

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

А.Ф. ТЕРНОВ

ГИДРАВЛИКА ГРУНТОВЫХ ВОД

Учебное пособие

Томск
Издательство ТГАСУ
2010

УДК 532.542/.543:556.31(075.8)
Т 35

Тернов, А.Ф. Гидравлика грунтовых вод [Текст] : учеб. пособие / А.Ф. Тернов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – 63 с. – ISBN 978-5-93057-380-0.

В настоящем пособии рассмотрены ламинарное и турбулентное движения грунтовых вод. Главное внимание уделено расчету ламинарной фильтрации и притоку воды к водосборным галереям, водозаборным скважинам и шахтным колодцам.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования направления 653500 «Строительство».

Предназначено для студентов специальности 270112 «Водоснабжение и водоотведение» всех форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Рецензенты: д.г.-м.н., профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии НИУ ТПУ **Е.М. Дутова**; к.г.н., доцент кафедры гидрологии НИУ ТГУ **А.В. Мезенцев**; к.т.н., доцент кафедры водоснабжения и водоотведения ТГАСУ **В.К. Махлаёв**.

ISBN 978-5-93057-380-0

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2010
© А.Ф. Тернов, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
1. Плавноизменяющееся установившееся безнапорное движение грунтовых вод	6
1.1. Общие сведения о фильтрации	6
1.2. Скорость фильтрации. Основной закон ламинарной фильтрации (закон Дарси)	9
1.3. Методы определения коэффициента фильтрации	12
1.4. Дифференциальное уравнение плавноизменяющегося установившегося безнапорного движения грунтовых вод при горизонтальном водоупоре	15
1.5. Интегрирование дифференциального уравнения плавноизменяющегося безнапорного движения грунтовых вод (для плоской задачи) при горизонтальном водоупоре	19
1.6. Приток воды к водозаборным сооружениям	23
1.6.1. Водосборная галерея (или дрена), расположенная на водоупоре	23
1.6.2. Водосборная галерея, расположенная выше водоупора	24
1.6.3. Одиночная водозаборная совершенная скважина при безнапорной фильтрации	28
1.6.4. Приток грунтовых вод к шахтному колодцу	35
1.7. Совершенная поглощающая скважина	37
2. Фильтрация воды через однородную земляную плотину	39
2.1. Общий вид фильтрационного потока в теле плотины, расположенной на водонепроницаемом основании	39
2.2. Фильтрационный расчет однородной земляной плотины на водонепроницаемом основании	42
3. Замечания о турбулентной фильтрации, отвечающей квадратичной области сопротивления	50
Заключение	53
Рекомендуемая литература	54
Приложение. Задание на контрольную работу	55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов специальности 270112 «Водоснабжение и водоотведение», изучающих дисциплину «Гидравлика безнапорных потоков и грунтовых вод». Эта дисциплина является продолжением курса общей гидравлики.

При написании пособия был использован многолетний опыт работы научно-педагогической школы Санкт-Петербургского государственного университета и 55-летний опыт преподавания гидравлики автором в Томском политехническом университете и Томском государственном архитектурно-строительном университете.

В результате изучения гидравлики грунтовых вод студенты должны усвоить законы ламинарной и турбулентной фильтрации грунтовых вод; научиться делать расчеты притока воды к водосборным галереям, водозаборным скважинам и шахтным колодцам, а также фильтрации через земляные плотины.

Кроме теоретического материала и пояснений к решению типовых задач с отдельными примерами, в учебном пособии приводятся вопросы для самоконтроля, задание на контрольную работу и необходимый справочный материал. Это позволит студентам, в особенности заочной формы обучения, успешно справиться с выполнением контрольной работы, предусмотренной рабочей программой дисциплины, и более глубоко усвоить теоретический материал курса.

Знания, приобретенные при изучении гидравлики грунтовых вод, будут востребованы при изучении водозаборных сооружений из подземных источников, а также гидрологии, гидрометрии и гидротехнических сооружений.

В связи с вышеперечисленным следует отметить огромную ответственность, лежащую на студента при изучении гидравлики грунтовых вод.

ВВЕДЕНИЕ

В гидравлике грунтовых вод изучаются законы движения грунтовых вод и методы применения этих законов для решения конкретных практических задач.

Основы учения о движении грунтовых вод были разработаны в XVIII–XIX веках учеными французской гидравлической школы Дарси, Дюпюи, Буссинеском.

Большой вклад в развитие гидравлики грунтовых вод внёс наш соотечественник академик Н.Н. Павловский (1886–1937). В 1922 г. им были опубликованы основы математической теории фильтрации воды в грунтах и предложен метод электро моделирования фильтрационных потоков (метод ЭГДА).

Для успешного изучения гидравлики грунтовых вод потребуются знания по высшей математике (прежде всего дифференциального и интегрального исчисления), физике, теоретической механике и общей гидравлике.

При изучении гидравлики грунтовых вод необходимо прежде всего усвоить физическую сущность гидравлических явлений, а также методы расчета конкретных задач. После этого можно будет приступить к выполнению контрольной работы.

1. Плавновозрастающее установившееся безнапорное движение грунтовых вод

1.1. Общие сведения о фильтрации

Грунтовыми водами называются воды первого от поверхности постоянно действующего водоносного горизонта (пласта).

Явление движения воды в порах грунта называется *фильтрацией*.

Изучение фильтрации воды в грунтах и различных пористых материалах представляет большой практический интерес при решении многих инженерных задач в области водоснабжения, водоотведения и гидротехники. В водоснабжении фильтрационные расчеты применяются для определения притока воды к водозаборным сооружениям (водозаборным скважинам, шахтным колодцам, водосборным галереям, дренам и др.) и для нахождения их оптимальных размеров.

Вода в поры может попасть различными способами, например, в результате просачивания после дождя. На некоторой глубине такая вода может быть задержана слоем водонепроницаемого грунта (например, плотной глиной, скалой), называемым *водоупором*.

Фильтрационный поток со свободной поверхностью, в каждой точке которой давление равно атмосферному, называется *безнапорным* (рис. 1.1).

Движение грунтовых вод в песках и водопроницаемых глинистых грунтах является *ламинарным*.

Турбулентное движение грунтовых вод может получиться *только в крупнозернистых грунтах* (например, в гравии, гальке), а также в случае каменной наброски, трещиноватой скалы и т. п.

На рис. 1.1 представлен случай *равномерного* движения ($h_0 = \text{const}$). Однако обычно в практике встречаются случаи *неравномерного* движения (неправильная форма русла, уклон

водоупора, равный нулю, непрерывная откачка воды из траншей или скважин и т. п.). На рис. 1.2 приведены примеры неравномерного движения.

