, следует подставить в формулы (27.11) при значениях φ по уравнениям (27.4) или (28.7).

Изложенная методика оценки влияния нелинейности фильтрации применима для откачек, нагнетаний и наливов в водоносных породах.

§ 29. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Определить параметры нелинейной фильтрации по данным откачки из совершенной скважины в напорном пласте при установившемся режиме фильтрации. Расчет ведется по формулам шестой главы. Исходные данные: при мощности пласта $m=10$ м и радиусе скважины $r_0=0,1$ м имеем:

Дебит откачки в м ³ /сутки	Расстояния наблюдательной скважины от центральной в м		Понижения в скважинах в м		
	r_1	r_2	центральной	№ 1 наблюда- тельной, $r_1=5$ м	№ 2 наблюда- тельной, $r_2=15$ м
500	5	15	10	8,72	8,43
1 500	5	15	42	36,71	35,81

Определение параметров по одной наблюдательной скважине (по формулам § 27)

По наблюдательной скважине № 1

$$\Delta_1 = 10 - 8,72 = 1,28 \text{ м}; \quad \Delta_2 = 42 - 36,71 = 5,29 \text{ м};$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{500}{1500} = 0,333; \quad \frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{5,29}{1,28} = 4,13.$$

По формулам (27.4), (27.6), (27.1) и (27.3) имеем

$$\varphi = \frac{1 - \frac{q_1}{q_2}}{1 - \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2 \frac{\Delta_2}{\Delta_1}} = \frac{1 - 0,333}{1 - (0,333)^2 \cdot 4,13} = 1,23;$$

$$k_{\text{Д}} = \frac{q_1}{2\pi m \Delta_1} \ln \frac{r_1}{r_0} = \frac{500}{6,28 \cdot 10 \cdot 1,28} \ln \frac{5}{0,1} = 24,33 \text{ м/сутки};$$

$$k = \varphi k_{\text{Д}} = 1,23 \cdot 24,33 = 29,93 \text{ м/сутки};$$

$$\beta = \frac{r_1 \varphi (\varphi - 1)}{\left(\frac{r_1}{r_0} - 1\right) \cdot \Delta_1} \ln^2 \frac{r_1}{r_0} = \frac{5 \cdot 1,23 (1,23 - 1)}{\left(\frac{5}{0,1} - 1\right) 1,28} \ln^2 \frac{5}{0,1} = 0,345.$$

По наблюдательной скважине № 2

$$\Delta_1 = 10 - 8,43 = 1,57 \text{ м}; \quad \Delta_2 = 42 - 35,81 = 6,19;$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{500}{1500} = 0,333; \quad \frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{6,19}{1,57} = 3,94;$$

$$\varphi = \frac{1 - \frac{q_1}{q_2}}{1 - \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2 \frac{\Delta_2}{\Delta_1}} = \frac{1 - 0,333}{1 - (0,333)^2 \cdot 3,94} = 1,18;$$

$$k_{\text{Д}} = \frac{q_1}{2\pi m \Delta_1} \ln \frac{r_2}{r_0} = \frac{500}{6,28 \cdot 10 \cdot 1,57} \ln \frac{15}{0,1} = 25,41 \text{ м/сутки};$$

$$k = \varphi \cdot k_{\text{Д}} = 1,18 \cdot 25,41 = 29,98 \text{ м/сутки};$$

$$\beta = \frac{r_2 \varphi (\varphi - 1)}{\left(\frac{r_2}{r_0} - 1\right) \cdot \Delta_1} \ln^2 \frac{r_2}{r_0} = \frac{15 \cdot 1,18 (1,18 - 1)}{\left(\frac{15}{0,1} - 1\right) 1,57} \ln^2 \frac{15}{0,1} = 0,342.$$

Определение параметров по двум наблюдательным скважинам (по формулам § 28)

По второй откатке ($q=1500 \text{ м}^3/\text{сутки}$) имеем

$$\Delta_1 = 42 - 36,71 = 5,29 \text{ м}; \quad \Delta_2 = 42 - 35,81 = 6,19 \text{ м};$$

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{6,19}{5,29} = 1,17.$$

Далее по формулам (28.1), (28.7), (28.4) и (28.5) будет

$$\rho = \frac{1 - \frac{r_0}{r_1}}{1 - \frac{r_0}{r_2}} = \frac{1 - \frac{0,1}{5}}{1 - \frac{0,1}{15}} = 0,987;$$

$$\varphi = \frac{\frac{\Delta_2}{\Delta_1} - 1}{\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \rho - 1} \cdot \frac{\rho \ln \frac{r_2}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} =$$

$$= \frac{1,17 - 1}{1,17 \cdot 0,987 - 1} \cdot \frac{0,987 \ln \frac{15}{0,1} - \ln \frac{5}{0,1}}{\ln \frac{15}{5}} = 1,03;$$

$$k_D = \frac{q_2}{2\pi m} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\Delta_2 - \Delta_1} = \frac{1500}{6,28 \cdot 10} \cdot \frac{\ln \frac{15}{5}}{6,19 - 5,29} = 29,17 \text{ м/сутки};$$

$$k = k_D \varphi = 29,17 \cdot 1,03 = 30,05 \text{ м/сутки};$$

$$\beta = \frac{r_0 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\Delta_2 - \Delta_1} \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \ln \frac{r_2}{r_1} - \ln \frac{r_1}{r_0} \right) =$$

$$= \frac{0,1 \ln \frac{15}{5}}{6,19 - 5,29} \left(\frac{5,29}{6,19 - 5,29} \ln \frac{15}{5} - \ln \frac{5}{0,1} \right) = 0,311.$$

Из расчета видно, что поправка к проницаемости грунта за счет нелинейности фильтрации достигает максимум 23% ($\varphi = 1,23$). Эта поправка при расчете по дальней наблюдательной скважине (18%) меньше, чем при расчете по ближней наблюдательной (23%).

При максимальной допустимой ошибке в 10% $\varphi_{кр} = 1/(1-n) = 1,11$, а потому в первых двух случаях $\varphi > \varphi_{кр}$ и в третьем случае $\varphi < \varphi_{кр}$.

СКОРОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД («ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ»)

§ 30. ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОНОСНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВОССТАНОВЛЕНИЕМ УРОВНЯ ПОСЛЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ОТКАЧЕК ИЗ СКВАЖИН

Для быстрых определений проницаемости и пьезопроводности водоносных пластов все более широкое применение получают так называемые «экспресс-методы». Они основаны на наблюдениях за напорами водоносного пласта в скважине после какого-либо быстрого возмущения подземных вод в пласте. Чаще всего это возмущение осуществляется посредством кратковременной откачки, налива или нагнетания воды в скважину, после которых имеет место восстановление естественного уровня подземных вод (или так называемого пластового давления). По данным о восстановлении уровня, величины k и a могут определяться тремя различными методами, описываемыми ниже.

Оценка фильтрационных характеристик по уравнениям стационарного режима с учетом аккумуляции воды в скважине

Данный способ оценки проницаемости основан на допущении, что при восстановлении уровня воды после откачки дебит скважины выражается по уравнению стационарного режима.

Основное уравнение для определения коэффициента фильтрации пород с учетом аккумуляции воды в скважине имеет вид

$$\pi r_0^2 \frac{ds}{dt} = q(s), \quad (30.1)$$

где r_0 — радиус скважины;
 q — ее дебит при понижении s ;
 t — время.

Случай ограниченной мощности водоносного пласта $\left(\frac{l}{m} \geq 0,1\right)$

Для несовершенных скважин при $\frac{l}{m} \geq 0,1$ дебит q будет

$$q(s) = \frac{2\pi km(s-s_1)}{\ln \frac{r_1}{r_0} + 0,5\zeta_0 \left(\frac{l}{m}, \frac{m}{r_0} \right)}, \quad (30.2)$$

где r_1 — расстояние наблюдательной скважины от центральной;
 ζ_0 — коэффициент несовершенства скважины, определяемый по предыдущему способу;

s и s_1 — понижения в центральной и наблюдательной скважинах в момент времени t ;

m — мощность напорного пласта (для безнапорного пласта $m = H - 0,5(s + s_1)$);

l — длина рабочей части скважины (фильтра). Примем, что понижение в наблюдательной скважине к концу откачки s_1 по сравнению с понижением в центральной скважине в тот же момент s_0 очень мало ($s_1 = 0,05s_0$). Тогда для всего периода восстановления уровня можно принять $s_1 = 0$ и потому после интегрирования уравнения (30.1) при $\zeta_0 = \text{const}$ получим:

для напорного пласта

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r_1}{r_0} + 0,5\zeta_0 \right) \ln \frac{s_0}{s}}{mt}; \quad (30.3)$$

для безнапорного пласта

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r_1}{r_0} + 0,5\zeta_0 \right) \ln \frac{s_0(H-0,5s_0)}{s(H-0,5s)}}{Ht}, \quad (30.4)$$

где s_0 и s — понижения в центральной скважине в конце откачки и в момент времени t после начала восстановления уровня;

r_1 — расстояние от центральной скважины до точки, где в момент прекращения откачки $s_1 \approx 0,05 s_0$.

Формулы (30.3) и (30.4) применимы при $\frac{l}{m} \geq 0,1$. При $\zeta_0 = 0$ (совершенная скважина) формула типа (30.3) была впервые предложена Ф. Форхгеймером.

Случай неограниченной мощности пласта ($\frac{l}{m} \leq 0,1$). При $\frac{l}{m} \leq 0,1$ для напорного пласта вместо $q(s_0)$ в уравнении (30.1) следует принимать

$$q = \frac{2\pi kls}{\ln \frac{1,47 l}{\zeta r_0}}, \quad (30.5)$$

где l — длина рабочей части (фильтра) опытной скважины;
 ξ — коэффициент, зависящий от размещения фильтра: для
фильтра, примыкающего к кровле или подошве пласта,
 $\xi = 1$, а для фильтра, расположенного внутри пласта,
 $\xi = 2$.

В отличие от предыдущего случая здесь дебит q не зависит от r_1 и s_1 .

После интегрирования уравнения (30.1) при значении q по уравнению (30.5) получаем следующую формулу для определения k в случае напорного пласта:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \ln \frac{1,47 l}{\xi r_0}}{lt} \ln \frac{s_0}{s}, \quad (30.6)$$

где s — понижение в скважине по истечении времени t после начала восстановления уровня воды, s_0 — то же, при $t=0$.

В случае безнапорного пласта при затопленном фильтре величина l в формуле (30.7) считается равной полной длине фильтра l_0 , а при незатопленном фильтре принимается

$$l = l_0 - 0,5(s_0 + s). \quad (30.7)$$

Формула типа (30.6) для несовершенных скважин в пласте неограниченной мощности впервые была получена Н. М. Победоносцевым, а коэффициенты ξ и 1,47 введены в нее нами. Она весьма удобна для приближенного определения k по данным о восстановлении уровня в скважине после кратковременной прокачки ее в процессе бурения (посредством желонки или с помощью насоса).

При таких прокачках глубина открытой (т. е. необсаженной трубами) части забоя скважины l обычно мала и составляет небольшую долю от полной мощности пласта ($l \ll 0,1m$).

Для случаев, когда прокачка (отжелонивание) скважины производится при обсадных трубах, полностью перекрывающих скважину, и вода поступает в нее только через полусферическое дно, имеем

$$q(s) = 4\pi k r_0 s. \quad (30.8)$$

После подстановки уравнения (30.8) в (30.1) и интегрирования будет

$$k = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_0}{t} \ln \frac{s_0}{s}. \quad (30.9)$$

Эта наиболее простая формула впервые была получена Ф. Форхгеймером.

Оценка параметров по уравнениям нестационарного режима без учета накопления воды в скважине

В этом случае в отличие от предыдущего считается, что при восстановлении уровня дебит скважины выражается уравнением неустановившейся фильтрации, но накопление воды в стволе скважины не учитывается, т. е. считается, что в момент прекращения откачки водопримемная часть скважины мгновенно изолируется от водоносного пласта (как бы перекрывается глухими трубами). Допустим, что после откачки из несовершенной скважины в напорном пласте при постоянном дебите q в момент времени t_0 насос был мгновенно выключен и скважина изолирована от пласта. Тогда в любой момент времени после выключения насоса t понижение в скважине будет следующим:

$$s = -\frac{q}{4\pi km} \left\{ Ei \left[-\frac{r_0^2}{4a(t_0+t)} \right] - \zeta_0(t_0+t) \right\} + \frac{q}{4\pi km} \left\{ Ei \left(-\frac{r_0^2}{4at} \right) - \zeta_0(t) \right\}. \quad (30.10)$$

Так как обычно $t \ll t_1$, то в первом слагаемом уравнении (30.10) можно пренебречь величиной t . Тогда первое слагаемое будет приблизительно равно понижению в скважине к концу откачки s_0 , а второе, взятое с обратным знаком, будет, приблизительно равно повышению уровня в скважине $s_0 - s$ за время t .

Зная по кривой восстановления уровня повышения s_1 и s_2 в моменты времени t_1 и t_2 , получим

$$s_1 = \frac{q}{4\pi km} R(u_1); \quad (30.11)$$

$$s_2 = \frac{q}{4\pi km} R\left(u_1 \frac{t_1}{t_2}\right); \quad (30.12)$$

$$(u) = -Ei(-u) + \zeta_0(u);$$

$$u_1 = \frac{r_0^2}{4at_1}.$$

После решения уравнений (30.11) и (30.12) относительно k и a , получим формулы, уже приведенные ранее для опытных откачек (6.12—6.21). Поэтому для определения k и a следует пользоваться этими формулами, принимая в них вместо понижений s_1 и s_2 величины повышений уровня при восстановлении его после откачки.

Изложенный способ оценки k и a применим при $t_2 \leq 0,1t_0$, где t_0 — длительность откачки.

Оценка параметров по уравнениям неустановившейся фильтрации с учетом накопления воды в скважине

Теоретическое обоснование этого метода было дано И. А. Чарным (1947 г.) и позднее Г. И. Баренблаттом, Ю. П. Борисовым, Б. С. Шержуковым и др.

Приведем здесь решение Б. С. Шержукова, относящееся к случаю, когда первоначальная откачка ведется весьма малый период времени, и потому снижение напора вблизи скважины является ничтожно малым.

Течение воды в скважину описывается дифференциальным уравнением

$$a \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (30.13)$$

Здесь $a = \frac{k}{\gamma \beta}$ для напорной и $a = \frac{kH_0}{\delta}$ — для безнапорной фильтрации;

k — коэффициент фильтрации;

γ — удельный вес жидкости;

$\beta = n\alpha_{ж} + \alpha_c$ — упругоёмкость по В. Н. Щелкачеву;

n — пористость грунта;

$\alpha_{ж}$ и α_c — коэффициенты сжимаемости соответственно жидкости и пористой среды;

δ — свободная пористость или водоотдача;

H_0 — некоторая средняя на данный момент времени глубина безнапорного потока грунтовых вод;

t — время.

В безнапорном пласте накопление воды в скважине происходит за счет сработки статических запасов воды, находящейся в порах грунта в объеме тела, образованного воронкой депрессии. Начальные и граничные условия формулируются следующим образом:

$$H(r, 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } r \leq r_0; \\ H_0 & \text{при } r \geq r_0; \end{cases} \quad (30.14)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(r, t) = H_0; \quad (30.15)$$

$$2\delta \int_{r_0}^{\infty} [H_0 - H(r, t)] r dr = r_0^2 H(r_0, t). \quad (30.16)$$

При этих условиях уравнение (30.13) имеет следующее решение:

$$\frac{H(r_0, \tau)}{H_0} = 1 - \frac{8\delta^2}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu^2 \tau} d\mu}{\mu \{ [\mu J_0(\mu) - 2\delta J_1(\mu)]^2 + [\mu Y_0(\mu) - 2\delta Y_1(\mu)]^2 \}}, \quad (30.17)$$

где $\tau = \frac{at}{r_0^2}$, $J_0(\mu)$, $Y_0(\mu)$ и $J_1(\mu)$, $Y_1(\mu)$ — функции Бесселя

и Вебера соответственно нулевого и первого порядка.

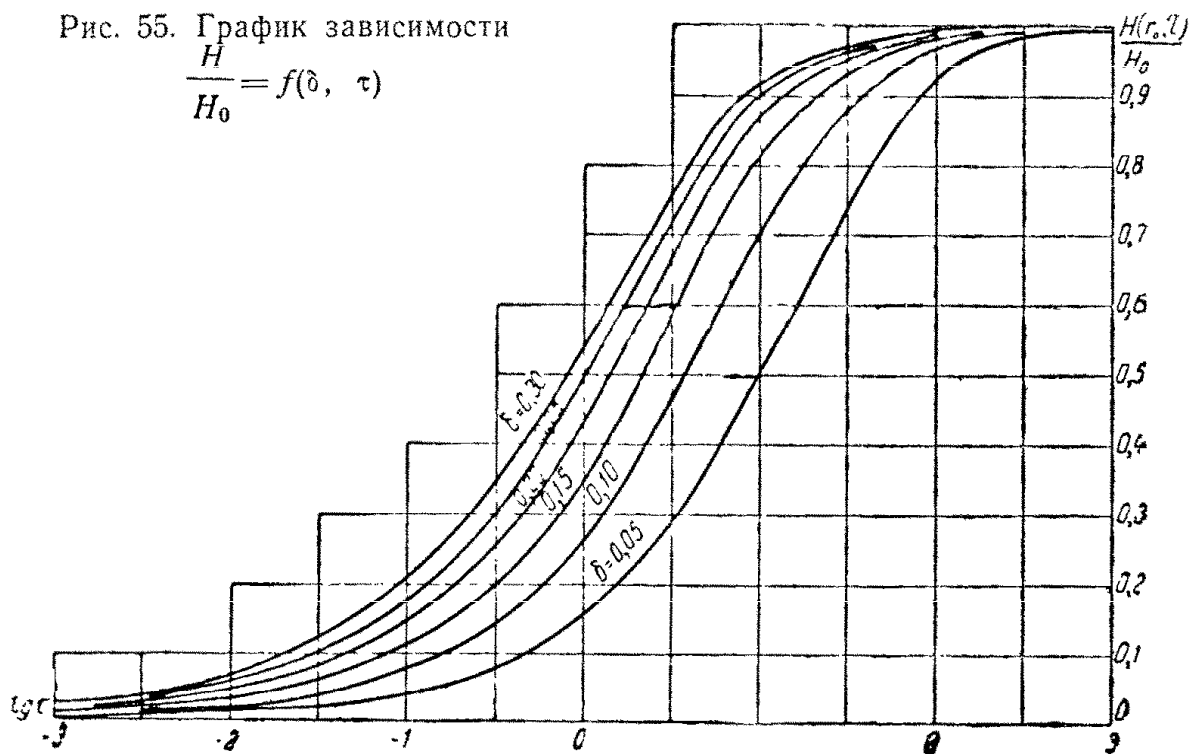
В начальный период опыта (при $\tau < 1$) действительно приближенное выражение

$$\frac{H(r_0, \tau)}{H_0} = 2\delta [1,128 \tau^{1/2} - (2\delta - 0,5) \tau + 0,752(4\delta^2 - 2\delta - 0,125) \tau^{3/2} - 0,5(8\delta^3 - 6\delta^2 - 0,125) \tau^2 + \dots]. \quad (30.18)$$

На рис. 55 дан график $\frac{H(r_0, \tau)}{H_0} = f(\delta, \tau)$, построенный по выражению (30.17).