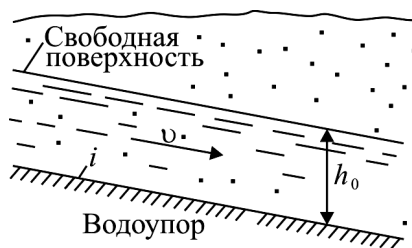


Рис. 1.1. Безнапорный фильтрационный поток:

i – уклон водоупора; v – средняя скорость; h_0 – нормальная глубина

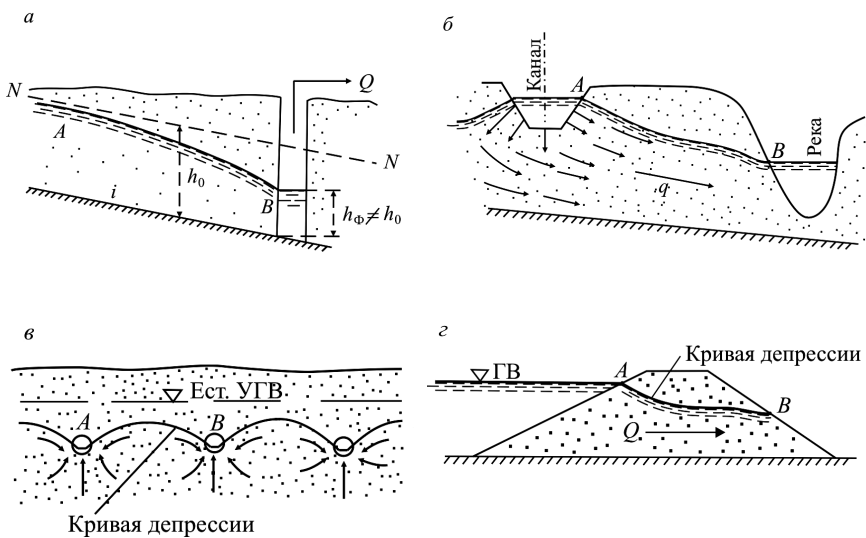


Рис. 1.2. Примеры неравномерного движения грунтовых вод:

h_ϕ – фиксированная глубина в траншее, отличная от глубины h_0 ;

∇ Ест. УГВ – отметка естественного уровня грунтовых вод;

∇ ГВ – отметка горизонта воды

На рис. 1.2, а показана траншея, из которой откачивается расход Q , величина которого определяется фильтрационным расчетом.

На рис. 1.2, б представлен случай фильтрации воды из канала в реку; здесь в результате фильтрационного расчета вычисляют потери воды из канала на фильтрацию.

На рис. 1.2, в приведена система дрен, в которые поступает вода. Здесь надо установить величину расхода, отводимого от дрен, и положение кривых депрессий AB .

На рис. 1.2, г изображена земляная плотина, через которую просачивается вода. При проектировании земляных плотин необходимо знать потери воды Q из водохранилища и положение кривой депрессии.

Свободная поверхность фильтрационного потока называется *депрессионной поверхностью*, кривая же свободной поверхности AB в плоскости чертежа – *кривой депрессии* (см. рис. 1.2).

Ниже будем рассматривать в основном так называемую *плоскую задачу*, при этом будем иметь в виду поток шириной 1 м, характеризуемый *удельным фильтрационным расходом* q ,

измеряемым в $\frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{м}}$ или в $\frac{\text{м}^3/\text{сут}}{\text{м}}$:

$$q = Q/B, \quad (1.1)$$

где B – ширина грунтового потока

При расчете ламинарного движения грунтовых вод величиной скоростного напора $v^2 / 2g$ пренебрегают ввиду малости скоростей движения (они бывают весьма малой величины порядка 0,01–0,000001 см/с) и считают, что полный напор H_E равен пьезометрическому напору H_P :

$$H_E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = H_P = z + \frac{p}{\gamma}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность воды, γ – удельный вес.

Вместо напорной линии $E-E$ рассматривают совпадающую с ней *пьезометрическую линию* $P-P$ и пользуются термином «*пьезометрическая линия*» (см. ниже п. 1.4).

Понятия гидравлического и пьезометрического уклонов здесь оказываются тождественными:

$$J_e = J_p. \quad (1.3)$$

Имея в виду такое положение, далее будем пользоваться вместо обозначений J_e, J_p, H_e, H_p только обозначениями J и H , причем J будем называть *пьезометрическим уклоном*, а H – просто *напором*.

1.2. Скорость фильтрации.

Основной закон ламинарной фильтрации (закон Дарси)

Площадь поперечного сечения фильтрационного потока ω будет складываться из площади сечения пор грунта $\omega_{\text{пор}}$ и площади сечения частиц грунта $\omega_{\text{част}}$, через которую вода не проходит:

$$\omega = \omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{част}}. \quad (1.4)$$

Средняя скорость движения воды в порах грунта

$$v_{\text{пор}} = \frac{Q}{\omega_{\text{пор}}}. \quad (1.5)$$

В практических расчетах удобнее иметь дело с условной скоростью, которая называется *скоростью фильтрации* и представляет собой отношение расхода ко всей площади сечения фильтрационного потока:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{\omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{част}}}. \quad (1.6)$$

Установим связь между скоростью $v_{\text{пор}}$ и скоростью фильтрации v . Для этого воспользуемся выражениями для *пористости* n (*объемной пористости*) и *просветности* n' (*площадной пористости*).

$$n = \frac{V_{\text{пор}}}{V}, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем пор в рассматриваемом объеме грунта; V – объем всего рассматриваемого грунта.

$$n' = \frac{\omega_{\text{пор}}}{\omega} = \frac{\omega_{\text{пор}}}{\omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{част}}}, \quad (1.8)$$

где обозначения прежние (см. начало данного подраздела).

В случае *однородного* грунта (по своему сложению)

$$n = n'. \quad (1.9)$$

Значения пористости сильно зависят от степени окатанности частиц грунта и от плотности их сложения. Для грунтов в естественных условиях значения пористости изменяются в небольших пределах [5] (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Значение пористости для различных грунтов

Грунт	Пористость, n
Гравий, песок	0,30...0,45
Супеси и суглинки	0,35...0,50
Глина	0,40...0,55

Разделив (1.6) на (1.5), получим:

$$\frac{v}{v_{\text{пор}}} = \frac{\omega_{\text{пор}}}{\omega} = n' = n \quad \text{для однородного грунта,} \quad (1.10)$$

откуда

$$v = n v_{\text{пор}}. \quad (1.11)$$

Так как $n < 1$, *скорость фильтрации v по величине всегда меньше скорости $v_{\text{пор}}$* .

На основании опытов по фильтрации воды в песках и водопроницаемых глинах ещё в середине XIX столетия было установлено, что скорость фильтрации v в случае ламинарного

движения может быть представлена следующей зависимостью, называемой законом Дарси и выражающей основной закон ламинарной фильтрации:

$$v = kJ, \quad (1.12)$$

где v – скорость фильтрации в данном сечении фильтрационного потока, м/с; J – пьезометрический уклон; k – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом фильтрации*, м/с.

Так как пьезометрический уклон J величина безразмерная, то *коэффициент фильтрации k численно равен скорости фильтрации при уклоне J равном единице: $J = 1$* . Величина k зависит от свойств грунта и от свойств воды, а также её температуры, поскольку с изменением температуры изменяется её вязкость.

Из формулы (1.12) видно, что *скорость фильтрации v прямо пропорциональна величине J в первой степени*.

Зная скорость фильтрации v , несложно подсчитать расход через поперечное сечение ω всего фильтрационного потока:

$$Q = \omega v = \omega kJ. \quad (1.13)$$

Зависимость (1.13) также называется *законом Дарси*.

Как показывают эксперименты, движение воды в грунте будет ламинарным, если число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd_s}{\nu} < Re_{кр} = 6, \quad (1.14)$$

где d_s – эквивалентный (эффективный) диаметр частиц грунта; ν – кинематический коэффициент вязкости.

За эффективный диаметр d_s одинаковых шарообразных частиц *фиктивного* грунта принимают такой диаметр, при котором гидравлическое сопротивление, оказываемое фиктивным грунтом, равно гидравлическому сопротивлению, оказываемому реальным грунтом из разнозернистого песка.

Эффективный диаметр d_s может быть определен с помощью кривой гранулометрического состава грунта (рис. 1.3).

На этой кривой обозначен эффективный диаметр $d_э = d_{10}$ частиц грунта, в котором содержится 10 % частиц (по массе) такого размера и меньше, и диаметр d_{60} частиц грунта, в котором содержится 60 % частиц такого диаметра и меньше. Рекомендация о равенстве $d_э = d_{10}$ справедлива при коэффициенте однородности $d_{60} / d_{10} \geq 5$. Есть и другие способы определения $d_э$.

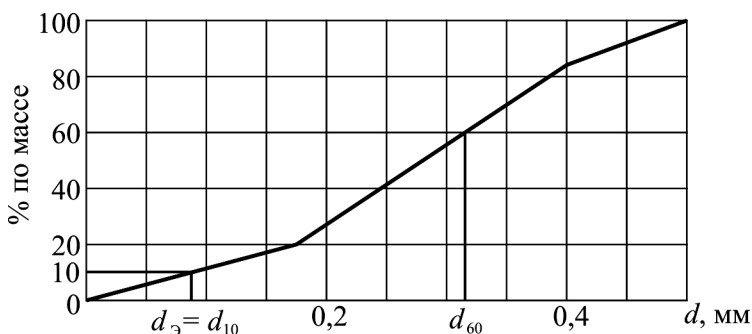


Рис. 1.3. Кривая гранулометрического состава грунта

Если Re будет больше критического $Re_{кр}$, то получим *турбулентную фильтрацию*, для которой формула Дарси (1.12) не приемлема.

1.3. Методы определения коэффициента фильтрации

Существует два основных метода определения коэффициента фильтрации, входящего в формулу Дарси.

Лабораторный метод. Коэффициент фильтрации k определяется в лаборатории на специальной установке, в которую закладывается образец испытуемого грунта. Схема этой установки приведена на рис. 1.4.

Установка представляет собой металлический цилиндр A с сеткой, на которую укладывается испытуемый грунт. Через этот грунт под соответствующим напором фильтруется вода (например, снизу вверх). В сечениях 1–1 и 2–2, находящихся на

расстоянии l друг от друга, к цилиндру A подключены пьезометры Π_1 и Π_2 , при помощи которых можно измерять напоры $H_1 = z_1 + p_1/\gamma$ и $H_2 = z_2 + p_2/\gamma$ в указанных двух сечениях. Вода, прошедшая через грунт, попадает в мерный сосуд B , с помощью которого определяется величина фильтрационного расхода Q :

$$Q = \frac{W_M}{t}, \quad (1.15)$$

где W_M – объем воды, поступившей в мерный сосуд за время t .

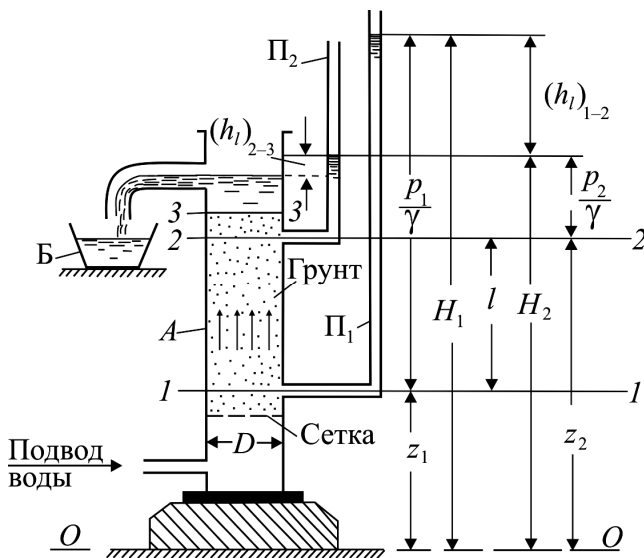


Рис. 1.4. Лабораторная установка для определения коэффициента фильтрации

Определив Q , из формулы Дарси (1.13) можно вычислить коэффициент фильтрации k :

$$k = \frac{Q}{\omega \cdot J}, \quad (1.16)$$

где ω – площадь сечения цилиндра, $\omega = \pi D^2/4$; J – пьезометрический уклон.

$$J = \frac{(h_l)_{1-2}}{l} = \frac{H_1 - H_2}{l}, \quad (1.17)$$

где $(h_l)_{1-2}$ – потеря напора по длине l фильтрационного потока от сечения 1–1 до сечения 2–2.

Полевой метод – метод пробных откачек. Этот метод позволяет измерить коэффициент фильтрации без нарушения структуры грунта, т. е. в месте его естественного залегания, но является весьма дорогостоящим и трудоемким. Он заключается в установлении связи между расходом воды, откачиваемой из скважины, и понижением уровня грунтовых вод вблизи скважины. Тогда из формулы для притока воды Q к скважине можно, зная Q , вычислить коэффициент фильтрации k . Эти формулы будут рассмотрены ниже.