Рис. 55. График зависимости

$$\frac{H}{H_0} = f(\delta, \tau)$$



Располагая опытной кривой восстановления горизонта воды в скважине, по этому графику при известных значениях водоотдачи можно непосредственно определить τ , а следовательно, и коэффициент a :

$$a = r_0^2 \frac{\tau}{t}.$$

Коэффициент фильтрации k определяется по формуле

$$k = \frac{\delta r_0^2}{H_0} \cdot \frac{\tau}{t}.$$

При обработке данных восстановления горизонта воды в скважине, вскрывающей напорный водоносный пласт, следует положить, что

$$\delta = \gamma m \beta,$$

где m — мощность пласта.

Для определения k в данных условиях может быть рекомендована также преобразованная нами формула Кирхема [37]

$$k = 0,97 \frac{s_0 - s}{t} \cdot \frac{\ln 0,72 \frac{s}{r_0}}{\cos \frac{\pi s}{2s_0}},$$

где s_0 и s — понижения в скважине в начале восстановления и в момент времени t .

Эта формула применима при $\frac{s}{r_0} > 50$.

§ 31. ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕВОДОНОСНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАЛИВОВ ВОДЫ В СКВАЖИНЫ

В неводоносных породах для скоростного определения k и n целесообразно использовать наливов воды в скважину, перекрытую обсадной трубой, как это предложено Н. Н. Веригиным в 1947 г. В этих целях нижняя часть скважины тампонируется глиной. Затем до подошвы глиняной пробки в скважину заливается обсадная труба. Ниже трубы производится подчистка забоя скважины, при которой удаляется верхняя нарушенная зона пород, и поверхность забоя принимает форму, близкую к полусфере (рис. 56). При наливе вода фильтруется через открытый забой скважины, образуя под ним некоторую область насыщения пород водой. При этом глиняная пробка устраняет облегченную фильтрацию вдоль наружной поверхности обсадной трубы. Наливы следует вести при высоте столба воды в скважине s_0 , значительно большем максимального радиуса растекания ее $R_2 (s_0 \geq 10R_2)$. Тогда, как и ранее, влиянием силы тяжести по сравнению с силой давления воды можно пренебречь. Если налив производится внутри исследуемого слоя (рис. 56, а), то область насыщения пород у забоя скважины будет близка к сфере (шару). Площадь сферической изобары радиусом r с учетом

уменьшения ее скважиной в верхней части сферы насыщения составит

$$\omega = 4\pi r^2 - \pi r_0^2, \quad (31.1)$$

где r_0 — радиус обсадной трубы.

Если налив производится непосредственно под непроницаемой кровлей исследуемого слоя (рис. 56, б), то область насыщения пород будет близка к полусфере. Площадь любой изобары

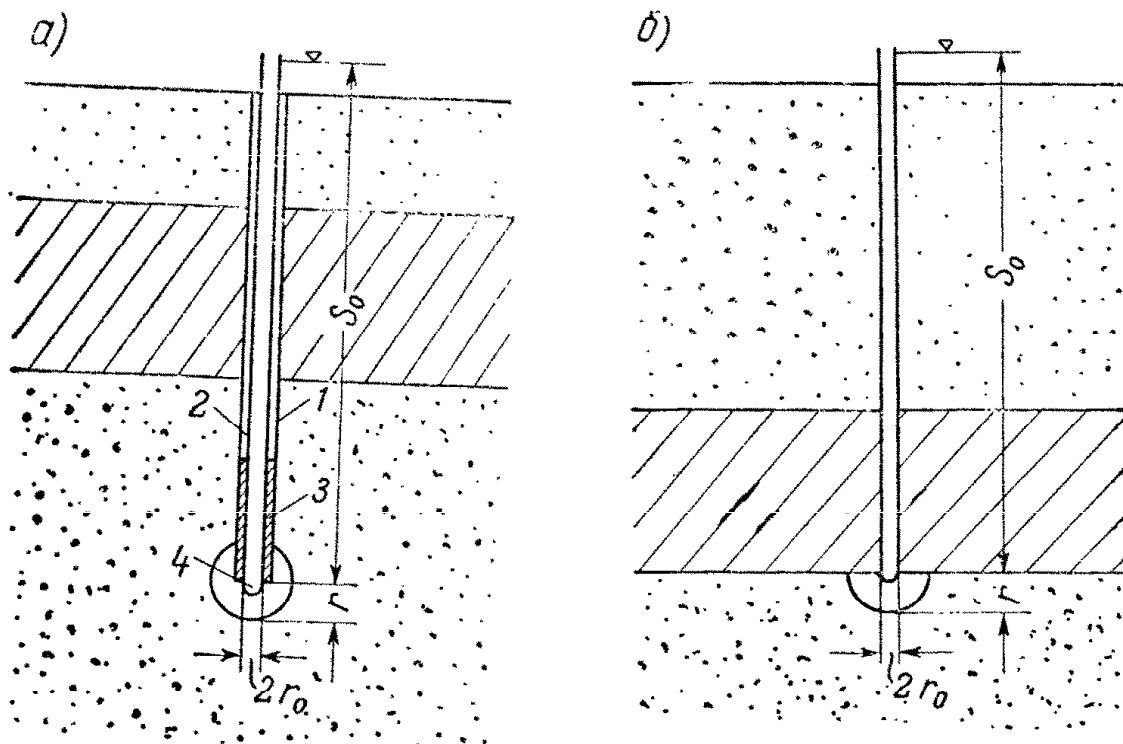


Рис. 56. Схема налива через открытый забой скважины

1 — первая колонна труб; 2 — вторая колонна; 3 — глиняный тампонаж; 4 — забой скважины

радиусом r , которая в этом случае не уменьшается за счет скважины, составит

$$\omega = 2\pi r^2. \quad (31.2)$$

Объединяя эти два случая, можем написать

$$\omega = 2\pi r^2 \xi - \pi r_0^2 (\xi - 1), \quad (31.3)$$

где при наливах внутри пласта коэффициент $\xi = 2$, а при наливах у его кровли $\xi = 1$.

Второе слагаемое ввиду его малости можно отбросить и тогда

$$\omega = 2\pi r^2 \xi. \quad (31.4)$$

При условии пренебрежения силами тяжести, упругости и инерции, а также без учета стеснения области насыщения стволом скважины (при $\xi = 2$) возможно строгое решение рассматриваемой задачи.

При наливах с постоянным расходом $q = \text{const}$ и постоянным напором в скважине $s_0 = \text{const}$ это решение сводится к интегрированию системы двух уравнений:

$$q = n\omega \frac{dr}{dt}; \quad (31.5)$$

$$q = -k\omega \frac{ds}{dr}. \quad (31.6)$$

Здесь знак минус обусловлен тем, что градиент $\frac{ds}{dr} < 0$, а расход $q > 0$; n — свободная пористость.

При мгновенном наливе до некоторой начальной высоты s_0 и последующем свободном падении уровня в скважине к этим уравнениям добавляется еще следующее равенство:

$$q = -\pi r_0^2 \frac{ds}{dt}. \quad (31.7)$$

Рассмотрим все три режима наливов отдельно.

Наливы при постоянном расходе

В этом случае напор в скважине s_0 со временем возрастает. Интегрируя (31.5) и (31.6) при $q = \text{const}$ и значении ω по (31.4) в пределах от r, t до $r_0, 0$ и от $r, 0$ до $r_0, s_0 + h_k$, получим

$$q = \frac{2}{3} \pi \xi \frac{r^3 - r_0^3}{t} \quad n = \frac{2\pi \xi k (s_0 + h_k)}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}}, \quad (31.8)$$

где $r(t)$ — радиус растекания воды;

$s_0(t)$ — напор (высота столба воды) в скважине;

h_k — капиллярный вакуум на границе растекания.

Если принять значение ω по (31.3), то эти уравнения будут

$$q = \pi \frac{\frac{2}{3} \xi (r^3 - r_0^3) - r_0^2 (r - r_0) (\xi - 1)}{t} n;$$

$$q = \frac{2\pi \sqrt{2\xi} k (s_0 + h_k) r_0}{\ln \frac{\left(\frac{r}{r_0} \sqrt{2\xi} + 1\right) (\sqrt{2\xi} - 1)}{\left(\frac{r}{r_0} \sqrt{2\xi} - 1\right) (\sqrt{2\xi} + 1)}}.$$

Для двух моментов времени после начала налива $t = t_1, t_2$ ($t_2 > t_1$). Зная напоры $s_0 = s_1, s_2$ ($s_2 > s_1$), из уравнений (31.8), находим радиусы растекания $r = R_1, R_2$, а затем k и n :

$$\left. \begin{aligned} R_1 &\approx r_0 \frac{1 - \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k} \sqrt[3]{\frac{t_1}{t_2}}}{1 - \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k}}; \\ R_2 &\approx R_1 \sqrt[3]{\frac{t_2}{t_1}}; \end{aligned} \right\} \quad (31.9)$$

$$k = \frac{q}{2\pi\xi(s_1 + h_k)} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{q}{2\pi\xi(s_2 + h_k)} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_2} \right); \quad (31.10)$$

$$n = \frac{3}{2\pi\xi} \cdot \frac{qt_1}{R_1^3 - r_0^3} = \frac{3}{2\pi\xi} \cdot \frac{qt_2}{R_2^3 - r_0^3}. \quad (31.11)$$

В формуле для k считается известным капиллярный вакуум h_k . Так как обычно $s_1 \gg h_k$ ($s_1 \geq 0.1 h_k$), то величину h_k можно принимать ориентировочно.