Известны эмпирические формулы для определения коэффициента фильтрации k Е. Замарина, И. Заурбрея, А. Хазена и др. авторов. Они, как правило, основаны на лабораторных данных и дают значения k с грубым приближением, т. к. структура реального грунта не известна. Иногда вычисленные по экспериментальным формулам значения k используются для первоначальной оценки фильтрации.

Формулы И. Заурбрея и А. Хазена приведены в [1].

Величина k тем меньше, чем меньше размер частиц грунта.

В таблице 1.2. приведены округленные значения k .

Таблица 1.2

**Округленные значения коэффициента фильтрации k
для различных грунтов**

Грунт	k , м/сут по [6]
Глина	0
Суглинок тяжелый	0,05
Суглинок легкий	0,05...0,1
Супесь	0,1...0,5

Грунт	k , м/сут по [6]
Лесс	0,25...0,5
Песок пылеватый	0,5...1,0
Песок мелкозернистый	1...5
Песок среднезернистый	5...20
Песок крупнозернистый	20...50
Гравий	20...150
Галечник	100...500
Крупный галечник без песчаного заполнителя	500...1000 и более

1.4. Дифференциальное уравнение плавноизменяющегося установившегося безнапорного движения грунтовых вод при горизонтальном водоупоре

При исследовании неравномерного плавноизменяющегося движения грунтовых вод используется уравнение *Дюпюи*. Рассматривая, для простоты пояснения, только плоскую задачу, представим на рис. 1.5 «действительную» картину фильтрации. На этом рисунке штриховой линией показаны линии тока, пунктиром – несколько искривленные *действительные* поперечные сечения, ортогональные линиям тока. Это означает, что линии тока, пересекая выбранные поперечные сечения фильтрационного потока, направлены по нормальям к этим сечениям. Такие сечения в гидравлике обычно называются *живыми*. Ясно, что самой верхней линией тока будет кривая депрессии AB , самой нижней – линия водоупора $D-D$.

Как указывалось выше, напор в случае ламинарного движения грунтовых вод может быть записан в виде

$$H = z + \frac{p}{\gamma}.$$

рисунка, т. е. через точку пересечения линии равного напора $a-b$ с кривой депрессии. Это ясно из того, что для точки a напор $H = z$ (давление в точках кривой депрессии не учитываем, т. к. оно одинаково и равно $p_{\text{атм}}$).

Изучение плавноизменяющегося безнапорного движения грунтовых вод основано на двух положениях (допущениях):

а) поперечные сечения считаются плоскими, поскольку кривизна их невелика;

б) поперечные сечения считаются вертикальными, поскольку уклон i поверхности водоупора мал.

Принимая эти два допущения, вместо действительного фильтрационного потока (рис. 1.5) получаем *расчетную модель*, представленную на рис. 1.6. Эта модель характеризуется вертикальными плоскими поперечными сечениями фильтрационного потока; линии тока здесь несколько не ортогональны к этим живым сечениям, однако этой неувязкой мы пренебрегаем.

Рассматривая последнюю схему, намечаем два поперечных сечения: $a-b$ и $c-d$. Расстояние между этими сечениями, измеренное в направлении оси s , приблизительно всюду одинаково и равно ds ($ds_1 \approx ds_2 \approx \dots \approx ds$). Плоскость сравнения $O-O$ совместим с горизонтальной поверхностью водоупора. Тогда напор H_1 в сечении $a-b$ будет равен превышению отметки свободной поверхности грунтовых вод над водоупором: $H_1 = h_1$; соответственно для сечения $c-d$ будем иметь $H_2 = h_2$.

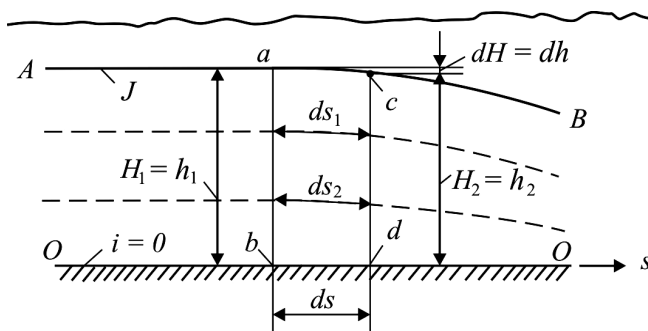


Рис. 1.6. Расчетная модель фильтрационного потока по Дюпюи ($i = 0$)

Потеря напора от сечения $a-b$ до сечения $c-d$ (на длине любого отрезка ds) запишется в виде

$$(h_l)_{1-2} = h_1 - h_2 = dh. \quad (1.19)$$

Для всех точек, намеченных на живом сечении $a-b$, потеря напора на соответствующей длине ds (всюду одинакового размера) будет одинаковой и равной $dh = h_1 - h_2$.

Из сказанного ясно, что для схемы на рис. 1.6 величина пьезометрического уклона во всех точках данного поперечного сечения (например, сечения $a-b$) одинакова и равна уклону свободной поверхности для выбранного поперечного сечения:

$$J = -\frac{dH}{ds} = \text{const}. \quad (1.20)$$

Знак минус соответствует понижению кривой свободной поверхности AB . Учитывая это положение, закон Дарси для данного сечения можно представить в виде

$$v = kJ = -k \frac{dh}{ds} = \text{const}, \quad (1.21)$$

где h – превышение отметки свободной поверхности грунтового потока над водопором (мощность водоносного пласта).

Уравнение (1.21) и называется *уравнением Дюпюи*.

Сущность уравнения Дюпюи можно выразить так: скорость фильтрации v в данном плоском вертикальном живом сечении равна уклону свободной поверхности в этом сечении, умноженному на коэффициент фильтрации.

Тогда искомое дифференциальное уравнение для удельного расхода примет вид

$$q = -k(h \cdot 1) \frac{dh}{ds} = -kh \frac{dh}{ds}, \quad (1.22)$$

где $(h \cdot 1)$ – сечение грунтового потока шириной 1 м.

1.5. Интегрирование дифференциального уравнения плавноизменяющегося безнапорного движения грунтовых вод (для плоской задачи) при горизонтальном водоупоре

Разделив переменные, перепишем уравнение (1.22) в виде

$$\frac{q}{k} ds = -h dh. \quad (1.23)$$

Проинтегрировав это уравнение от сечения 2–2 до сечения 1–1 (рис. 1.7), получим:

$$\frac{q}{k}(s_2 - s_1) = \frac{1}{2}(h_1^2 - h_2^2), \quad (1.24)$$

откуда

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l}, \quad (1.25)$$

где $l = (s_2 - s_1)$ – длина рассматриваемого участка, м; k – коэффициент фильтрации, м/с или м/сут.

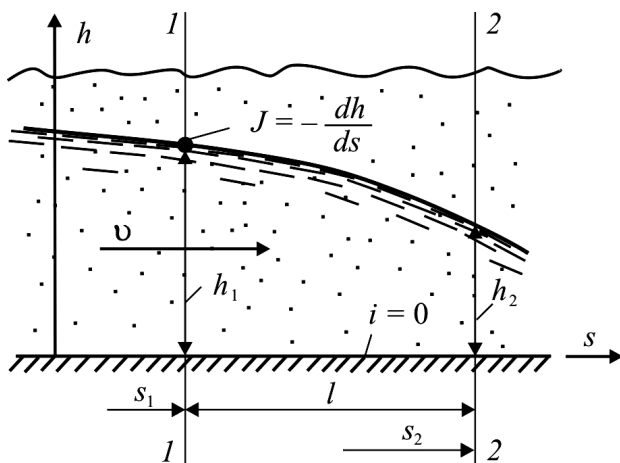


Рис. 1.7. К интегрированию дифференциального уравнения неравномерного движения ($i = 0$)

Уравнение (1.25) также часто называют уравнением Дюпюи. По этому уравнению можно построить кривую свободной поверхности грунтового потока.

Для построения кривой свободной поверхности грунтового потока необходимо иметь данные о превышении свободной поверхности h_1 и h_2 над водоупором в скважинах 1 и 2, расположенных в начале и в конце рассматриваемого участка (рис. 1.8).

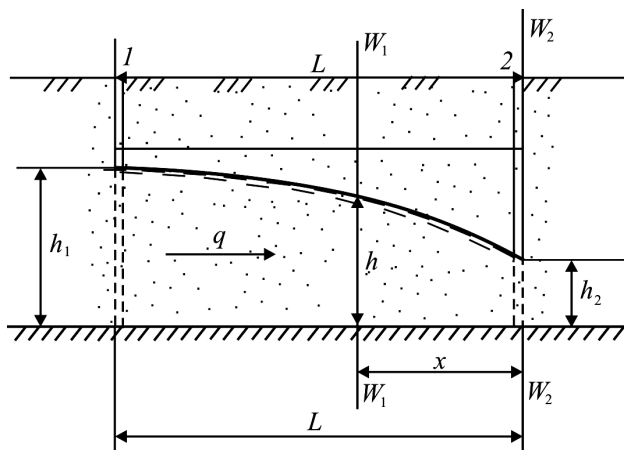


Рис. 1.8. К построению кривой свободной поверхности грунтового потока (кривой депрессии)

Согласно уравнению Дюпюи (1.25) имеем:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l}.$$

Для участка потока длиной x можно записать:

$$q_x = k \frac{h^2 - h_2^2}{2x}. \quad (1.26)$$

Так как поток не имеет питания по пути своего движения, то его расход во всех сечениях является неизменным:

$$q_x = q. \quad (1.27)$$

Приравняв правые части уравнений (1.25) и (1.26), получим:

$$h = \sqrt{h_2^2 + \left(h_1^2 - h_2^2\right) \frac{x}{l}}. \quad (1.28)$$

Величина h может быть определена и из уравнения (1.26), имея в виду что $q = q_x$:

$$h = \sqrt{h_2^2 + \frac{q}{k} 2x}. \quad (1.29)$$

Задавая значения x , по уравнению (1.28) или (1.29) вычисляют соответствующие им величины h .

Пример 1.5.1. Основание водоносного пласта в створах, расстояние между которыми $l = 1000$ м, расположено на отметках $Z_1 = Z_2 = 10,3$ м (рис. 1.9). Уровни грунтовых вод в этих створах характеризуются отметками $Z_1' = 19,2$ м и $Z_2' = 15,6$ м. Определить расход воды q в песчаном крупнозернистом пласте единичной ширины.

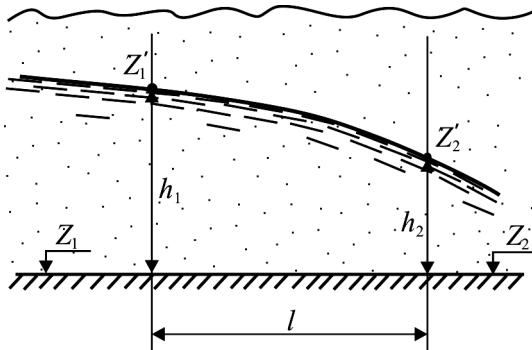


Рис. 1.9. К примеру 1.5.1

Решение: При нулевом уклоне основания водоносного пласта удельный расход определяем по формуле (1.25)

$$q = k \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2l}.$$

Коэффициент фильтрации k по табл. 1.2 примем равным 50 м/сут.

При $h_1 = Z'_1 - Z_1 = 19,2 - 10,3 = 8,9$ м и $h_1 = Z'_2 - Z_2 = 15,6 - 10,3 = 5,3$ м удельный фильтрационный расход составит величину

$$q = 50 \frac{8,9^2 - 5,3^2}{2 \cdot 1000} = 1,278 \frac{\text{м}^3/\text{сут}}{\text{м}} \approx 1,28 \frac{\text{м}^3/\text{сут}}{\text{м}}.$$

Ответ $q = 1,28 \frac{\text{м}^3/\text{сут}}{\text{м}}.$

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какие подземные воды относятся к грунтовым? Общие сведения о фильтрации.

2. В каком случае движение грунтовых вод является ламинарным? Критерий Рейнольдса.

3. Как определяется эффективный (эквивалентный) диаметр частицы d_s ?

4. Раскройте содержание понятия о скорости фильтрации v .

5. Раскройте содержание понятия об объемной пористости n и площадной пористости (просветности) n' .

6. Сформулируйте основной закон ламинарной фильтрации (закон Дарси для v).

7. Какие существуют методы определения коэффициента фильтрации?

8. Что представляет собой основное уравнение плавноизменяющегося установившегося безнапорного движения грунтовых вод (уравнение Дюпюи для v)?

9. Как определяется удельный расход q плавноизменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?

10. Как построить кривую депрессии плавноизменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?