Наливы при постоянном напоре

В этом случае дебит q с течением времени уменьшается. Сначала интегрируем уравнение (31.6) в тех же пределах, что и ранее. Затем значение q из (31.6) подставим в равенство (31.5) и последнее интегрируем при $s_0 = \text{const}$ в пределах от r , t до r_0 , 0. Тогда получим

$$q = \frac{2\pi\xi k (s_0 + h_k)}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}}; \quad (31.12)$$

$$\frac{kst}{r_0^2 n} = \frac{1}{3} \left(\frac{r^3}{r_0^3} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{r_0^2} - 1 \right) = B_1 \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (31.13)$$

Принимая в этих уравнениях для моментов времени $t=t_1, t_2$ ($t_2 > t_1$) дебиты $q=q_1, q_2$ ($q_1 > q_2$) и радиусы растекания $r=R_1, R_2$, получим следующее:

а) Радиусы R_1 и R_2 находятся по способу последовательных приближений из уравнений:

$$\frac{R_2}{r_0} = \frac{1}{1 - \frac{q_1}{q_2} \left(1 - \frac{r_0}{R_1} \right)}; \quad (31.14)$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{B_1 \left(\frac{R_1}{r_0} \right)}{B_1 \left(\frac{R_2}{r_0} \right)}, \quad (31.15)$$

где $B_1 \left(\frac{r}{r_0} \right)$ выражается по (31.13).

Расчет по этим формулам ведется следующим образом. Принимая значение r_1 произвольно, но так, чтобы $\frac{r_0}{R_1} > 1 - \frac{q_2}{q_1}$. Далее находят $\frac{R_2}{r_0}$ по (31.14) и $\frac{t_1}{t_2}$ по (31.15). Повторяя то же самое при другом значении $\frac{r_0}{R_1} > 1 - \frac{q_2}{q_1}$, определяют второе значение $\frac{t_1}{t_2}$. Затем на кривой $\frac{t_1}{t_2} = f\left(\frac{R_1}{r_0}\right)$ находят значение R_1 , соответствующее действительной величине $\frac{t_1}{t_2}$. Полученное значение R_1 проверяют еще раз.

б) При известном R_1 величины k и n будут

$$k = \frac{q_1}{2\pi\xi(s_0 + h_k)} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_1} \right); \quad (31.16)$$

$$n = \frac{ks_0 t_1}{r_0^2 B_1 \left(\frac{R_1}{r_0} \right)}, \quad (31.17)$$

где s_0 — постоянный напор (высота столба) воды.

Свободное падение уровня воды после мгновенного налива

В этом случае величины q и s будут переменными. Приравнявая q по (31.5) и (31.7) и интегрируя в пределах от $s_0 + h_k$, r до 0, r , получим

$$s_0 + h_k = \frac{2}{3} \xi r_0 \left(\frac{r^3}{r_0^3} - 1 \right) n. \quad (31.18)$$

Приравнявая q по (31.5) и (31.12), заменяя в полученном уравнении s_0 из (31.18) и интегрируя в пределах от r , t до r_0 , 0, найдем

$$\xi \frac{kt}{r_0} = \frac{3}{4} \ln \frac{1}{3} \left(\frac{r^2}{r_0^2} + \frac{r}{r_0} + 1 \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\operatorname{arctg} \frac{1 + 2\frac{r}{r_0}}{\sqrt{3}} - \operatorname{arctg} \sqrt{3} \right) = B_2 \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (31.19)$$

Принимая в полученных уравнениях для моментов времени $t=t_1, t_2$; $s_0=s_1, s_2$ и $r=R_1, R_2$, как и ранее, будем иметь систему уравнений с неизвестными R_1, R_2, n и k . Решение этой системы приводит к следующим расчетным формулам:

а) для радиусов растекания R_1 и R_2

$$\frac{R_2}{r_0} = \sqrt[3]{\frac{s_2 + h_k}{s_1 + h_k} \left(\frac{R_1^3}{r_0^3} - 1 \right) + 1} \approx \frac{R_1}{r_0} \sqrt[3]{\frac{s_2}{s_1}}; \quad (31.20)$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{B_2 \left(\frac{R_1}{r_0} \right)}{B_2 \left(\frac{R_2}{r_0} \right)}. \quad (31.21)$$

По этим уравнениям радиусы R_1 и R_2 находятся по способу последовательных приближений, как это указано ранее;

б) для k и n

$$n = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{s_1 + h_k}{r_0 \left(\frac{R_1^3}{r_0^3} - 1 \right)}; \quad k = \frac{r_0}{t} \cdot \frac{B_2 \left(\frac{R_1}{r_0} \right)}{\xi}. \quad (31.22)$$

Функция $B \left(\frac{r}{r_0} \right)$ приводится ниже в табл. 22.

Таблица 22

Функция $B \left(\frac{r}{r_0} \right)$

r/r_0	1	3	5	7	10	15	20	25
B_1	0	4,67	29,3	90	284	1011	2457	4896
B_2	0	0,856	1,43	1,85	2,33	2,88	3,29	3,61

С помощью этих данных можно составить таблицу (или график), позволяющую сразу находить $\frac{R_1}{r_0} = f \left(\frac{t_1}{t_2}, \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k} \right)$. Для этого, принимая произвольно $\frac{R_1}{r_0} \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k}$ из (31.20), следует найти $\frac{R_2}{r_0}$, по таблице определить $B_2 \left(\frac{R_1}{r_0} \right)$ и $B_2 \left(\frac{R_2}{r_0} \right)$ и из (31.21) подсчитать $\frac{t_1}{t_2}$. Аналогичным образом по уравнениям (31.14) и (31.15) можно получить удобную вспомогательную таблицу (или график) для $\frac{R_1}{r_0} = f \left(\frac{t_1}{t_2}, \frac{q_2}{q_1} \right)$.

§ 32. ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВОССТАНОВЛЕНИЕМ УРОВНЯ В СКВАЖИНАХ И ПО ДАННЫМ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАЛИВОВ

Пример 1. Определить коэффициент фильтрации по данным о восстановлении уровня воды после кратковременной откачки из скважины в безнапорном пласте. Расчет производится по формулам § 30.

Исходные данные: $t_0=0,1$ суток; $H=10$ м; $r_0=0,1$ м; $l_0=1$ м; $\xi=1$; $s_0=9$ м; $r_1=10$ м. Повышения уровня воды после откачки составили:

$t_{\text{сут}}$	$s_{\text{м}}$
$t_1 = 0,001$	$s_1 = 6,2$
$t_2 = 0,01$	$s_2 = 0,2$

Расчет по первому способу

Поскольку $l_0 = 0,1H$, будем пользоваться формулами (30.6) и (30.7) при затопленном фильтре ($l = l_0 = 1 \text{ м}$):

для момента $t_1 = 0,001$ суток

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \ln \frac{1,47l}{\xi r_0}}{lt_1} \ln \frac{s_0}{s_1} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1^2 \ln \frac{1,47 \cdot 1}{1 \cdot 0,1}}{1 \cdot 0,001} \ln \frac{9}{6,2} = 5 \text{ м/сутки};$$

для момента $t_2 = 0,01$ суток

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \ln \frac{1,47l}{\xi r_0}}{lt_2} \ln \frac{s_0}{s_2} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1^2 \ln \frac{1,47 \cdot 1}{1 \cdot 0,1}}{1 \cdot 0,01} \ln \frac{9}{0,2} = 5,12 \text{ м/сутки}.$$

Расчет по второму способу

Если воспользоваться формулами (30.3) и (30.4), то будет:

для момента t_1

$$\frac{l}{m} = \frac{l_0}{H} = \frac{1}{10}; \quad \frac{m}{r_0} \approx \frac{H}{r_0} = \frac{10}{0,1} = 100;$$

$$\xi_0 = 43,5;$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{2} \xi_0 \right)}{Ht_1} \ln \frac{s_0 (H - 0,5s_0)}{s_1 (H - 0,5s_1)} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1^2 \left(\ln \frac{10}{0,1} + \frac{1}{2} 43,5 \right)}{10 \cdot 0,001} \ln \frac{9(10 - 0,5 \cdot 9)}{6,2(10 - 0,5 \cdot 6,2)} = 3,95 \text{ м/сутки};$$

для момента t_2

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{2} \xi_0 \right)}{Ht_2} \ln \frac{s_0 (H - 0,5s_0)}{s_2 (H - 0,5s_2)} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1^2 \left(\ln \frac{10}{0,1} + \frac{1}{2} 43,5 \right)}{10 \cdot 0,001} \ln \frac{9(10 - 0,5 \cdot 9)}{0,2(10 - 0,5 \cdot 0,2)} = 4,25 \text{ м/сутки}.$$

Пример 2. Определить коэффициент фильтрации k и коэффициент трещиноватости n по данным наливов с постоянным расходом $q = \text{const}$. Расчет производится по формулам § 31.