1.6. Приток воды к водозаборным сооружениям

Для отбора подземных вод с целью водоснабжения применяются водозаборные скважины, шахтные колодцы, горизонтальные и комбинированные водозаборы, каптажи родников. Водозаборные скважины и шахтные колодцы, достигающие водоупора, называются в водоснабжении *совершенными*. Скважины и колодцы, вскрывающие водоносный пласт, но не доведенные до водоупора, считаются *несовершенными*.

Вскрываемые скважинами и колодцами водоносные пласты могут быть *безнапорными или напорными*.

Главной задачей при расчете водозаборных сооружений является определение притока к ним грунтовых и артезианских вод в зависимости от гидрогеологических условий. Устройство водозаборных сооружений для отбора подземных вод и их расчет подробно рассматривается в курсе «Водозаборные сооружения из подземных источников».

В настоящем пособии приведены зависимости для определения притока грунтовых вод к водосборным галереям, одиночным водозаборным скважинам и одиночным шахтным колодцам*.

1.6.1. Водосборная галерея (или дрена), расположенная на водоупоре

Для определения удельного расхода q_6 , поступающего в водосборную галерею, расположенную на водоупоре (рис. 1.10), с одной ее стороны (боковой приток) воспользуемся формулой Дюпюи (1.25), которую перепишем в виде

* В учебной литературе по гидравлике и водоснабжению нет единства в терминологии. Водозаборные скважины, например, называются колодцами (круглыми, трубчатыми). Скважины, забирающие воду из безнапорных пластов, некоторыми авторами называются грунтовыми, а из напорных – артезианскими.

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}, \quad (1.30)$$

где h_1 – мощность водоносного пласта; h_2 – глубина воды в галерее; L – так называемая *длина влияния галереи* (см. рис. 1.10).

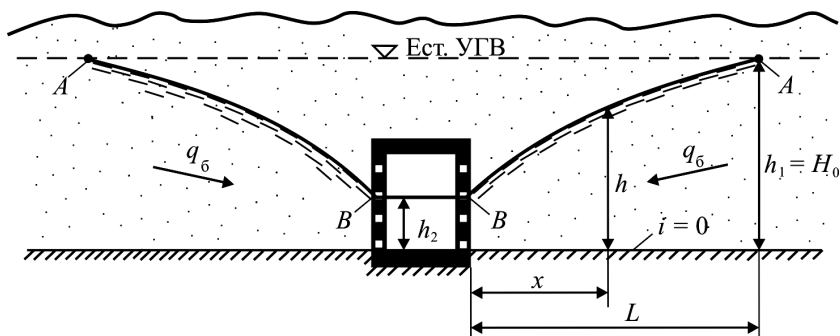


Рис. 1.10. Приток воды к галерее, расположенной на водоупоре:

Ест. УГВ – отметка естественного уровня грунтовых вод;

$h_1 = H_0$ – мощность водоносного пласта

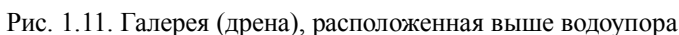
Очевидно, что на 1 м длины галереи с двух ее сторон будет поступать расход $q = 2q_6$. Зная q_6 , по уравнению (1.29) строят кривую депрессии AB . Эту кривую депрессии можно строить также по уравнению (1.28), не вычисляя q_6 .

1.6.2. Водосборная галерея, расположенная выше водоупора

Галерея, расположенная выше водоупора, называется *висячей*.

Гидравлическое решение вопроса о симметричном притоке воды к висячей галерее (дрене) было предложено Р.Р. Чугаевым. Это решение заключается в следующем.

Обозначим через M и N угловые точки галереи (рис. 1.11). Будем считать, что линии тока, выклинивающиеся в точках M и N , представляют собой горизонтальные прямые $M'-M$ и $N'-N$.



Рассматривая, например, левую часть симметричного потока, видим, что условная линия тока $M'-M$ разбивает эту часть на два фрагмента:

б) фрагмент B , обеспечивающий приток воды к галерее *через половину ширины ее дна*; величину этого притока обозначим через q_d .

$$q = 2(q_{\bar{6}} + q_{\partial}). \quad (1.31)$$

25

жем построить для этих же условий по зависимости (1.29) или (1.28), как в подразд. 1.5.

Что касается *донного* притока q_d , то величина его может быть найдена на основании особого гидромеханического решения задачи о фильтрации в области B . При выполнении такого решения считают, что в левой области B имеется напорный фильтрационный поток, ограниченный с боков водонепроницаемыми стенками $M'-M$ и $3-2-I$; входным и выходным живыми сечениями этого потока являются сечения $5-3$ и $M-I$; напор Z , под действием которого происходит фильтрация в рассматриваемой области, равен:

$$Z = h_1 - h_2. \quad (1.32)$$

Результаты упомянутого теоретического решения поясненной задачи были представлены Р.Р. Чугаевым в виде графика на рис. 1.12, по которому можно установить величину

$$q_r = \left(\frac{q_d}{kZ} \right)$$

в зависимости от коэффициентов α и β :

$$\alpha = \frac{L}{L + \frac{b}{2}}; \quad \beta = \frac{L}{T},$$

где L – длина влияния галереи; b – ширина галереи; T – расстояние от низа галереи до водоупора.

Зная же величину q_r , легко определить и значение q_d :

$$q_d = kZq_r. \quad (1.33)$$

Полный приток Q грунтовой воды к водосборной галерее длиной l составит:

$$Q = Q_6 + Q_d = 2q_6l + 2q_d l. \quad (1.34)$$

Полный приток воды ко дну может быть определен и по другим формулам, приведенным, например, в источнике [1].

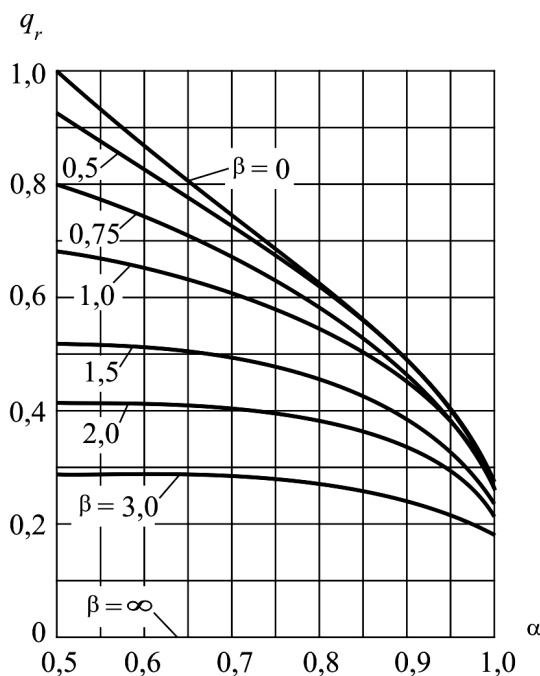


Рис. 1.12. График Р.Р. Чугаева для определения величины q_r

С. Аверьяновым предложена следующая теоретическая формула для определения полного притока воды ко дну висячей галереи, справедливая при $T \leq 0,5 L$, $T > 2b$:

$$Q_0 = \frac{2kS_0 T l}{L} \frac{1}{\left(1 + 0,637 \frac{T}{L}\right) \left(\ln \frac{1}{\sin \frac{\pi b}{2T}} \right)}, \quad (1.35)$$

где S_0 – понижение уровня воды в галерее (у Чугаева эта величина обозначена буквой Z); l – длина галереи; L – длина влияния галереи; T – расстояние от низа галереи до водоупора.

По Б. Ухину

$$Q_o = \frac{2kLS_0 \left(1 + \frac{\pi T}{25L}\right)}{\frac{L}{T} + \frac{\pi}{2} \lg \frac{2T}{b}}, \quad (1.36)$$

где b – ширина галереи.

Эта формула получена в результате исследования установившейся фильтрации к несовершенной галерее с использованием метода гидродинамических аналогий при граничных условиях $b \leq T \leq 100b$, $L \geq 2b$ и $T \leq 2,5L$.

1.6.3. Одиночная водозаборная совершенная скважина при безнапорной фильтрации

Совершенными скважинами в водоснабжении называются скважины, доходящие до водоупора, т. е. вскрывающие водоносный горизонт (пласт) на полную мощность. Будем полагать, что скважина контактирует всей боковой поверхностью с грунтом, и следовательно, стенки колодца полностью водопроницаемы.

На рис. 1.13 представлен разрез такой скважины вертикальной плоскостью, проходящей через её ось. На этом же рисунке показана половина плана скважины.

Поток сверху ограничен так называемой *депрессионной воронкой*, представляющей собой поверхность, получающуюся в результате вращения кривой депрессии AB относительно вертикальной оси колодца Oh .

Сечения данного потока представляют собой круглоцилиндрические поверхности, имеющие вертикальные образующие; осью этих цилиндрических поверхностей является ось скважины Oh ; каждое живое сечение характеризуется своим радиусом r , ось Oh показана на рисунке; здесь же дано одно сечение $n-n-n$ с глубиной h (на плане показана половина этого сечения).

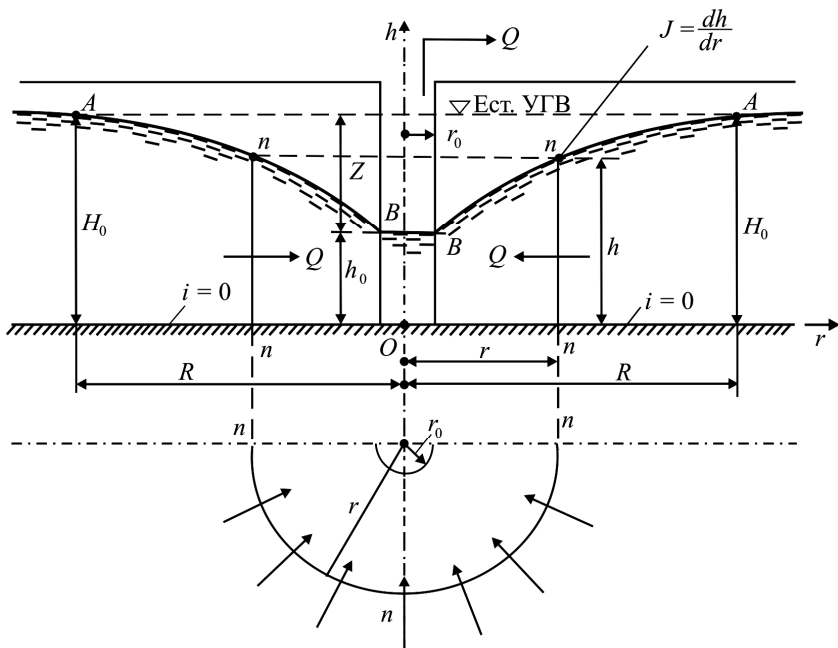


Рис. 1.13. Совершенная скважина при безнапорной фильтрации

Обозначим через r_0 радиус скважины и через R – радиус депрессионной воронки; на расстоянии R от оси скважины Oh отметка естественного уровня грунтовых вод практически не снижается. Глубину воды в этом месте обозначим через H_0 . Величина H_0 называется *мощностью водоносного пласта*^{*}.

Рассматривая описанное установившееся движение грунтовых вод, поставим цель найти фильтрационный расход Q (дебит скважины), отвечающий заданным глубинам H_0 и h_0 , а также уравнение кривой депрессии AB .

^{*} В литературе для обозначения мощности водоносного пласта вместо H_0 еще используется символ h_0 , а для обозначения глубины грунтовых вод в скважине – h_c . Заметим, что расход Q , отдаваемый скважиной, называется *дебитом* скважины.

Как видно, здесь имеем не плоскую задачу, которую рассматривали до сих пор, а так называемую *осесимметрическую задачу* движения грунтовых вод. Для решения ее возьмем некоторое произвольное полное живое сечение $n-n-n-n$, определяемое радиусом r (на плане показана половина этого сечения).

Расход воды для этого сечения

$$Q = \omega v, \quad (1.37)$$

где $\omega = 2\pi rh$, причем здесь через h обозначена глубина потока в данном круглоцилиндрическом сечении, имеющем площадь ω .

Скорость фильтрации

$$v = kJ, \quad (1.38)$$

где J – уклон кривой депрессии в данном сечении:

$$J = \frac{dh}{dr}. \quad (1.39)$$

Знак минус здесь опускаем, т. к. ось r направлена против течения.

Подставляя (1.39) в (1.38), получим:

$$v = k \frac{dh}{dr}. \quad (1.40)$$

Подставляя теперь в формулу (1.37) $\omega = 2\pi rh$ и выражение v из формулы (1.40), получим:

$$Q = 2\pi rhk \frac{dh}{dr}. \quad (1.41)$$

Разделив переменные, вместо (1.41) имеем:

$$\frac{Q}{k} \frac{1}{2\pi} \frac{dr}{r} = h dh. \quad (1.42)$$

Проинтегрируем это дифференциальное уравнение в пределах от $r = r_0$ до $r = R$ и от h_0 до H_0 :

$$\frac{Q}{k} \frac{1}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{1}{r} dr = \int_{h_0}^{H_0} h dh.$$

Получим:

$$\frac{Q}{k} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \frac{H_0^2 - h_0^2}{2}, \quad (1.43)$$

откуда

$$Q = \pi k \frac{H_0^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}}. \quad (1.44)$$

Переходя же к десятичным логарифмам, получим:

$$Q = 1,36k \frac{H_0^2 - h_0^2}{\lg \frac{R}{r_0}}. \quad (1.45)$$

Формула (1.44) может быть приведена к виду

$$Q = \frac{\pi k (2H_0 - S_0) S_0}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (1.46)$$

где $S_0 = H_0 - h_0$ – понижение уровня воды в скважине при откачке.