Исходные данные: $t_1 = 20$ мин.; $t_2 = 40$ мин.; $h_k = 0$; $\xi = 2$; $s_1 = 30$ м; $s_2 = 33$ м; $r_0 = 0,1$ м; $q = 1$ м³/сутки. По формулам (31.9), (31.10) и (31.11) определяются R_1 , R_2 , k и n .

Радиусы растекания

$$R_1 = r_0 \frac{1 - \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k} \sqrt[3]{\frac{t_1}{t_2}}}{1 - \frac{s_1 + h_k}{s_2 + h_k}} = 0,1 \frac{1 - \frac{30}{33} \sqrt[3]{\frac{20}{40}}}{1 - \frac{30}{33}} = 0,306 \text{ м};$$

$$R_2 = R_1 \sqrt[3]{\frac{t_2}{t_1}} = 0,306 \sqrt[3]{\frac{40}{20}} = 0,386 \text{ м}.$$

Коэффициент фильтрации

$$k = \frac{q}{2\pi\xi(s_1 + h_k)} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_1} \right) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2(30 + 0)} \left(\frac{1}{0,1} - \frac{1}{0,306} \right) = 0,085 \text{ м/сутки}.$$

Коэффициент трещиноватости

$$n = \frac{3}{2\pi\xi} \cdot \frac{qt_1}{R_1^3 - r_0^3} = \frac{3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \frac{1 \cdot 0,0139}{0,306^3 - 0,1^3} = 0,12 \text{ (} n \approx 12\% \text{)}.$$

ОПЫТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИНДИКАТОРОВ В ПОТОКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для определения свободной (активной) пористости водоносных пород и других их характеристик могут быть широко использованы опыты измерения истинной скорости течения грунтовых вод с помощью индикаторов (красителей, растворов солей,

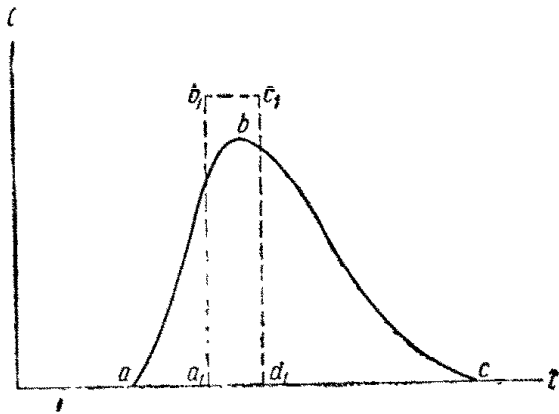


Рис. 57. График зависимости концентрации индикатора в улавливающей скважине от времени
 $c=f(t)$

радиоактивных изотопов). Такого рода опыты в естественном грунтовом потоке впервые проводились еще А. Сликтером, а затем многими другими исследователями. Они состоят в том, что в скважину или шурф загружается и быстро перемешивается концентрированный раствор краски, соли или радиоактивного изотопа, которые улавливаются в другой скважине (или шурфе), находящейся ниже по течению грунтовых вод. Момент прохождения индикатора в улавливающей скважине фиксируется

посредством периодического отбора и анализа проб воды из нее или посредством регистрации электрического тока, возникающего во внешней цепи между двумя электродами, погруженными в загрузочную и улавливающую скважины (электролитический способ А. Сликтера). Подобного рода опыты при опытных откачках и наливах проводились нами в 1936 г. в процессе изысканий источников водоснабжения Почекуевского рудника в Забайкалье. При откачках эти опыты проводились также Н. Н. Биндеманом.

В этих случаях запуск индикатора производится в дальнюю наблюдательную скважину, а улавливание его ведется в других наблюдательных скважинах, размещенных ближе к центральной скважине, а также в самой центральной скважине. При

наливах и нагнетаниях запуск индикатора производится в центральную скважину, а улавливание его ведется в наблюдательных скважинах.

В результате опытов получают кривую зависимости концентрации индикатора c в улавливающей скважине от времени t , имеющую характерный максимум b и обычно более или менее крутую ветвь возрастания концентрации ab и сравнительно пологую ветвь убывания концентрации bc (рис. 57).

Такая форма кривой концентрации обусловлена различием истинных скоростей фильтрации в порах разного размера и в разных точках пор, а также сорбцией и диффузией индикатора. При отсутствии этих явлений кривая $c = f(t)$ имеет форму прямоугольника $a_1 b_1 c_1 d_1$ (рис. 56).

В настоящее время теория движения индикаторов в водоносных породах разработана лишь для простейших случаев (главным образом для совершенных скважин и без учета сорбции и диффузии). Основные формулы для определения n и некоторых других характеристик пород в таких условиях приводятся ниже.

§ 33. ОПЫТЫ С ИНДИКАТОРАМИ В ЕСТЕСТВЕННОМ ПОТОКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При стационарном режиме одномерный поток подземных вод до устройства в нем скважины или шурфа имеет всюду одинаковую скорость (равномерное течение).

Часто считают, что после устройства скважины или шурфа поток остается одномерным и равномерным (рис. 58, а). Поэтому при опытах с индикаторами скорость течения принимается постоянной и равной,

$$u = \frac{r_1 - r_0}{t} = \frac{k}{n} J; \quad (33.1)$$

отсюда,

$$n = \frac{k J t}{r_1 - r_0}, \quad (33.2)$$

где r_0 — радиус загрузочной скважины;

r_1 — расстояние центра загрузочной скважины от улавливающей;

J — естественный градиент (уклон) потока;

k, n — коэффициент фильтрации и активная пористость;

t — время продвижения индикатора между скважинами

В действительности при устройстве скважин и шурфов из-за малых сопротивлений и градиентов внутри этих выработок естественный поток подземных вод становится двухмерным и неравномерным, а скорость его, особенно вблизи выработок, оказывается неодинаковой. Кинематическая структура такого потока показана на рис. 58, б.

Чтобы отчасти учесть действительную структуру течения, воспользуемся точным решением задачи о движении подземной

воды через скважину круглого сечения. Как показано проф. В. Н. Кузнецовым, точное гидромеханическое решение этой задачи получается посредством сложения потока, создаваемого дуплетом, с одномерным равномерным течением.

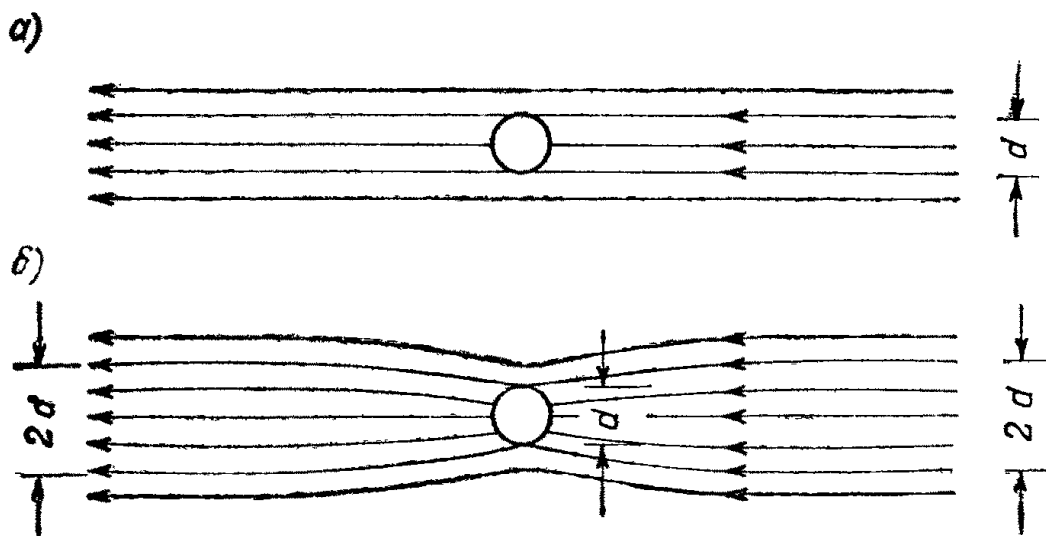


Рис. 58. Скважина в потоке подземных вод

В соответствии с этим для скважины в напорном потоке напор h и функция тока ψ выражаются следующим образом:

$$h = h_0 + Jx \left(1 - \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \right); \quad (33.3)$$

$$\psi = kJy \left(1 + \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \right), \quad (33.4)$$

где h_0 — напор в скважине;

r_0 — радиус загрузочной скважины;

x, y — координаты (ось x направлена вверх по потоку). Скорость фильтрации грунтовых вод вдоль оси x ($y=0$)

будет

$$n \frac{dx}{dt} = k \frac{\partial h}{\partial x} = k \left(J + \frac{r_0^2}{x^2} \right), \quad (33.5)$$

откуда активная пористость n выражается следующим образом:

$$n = \frac{ktJ}{r_1 - r_0} A; \quad (33.6)$$

$$A = \frac{1}{1 - \frac{r_0}{r_1 - r_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{J}} \left(\operatorname{arctg} \frac{r_1}{r_0} \sqrt{J} - \operatorname{arctg} \sqrt{J} \right)}.$$

Из этого уравнения определяется n (при известном k) или k (при известном n). В (33.6) r_1 — расстояние улавливающей скважины от центра загрузочной и t — время пробегания инди-

катора между этими скважинами (t находится из графика рис. 56 по моменту появления индикатора). Ниже в таблице приводятся значения коэффициента A .

Таблица 23
Величина $A(J, \frac{r_1}{r_0})$

$\frac{r_1}{r_0} \backslash J$	0,01	0,001	0,0001
10	4,2	30,5	272
30	1,66	4,85	34
100	1,16	1,65	4,61
300	1,05	1,18	1,71
1000	1,01	1,05	1,17

Из таблицы следует, что при $\frac{r_1}{r_0} \geq 1000$ и $J > 10^{-4}$, а также при $\frac{r_1}{r_0} \geq 100$ и $J \geq 0,01$ с точностью до 16—17% можно принять в формуле (33.5) $r_0=0$ и $A \approx 1$. В противном случае A существенно отличается от 1; если это обстоятельство не учитывать, то скорость и коэффициент фильтрации, найденные по формуле (33.6), будут завышены, а свободная пористость (трещиноватость) занижена.

Формула (33.6) относится к потоку неограниченных размеров при наличии одной скважины. В опытах с индикаторами обычно имеются две скважины, и потому влияние неравномерности потока будет несколько большим, чем по формуле (33.6).

Водопроницаемость пород может быть оценена по изменениям концентрации индикатора c в загрузочной скважине. Пренебрегая диффузией индикатора из загрузочной скважины, можем написать

$$c = \frac{c_0 \pi r_0^2 h_0 - q \int_0^t c dt}{\pi r_0 h_0}, \quad (33.7)$$

где r_0 — радиус этой скважины;

h_0 — глубина воды в ней;

c_0 — начальная концентрация индикатора в скважине;

c — концентрация его в скважине в момент времени t ;

q — расход воды, поступающей в скважину и вытекающей из нее. После дифференцирования по t

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{q}{\pi r_0 h_0} c, \quad (33.8)$$

откуда

$$q = \frac{\pi r_0^2 h_0}{t} \ln \frac{c_0}{c}. \quad (33.9)$$

Это уравнение принадлежит Д. И. Кочерину [40].

Согласно предыдущему, расход воды q найдется из формулы (33.4) при $x=0$; $y=r_0$ и $\psi = 0,5 \frac{q}{m}$, что дает

$$q = 4r_0 k J m, \quad (33.10)$$

где m — мощность пласта.

Таким образом, в скважину поступает расход воды q , равный расходу естественного потока шириной в два диаметра скважины ($2d=4r_0$).

Если же считать, что скважины не нарушают равномерности потока, то расход q будет равен расходу естественного потока шириной только в один диаметр ($d=2r_0$). Это существенное различие впервые было отмечено С. А. Колем в разработанной им теории подземного тахиметра, позволяющего определять скорость грунтовых вод по измерениям концентрации индикатора в скважине [39]. Из двух последних уравнений имеем

$$k = \frac{\pi r_0 h_0}{4 J t m} \ln \frac{c_0}{c}. \quad (33.11)$$

Следует отметить, что в процессе опытов необходимо непрерывное перемешивание воды в скважине, создающее достаточное осреднение концентрации c . Особенно это существенно в напорном потоке, где $h_0 \gg m$ и концентрации вверху у поверхности уровня и внизу у дна скважины могут резко различаться друг от друга.

В безнапорном потоке, где $h_0=m$, разность концентраций у дна скважины и на поверхности уровня менее существенна, но некоторая конвекция в скважине во время опыта желательна и в этом случае. Определив k по формуле (33.11), далее следует из формулы (33.6) найти n . При этом в обоих случаях естественный уклон потока J должен быть известен.

§ 34. ОПЫТЫ С ИНДИКАТОРАМИ ПРИ ОТКАЧКАХ, НАЛИВАХ И НАГНЕТАНИЯХ

Установившийся режим фильтрации

В случае достаточно длительной откачки можно считать, что имеет место квази-стационарный режим фильтрации.

В этом случае расход радиального потока вблизи скважины $q(r)$ во всех его сечениях одинаков, так как изменение расхода за счет снижения напора или уровня при квази-стационарном режиме фильтрации весьма мало. Имея в виду, что $q(r)=q=$

$=\text{const}$, для истинной скорости движения индикатора u можем написать

$$u = -n \frac{dr}{dt} = \frac{q}{2\pi mr}, \quad (34.1)$$

откуда

$$n = \frac{qt}{\pi (r_1^2 - r_0^2) m}, \quad (34.2)$$

где r_1 — расстояние загрузочной контрольной скважины от улавливающей центральной скважины;

t — время пробегания индикатора между этими скважинами;

m — мощность пласта;

r_0 — радиус центральной скважины.

Формула (34.2) не учитывает течения в водоносном пласте под влиянием естественного уклона J . С учетом этого течения будет

$$-n \frac{dr}{dt} = \frac{q}{2\pi mr} + kJ \cos \varphi, \quad (34.3)$$

откуда

$$n = \frac{kJt}{r_1 - r_0} A; \quad (34.4)$$

$$A = \frac{\cos \varphi}{1 - \alpha \frac{r_1}{r_1 - r_0} \ln \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + \frac{r_0}{r_1}} \right)}; \quad (34.5)$$

$$\alpha = \frac{q}{2\pi k m r_1 J \cos \varphi}, \quad (34.6)$$

где φ — угол между направлением движения индикатора и направлением естественного потока подземных вод.

При движении индикатора вверх по потоку $\varphi = \pi$ ($\cos \varphi = -1$), а вниз по потоку $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$).

Значения A при $\frac{r_0}{r_1} \leq 0,05$ приводятся в табл. 24.

При пользовании приведенными формулами должно соблюдаться условие квази-стационарности потока

$$\frac{r_1^2}{4at} \leq 0,15 \text{ или } t \geq 1,7 \frac{r_1^2}{a}, \quad (34.7)$$

где t — длительность откачки;

r_1 — расстояние загрузочной (контрольной) скважины от улавливающей (центральной);

a — пьезопроводность.

Величины $A(\alpha)$									
α	-100	-25	-10	-5	-2	-1,5	-1,1	-1	0
A	200	50	20	8,7	2,59	1,54	0,61	0	1
α	0,2	0,5	1,1	1,5	2	5	10	25	100
A	1,56	2,22	3,47	4,35	5,26	11,1	21,3	50	200

При $|\alpha| > 10$ будет $A \approx 2|\alpha|$.

Соблюдение условия (34.7) обеспечивает точность расчета до 10%.

Неустановившийся режим фильтрации

В случае откачки при неустановившемся режиме фильтрации ($\rho < 1,3$) понижение s , согласно предыдущему, будет

$$s = - \frac{q_0}{4\pi km} Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \quad (34.8)$$

где q_0 — интенсивность источника.

Из уравнения (34.8) истинная скорость фильтрации выразится так:

$$u = -n \frac{dr}{dt} = -k \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{q_0}{2\pi mr} e^{-\frac{r^2}{4at}}. \quad (34.9)$$

Расход потока q_r в любом цилиндрическом сечении радиусом r равен

$$q_r = -2\pi r m k \frac{\partial s}{\partial r} = q_0 e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad (34.10)$$

и, в частности, у входа воды в скважину ($r=r_0$)

$$q = q_0 e^{-\frac{r_0^2}{4at}}, \quad (34.11)$$

где q — расход скважины.

Подставляя отсюда значение q_0 в уравнение (34.9), имеем

$$n \frac{dr}{dt} = -\frac{q}{2\pi mr} e^{-\frac{r^2-r_0^2}{4at}}. \quad (34.12)$$

Примем приближенно, что ввиду малости $\frac{r_0^2}{4at}$ дебит скважины $q = \text{const}$ (хотя на самом деле постоянна интенсивность источника q_0 , а не дебит скважины q).

Тогда обыкновенное дифференциальное уравнение (34.12) имеет специальный интеграл:

$$r = \sqrt{r_1^2 - \gamma t}; \quad \left(\gamma = \frac{r_1^2 - r_0^2}{t_1} \right), \quad (34.13)$$

где r_1 — расстояние загрузочной (контрольной) скважины от улавливающей (центральной);

t_1 — время продвижения индикатора между этими скважинами.

В самом деле, подставляя формулу (34.13) в уравнение (34.12), получим

$$\frac{q}{\pi m n} = \gamma e^{-\frac{\gamma}{4a}}, \quad (34.14)$$

где γ — постоянная величина (параметр).

Эта формула впервые получена нами для случая инъекции жидкости в пористую среду [18].

Пользуясь полученными уравнениями, можно найти параметры k и n по двум опытам с индикатором при одной контрольной скважине. Пусть при дебитах центральной скважины q_1 и q_2 индикатор, введенный в контрольную скважину, был зарегистрирован в центральной скважине в моменты времени t_1 и t_2 ($q_2 > q_1$; $t_2 < t_1$). Тогда имеем:

$$\frac{q_1}{\pi m n} = \gamma_1 e^{-\frac{\gamma_1}{4a}}; \quad (34.15)$$

$$\frac{q_2}{\pi m n} = \gamma_2 e^{-\frac{\gamma_2}{4a}}, \quad (34.16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{r_1^2 - r_0^2}{t_1}; \\ \gamma_2 &= \frac{r_1^2 - r_0^2}{t_2}. \end{aligned} \right\} \quad (34.17)$$

Откуда получаем расчетные формулы для a и n :

$$a = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{4 \ln \frac{q_1 \gamma_2}{q_2 \gamma_1}} = \frac{(r_1^2 - r_0^2)(t_1 - t_2)}{4 t_1 t_2 \ln \frac{q_1 t_1}{q_2 t_2}}; \quad (34.18)$$

$$n = \frac{q_1}{\pi m \gamma_1} e^{\frac{\gamma_1}{4a}} = \frac{q_1 t_1}{\pi m (r_1^2 - r_0^2)} e^{\frac{r_1^2 - r_0^2}{4 a t_1}}. \quad (34.19)$$

При $a \gg \gamma_1$ можно допустить, что $\frac{\gamma_1}{4a} \approx 0$. Тогда формула (34.19)

совпадет с уравнением (34.2) для установившегося режима фильтрации.

Это и естественно, так как в случае $\frac{Y_1}{4a} = 0$ величина $a = \infty$, что соответствует жесткому (неупругому) режиму фильтрации, при котором стационарное состояние потока достигается сразу после начала откачки.

В случае нагнетаний и наливов при постоянном дебите скважины q расчетные формулы для определения n и a остаются теми же, что и в случае опытных откачек, но значения q и n в них следует принимать со знаком минус.

При опытах с индикаторами в безнапорном потоке во всех приведенных выше уравнениях мощность пласта m принимается равной

$$m = H - 0,5(s_0 + s_1), \quad (34.20)$$

где H — естественная глубина потока;
 s_0 и s_1 — понижения уровня воды (для откачек) или повышения его (для наливов и нагнетаний) в центральной и контрольной скважинах.

§ 35. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТОВ С ИНДИКАТОРАМИ

Определить a и n по данным опыта с индикатором при откачке из скважины в напорном пласте. Расчет производится по формулам § 34. Исходные данные: $q_1 = 850$ м³/сутки; $q_2 = 1700$ м³/сутки; $r_0 = 0,1$ м; $m = 5$ м; $r_1 = 6$ м; $t_1 = 0,1$ суток; $t_2 = 0,049$ суток; $\varphi = \pi$; $k = 15$ м/сутки, $J = 0,005$.

Установившийся режим фильтрации

Без учета естественного потока подземных вод ($J = 0$) активная пористость будет

$$n = \frac{q_1 t_1}{\pi (r_1^2 - r_0^2) m} = \frac{850 \cdot 0,1}{3,14 (6^2 - 0,1^2) 5} = 0,15;$$

$$n = \frac{q_2 t_2}{\pi (r_1^2 - r_0^2) m} = \frac{1700 \cdot 0,049}{3,14 (6^2 - 0,1^2) 5} = 0,147.$$

С учетом естественного потока величина n будет

$$\alpha = \frac{q_2}{2\pi k m r_1 J \cos \varphi} = \frac{1700}{2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 0,005 (-1)} = -120;$$

$$A_2 = \frac{\cos \varphi}{1 - \alpha_2 \frac{r_1}{r_1 - r_0} \ln \frac{a_2 + 1}{\alpha_2 + \frac{r_0}{r}}}$$

$$= \frac{-1}{1 - \left(-120 \frac{6}{6-0,1} \ln \frac{-120+1}{-120+0,02} \right)} = 227,8;$$

$$n = \frac{kJt_2}{r_1 - r_0} A_2 = \frac{15 \cdot 0,005 \cdot 0,049}{6 - 0,1} \cdot 227,8 = 0,142.$$

Таким образом, влияние естественной скорости потока оказалось незначительным.

Неустановившийся режим фильтрации

Без учета естественного потока имеем:

Параметры γ

$$\gamma_1 = \frac{r_1^2 - r_0^2}{t_1} = \frac{6^2 - 0,1^2}{0,1} = 360 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$\gamma_2 = \frac{r_1^2 - r_0^2}{t_2} = \frac{6^2 - 0,1^2}{0,049} = 734 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

коэффициент пьезопроводности

$$a = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{4 \ln \frac{\gamma_2 q_1}{\gamma_1 q_2}} = \frac{734 - 360}{4 \ln \frac{734 \cdot 350}{360 \cdot 1700}} = 4869 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

активная пористость

$$n = \frac{q_1}{\pi t \gamma_1} e^{\frac{\gamma_1}{4a}} = \frac{850}{3,14 \cdot 5 \cdot 360} e^{\frac{360}{4 \cdot 4869}} = 0,153.$$

Таким образом, величины пористости n , найденные различными способами, оказались весьма близкими друг к другу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К. и Бабушкин В. Д., Методы расчета притока воды к буровым скважинам, Стройиздат, 1955.
2. Апельцин И. Э., Влияние трещиноватости на закачку воды в пласт. «Нефтяное хозяйство» № 12, 1954.
3. Аравин В. И. и Нумеров С. Н., Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде, Госстройиздат, 1953.
4. Бабушкин В. Д. и Раевский С. П., Определение фильтрационной анизотропии водоносных пород опытной откачкой. «Разведка и охрана недр» № 1, стр. 49—54, 1957.
5. Бабушкин В. Д., Указания по определению коэффициента фильтрации при опытных откачках из несовершенных скважин, Изд. ВНИИ Водгео, 1950.
6. Бабушкин В. Д., Определение водопроницаемости горных пород под руслом рек. «Разведка и охрана недр» № 4, стр. 45—58, 1954.
7. Бабушкин В. Д. и Биндеман Н. Н., Инструкция по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытных откачек из скважин. И 28—58, Госэнергоиздат, 1953.
8. Баренблатт Г. И., Шестаков В. М., Определение коэффициента фильтрации и активной пористости по данным наливов в сухой грунт, подстилаемый горизонтальным водоупором. «Разведка и охрана недр» № 8, 1956.
9. Биндеман Н. Н., Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливками и нагнетаниями, Углетехиздат, М., 1951.
10. Биндеман Н. Н., Приближенное определение коэффициента водопроницаемости методом искусственной инфильтрации из шурфов. Инструкция по полевым гидрогеологическим работам, Гидротехиздат, вып. 5, 1932.
11. Биндеман Н. Н., Определение коэффициента фильтрации горных пород методом инфильтрации из шурфов, Госэнергоиздат, 1947.
12. Болдырев А. К., Опыт над фильтрацией в горных породах «in situ» в связи с проектом водохранилища на р. Чу в Туркестане. Геологический комитет. Материалы по общей и прикладной геологии, вып. 7, 1926.
13. Бурлай М. Ф., Приближенный способ определения частной водопроницаемости горных пород по методу многократных откачек. Труды Одесского Гидрометеорологического ин-та, вып. 12, Одесса, 1958, стр. 273—285.
14. Веригин Н. Н., Метод расчета осушения строительных котлованов с помощью несовершенных скважин. Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959; Тезисы докладов совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Изд. Водгео, 1957.
15. Веригин Н. Н., Об оценке производительности водозаборных скважин с учетом снижения динамических уровней при эксплуатации. «Водоснабжение и санитарная техника» № 5, 1957.
16. Веригин Н. Н., Инструкция по опытным откачкам, Гидропроект, 1945.
17. Веригин Н. Н., Оценка водопроницаемости пород посредством микроналивов. «Разведка недр» № 2, 1947.
18. Веригин Н. Н., Нагнетание вяжущих растворов в горные породы «Известия ОН АН СССР» № 11, 1952.
19. Веригин Н. Н., Об определении водопроницаемости грунтов в полевых условиях. «Разведка недр» № 12, 1938.
20. Веригин Н. Н., Контрольные задания и методические указания по курсу «Гидрогеология» (часть II — Динамика подземных вод), Изд. Всесоюзного заочного политехнического ин-та, 1955.
21. Веригин Н. Н., Оценка производительности взаимодействующих водозаборных скважин. «Водоснабжение и санитарная техника» № 2, 1958.

22. Гаврилко В. М., Абрамов С. К., Фильтры буровых скважин, Гос. изд. литературы по строительству и архитектуре, М., 1954.
23. Гатальский, Методика определения дебита, величины поглощения и статического уровня водоносных зон и горизонтов, опробованных суммарно. «Разведка недр» № 10, 1938.
24. Гиринский Н. К., Определение коэффициента фильтрации по данным опытного водоснабжения. «Разведка недр» № 5, 1952.
25. Гиринский Н. К., Подсчет коэффициента водоотдачи по данным опытных водопонижений и мощных кустовых откачек. «Разведка и охрана недр» № 1, 1956.
26. Гиринский Н. К., Определение коэффициента фильтрации песков и супесей по данным налива в шурфы. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Всегингео, Госгеолиздат, 1953.
27. Говорова Г. Л. и АLEXIN И. Д., Об обработке результатов исследования нефтяных скважин на приток. «Нефтяное хозяйство» № 5, 1954.
28. Григорьев В. М., Определение коэффициента фильтрации верхнего слоя двухслойной среды по данным откачек. «Гидротехника и мелиорация» № 10, 1951.
29. Денисов Н. Я., К методике определения водопроницаемости неводоносных грунтов путем инфильтрации из шурфов, 1936.
30. Dobrzański Z., Polowe metody oznaczania uśrednionego przepuszczalności wód w wodonośnych gruntach Warszawa. Wydawn. Geob., str. 78, 1956.
31. Dupuit J., Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux douces les saumures deconverte et à travers les terrains perméables, Paris, 1863.
32. Добровольский К. И., Теоретические обоснования полевых методов исследования грунтов на водопроницаемость, Тифлис, 1932.
33. Жданов В., Каталог-справочник по насосам, Углетехиздат, 1949.
34. Каменский Г. Н., Инструкция по исследованиям водопроницаемости горных пород методом опытных нагнетаний, Геолиздат, 1946.
35. Керкис Е. Е., Определение коэффициента фильтрации горных пород комбинированным методом откачки-нагнетания. Советская геология, 1956.
36. Керкис Е. Е., Определение радиуса влияния при расчете водопритоков, Углетехиздат, 1956.
37. Kirkham Symposium on permeability of soils, 1955.
38. Климентов П. П., Определение коэффициента фильтрации по данным откачки из одиночной скважины на одну ступень понижения уровня. «Разведка и охрана недр» № 3, 1950.
39. Коль С. А., Определение скоростей фильтрации подруслового потока. Труды Государственного гидрологического института, вып. 8 (62), 1948.
40. Кочерин Д. И., Определение расхода свободных грунтовых вод. Материалы по водным изысканиям в Крыму. Гидрометеорологическое отд., вып. 1, 1916.
41. Kozeny Ueber, Grundwasserbewegung, Wasser-Kraft und Wasserwirtschaft, 1927.
42. Краснопольский А. А., Грунтовые и артезианские колодцы. СПб, 1912.
43. Кулибаба Ф. В., Исследование водопроницаемости скальных пород штанговым тампоном. «Разведка недр» № 4, 1951.
44. Лебедев А. В., К вопросу определения водопроницаемости неводоносных грунтов путем инфильтрации из скважин. «Гидротехническое строительство» № 5, 1949.
45. Маскет М., Течение однородных жидкостей в пористой среде, Госгиптехиздат, М.—Л., 1949.
46. Минц Д. М., Некоторые вопросы теории фильтрации однородных жидкостей и суспензий и их практические приложения в области очистки воды. Докторская диссертация, 1953.
47. Назаров С. Н., Методика определения проницаемости нефтяных коллекторов. «Нефтяное хозяйство» № 1, 1955.
48. Насберг В. М., Обобщенная формула для фильтрационного расчета безнапорной совершенной скважины. «Известия ТНИСГЭИ» № 7, 1954.

49. Николаевский В. Н., О расчете дополнительного фильтрационного сопротивления скважин, несовершенных по степени вскрытия, Известия Академии наук, ОТН № 8, 1957.

50. Павлов А. Н., Новый способ расчета при определении коэффициента фильтрации горных пород методом инфильтрации из шурфов. Записки Ленинградского горного ин-та, т. 34, вып. 2, 1958.

51. Петухин Б. И., К вопросу об определении направления скорости движения подземных вод и коэффициента фильтрации горных пород геофизическими методами. Сборник научн. раб. Казахского горнометаллургического ин-та № 14. Металлургиздат, М., 1956.

52. Победоносцев Н. М., «Ирригация и гидротехника», Ташкент.

53. Плотников Н. А., Новый метод определения коэффициента водоотдачи водоносных пород способом откачки. «Гидротехника и Мелиорация» № 2, 1955.

54. Полубаринова-Кочина П. Я., Теория движения грунтовых вод, ГИТТЛ, 1952.

55. Рубинштейн Л. И., О решении задачи Н. Н. Веригина. ДАН СССР, т. 113, вып. 1, 1957.

56. Рубинштейн Л. И., Об одном случае фильтрации двух малосжимаемых жидкостей через деформируемую среду. «Известия высших учебных заведений» № 1 (8), 1959.

57. Силин-Бекчурин А. И., Динамика подземных вод, Изд. МГУ, 1958.

58. Скабалланович И. А., Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод, Углетехиздат, 1954.

59. Симонов Е. В., Новое оборудование для опытных наливов в зоне аэрации. В кн. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии (сборник статей), М., Госгеоллиздат, 1953.

60. Справочник по бурению скважин на воду, Гостоптехиздат, 1956.

61. Терлецкая М. Н., Определение водопроницаемости неводоносного грунта. «Гидротехническое строительство» № 2, 1954.

62. Theis C. V., The Relation between the Zomering of the Piezometric, surface and the Rate and Duration of Deccharge of well Wing ground—water Storage Trans. Am. Geophysical Union, 1935, pp. 519—524

63. Theim A., Journal f. Gazbeleuchtung u. Wasserversoryng, Ss. 81, 156, 596—1880.

64. Федин Н. Ф., Определение коэффициента водоотдачи по данным опытной откачки. «Вестник Академии наук Каз. ССР» № 12, 1953.

65. Форхгеймер Ф., Гидравлика. Объединенное техническое изд-во, 1935.

66. Хейн А. Л., Теоретические основы и методика определения параметров пластов по данным испытания несовершенных скважин при неустановившемся режиме фильтрации жидкости и газа. Труды Всесоюзного научно-исследовательского ин-та нефти, 1953, 1957.

67. Чарный И. А., Определение некоторых параметров пластов при помощи наблюдения за восстановлением забойного давления. «Нефтяное хозяйство» № 3, 1955.

68. Чарный И. А., Основы подземной гидравлики, Гостоптехиздат, 1956.

69. Шестаков В. М., Определение коэффициентов фильтрации анизотропных пластов по данным опытных откачек. «Разведка и охрана недр» № 1—6, 1955.

70. Щелкачев В. Н., Подземная гидравлика, 1952.

71. Щелкачев В. Н. и Назаров С. Н., Учет влияния гидродинамического несовершенства скважин в условиях упругого режима. «Нефтяное хозяйство» № 5, 1954.

72. GILG B; CAVARD M., Calcul de permeabilitepar des essais d'eau dans less sondages en allavions — Bulletin Technique de la Suisse. Romande, 1957, N 4, p. 45—50.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава первая

Общая характеристика методов оценки фильтрационных параметров горных пород

§ 1. Обзор методов определения фильтрационных характеристик пород	5
§ 2. Расчетные схемы полевых опытов для определения фильтрационных характеристик пород	12

Глава вторая

Опытные откачки из скважин

§ 3. Классификация опытных откачек, условия применения различных способов расчета параметров и некоторые методические указания	17
§ 4. Конструкция установки для опытных откачек из скважин	23
§ 5. Откачки в пластах ограниченной мощности (установившийся режим фильтрации)	48
§ 6. Откачки в пластах ограниченной мощности (неустановившийся режим фильтрации)	52
§ 7. Откачки в пластах неограниченной мощности (установившийся режим фильтрации)	73
§ 8. Откачки в пластах неограниченной мощности (неустановившийся режим фильтрации)	76
§ 9. Примеры расчета параметров по результатам откачек	82

Глава третья

Опытные нагнетания

§ 10. Классификация опытных нагнетаний и их расчетные схемы	87
§ 11. Конструкция опытной установки и ее основные элементы	90
§ 12. Нагнетания при ограниченной мощности пласта (совершенные скважины)	99
§ 13. Примеры определения параметров по данным нагнетаний в совершенные скважины	104
§ 14. Нагнетания при неограниченной мощности пласта (несовершенные скважины)	106
§ 15. Примеры определения параметров по данным нагнетания в несовершенные скважины	115

Глава четвертая

Опытные наливывы в скважины

§ 16. Классификация наливывов в скважины и их расчетные схемы	118
§ 17. Опытные наливывы в скважины в изотропных породах	119

§ 18. Опытные наливы в скважины в анизотропных породах	122
§ 19. Примеры расчета параметров по данным наливов	127

Глава пятая

Опытные наливы в шурфы

§ 20. Общие сведения	129
§ 21. Наливы в шурфы при постоянном расходе	132
§ 22. Наливы в шурфы при постоянном напоре	133
§ 23. Наливы воды в шурфы при свободном понижении уровня воды после налива	136
§ 24. Наливы в шурфы по методу Н. К. Гиринского	138
§ 25. Примеры определения фильтрационных характеристик грунтов по данным наливов в шурфы	140

Глава шестая

Определение параметров горных пород при нелинейном законе фильтрации

§ 26. Общие сведения	144
§ 27. Определение параметров нелинейной фильтрации по одной наблюдательной скважине	146
§ 28. Определение параметров нелинейной фильтрации по двум наблюдательным скважинам	147
§ 29. Примеры расчета параметров нелинейной фильтрации	149

Глава седьмая

Скоростные методы оценки фильтрационных характеристик пород («экспресс-методы»)

§ 30. Оценка фильтрационных характеристик водоносных пород по результатам наблюдений за восстановлением уровня после кратковременных откачек из скважин	152
§ 31. Оценка фильтрационных характеристик неводоносных пород по результатам кратковременных наливов воды в скважины	158
§ 32. Примеры оценки параметров по данным наблюдений за восстановлением уровня в скважинах и по данным кратковременных наливов	163

Глава восьмая

Опыты по определению скорости движения индикаторов в потоке подземных вод

§ 33. Опыты с индикаторами в естественном потоке подземных вод	167
§ 34. Опыты с индикаторами при откачках, наливах и нагнетаниях	170
§ 35. Примеры расчета параметров по результатам опытов с индикаторами	174
Литература	176
Содержание	179

О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
89	13-я сверху	(h)	$(l + 2R_0)$
112	5-я сверху	$1 + \gamma - e^{\frac{v(R_1)}{\alpha}} + \gamma$	$1 + \gamma - e^{\frac{v(R_1)}{\alpha}}$
162	5-я сверху	$\frac{t_1}{r_2}$	$\frac{t_1}{t_2}$
174	9-я сверху	q и n	γ_1, γ_2 и n