По одной из формул (1.44), (1.45) или (1.46) и находят дебит скважины.

Для построения кривой депрессии AB (см. рис. 1.13) перепишем формулу (1.44) в виде

$$Q = \pi k \frac{h^2 - h_0^2}{\ln \frac{r}{r_0}}, \quad (1.47)$$

где h – произвольная глубина потока; r – отвечающий ей радиус.

Решая эту зависимость относительно h , получим:

$$h = \sqrt{h_0^2 + \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_0}}. \quad (1.48)$$

Задаваясь в этой формуле разными значениями r , находим соответствующие им величины h ; в результате представляется возможным по вычисленным точкам построить кривую депрессии AB .

Подставляя в (1.48) величину Q из (1.44), получаем второе уравнение для построения кривой депрессии

$$h = \sqrt{h_0^2 + \frac{\ln \left(\frac{r}{r_0} \right)}{\ln \left(\frac{R}{r_0} \right)} (H_0^2 - h_0^2)}. \quad (1.49)$$

Как видно, для определения дебита скважины Q , а также для построения кривой депрессии AB необходимо знать величину R , т. е. так называемый *радиус влияния скважины*. Понятие радиуса влияния скважины R носит несколько условный характер: в точке A кривой депрессии (см. рис. 1.13) уклон свободной поверхности теоретически не может быть равен нулю, т. к. в этом случае пьезометрический уклон и скорость фильтрации $v = kJ$ оказываются равными нулю, и, следовательно, дебит скважины $Q = \omega v$ также станет равным нулю. Пренебрегая, однако, этим обстоятельством, величину R назначают иногда по данным практики – в зависимости от рода грунта; например, для мелкозернистого песка принимают $R = 100 \div 200$ м; для среднезернистого – $R = 250 \div 500$ м; для крупнозернистого песка – $R = 700 \div 1000$ м. В литературе также приводятся приближенные зависимости для определения R , в частности, радиус влияния скважины R может быть вычислен по формуле В. Зихарда

$$R = 3000S_0\sqrt{k}, \quad (1.50)$$

где S_0 – понижение уровня воды в скважине при откачке, м;
 k – коэффициент фильтрации, м/с, или по формуле Н. Кусакина

$$R = 2S_0\sqrt{kh_0}, \quad (1.51)$$

где k выражается в м/сут.

Более точное значение R может быть установлено на основании гидрогеологических изысканий.

Надо обратить внимание на то, что погрешность, получаемая при выборе величины R , мало влияет на окончательные результаты расчета, поскольку R в расчетных формулах входит под знак логарифма.

Как правило, водозаборные скважины оборудуются фильтрами. В этом случае в формулу притока воды к скважине вводится фильтрационное сопротивление C_ϕ .

Тогда формула (1.46) для скважины, вскрывающей безнапорный водоносный горизонт (пласт) на всю мощность, приобретает вид

$$Q = \frac{\pi k (2H_0 - S_0) S_0}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right) + C_\phi}, \quad (1.52)$$

где C_ϕ – фильтрационное сопротивление.

В практике водоснабжения и при водопонижении применяются обычно несколько скважин, располагающихся на некотором расстоянии друг от друга. Дебит каждой из этих скважин будет несколько меньше по сравнению с дебитом одиночной скважины.

Подробнее вопрос об этом и о фильтрационных сопротивлениях рассматривается в дисциплине «Водоснабжение из подземных источников». Там же изучается приток грунтовых вод к несовершенным скважинам.

Пример 1.6.1. Для целей водоснабжения пробурена скважина, доходящая до водоупора. Фильтр отсутствует. Коэффициент фильтрации среднезернистого песка $k = 10$ м/сут. Диаметр скважины $d_0 = 250$ мм, глубина откачки $S_0 = 5$ м. Радиус влияния скважины $R_0 = 800$ м. Мощность водоносного пласта $H_0 = 10$ м (см. рис. 1.13).

Требуется:

- 1) определить дебит скважины,
- 2) вычислить глубины грунтового потока h_1, h_2, h_3 соответственно на расстояниях $r_1 = 20$ м, $r_2 = 50$ м, $r_3 = 100$ м от оси скважины.

Решение. Определяем дебит скважины Q по формуле (1.44)

$$Q = \pi k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}.$$

Предварительно определим h_0 и r_0 :

$$h_0 = H_0 - S_0 = 10 - 5 = 5 \text{ м}, \quad r_0 = d_0/2 = 0,250/2 = 0,125 \text{ м}.$$

Тогда

$$Q = 3,14 \cdot 10 \frac{10^2 - 5^2}{\ln \frac{800}{0,125}} = 268 \text{ м}^3 / \text{сут}.$$

Глубины h_1, h_2, h_3 грунтового потока для заданных расстояний r_1, r_2, r_3 найдем из формулы (1.48)

$$h_1 = \sqrt{h_0^2 + \frac{Q \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{\pi k}} = \sqrt{5^2 + \frac{268 \ln\left(\frac{20}{0,125}\right)}{3,14 \cdot 10}} = 8,27 \text{ м};$$

$$h_2 = \sqrt{h_0^2 + \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right)}{\pi k}} = \sqrt{5^2 + \frac{268 \ln\left(\frac{50}{0,125}\right)}{3,14 \cdot 10}} = 8,73 \text{ м};$$

$$h_3 = \sqrt{h_0^2 + \frac{Q \ln\left(\frac{r_3}{r_0}\right)}{\pi k}} = \sqrt{5^2 + \frac{268 \ln\left(\frac{100}{0,125}\right)}{3,14 \cdot 10}} = 9,07 \text{ м.}$$

Ответ:

1) $Q = 268 \text{ м}^3/\text{сут.}$

2) $h_1 = 8,27 \text{ м, } h_2 = 8,73 \text{ м, } h_3 = 9,07 \text{ м.}$

По параметрам $h_0, r_0; h_1, r_1; h_2, r_2; h_3, r_3; H_0, R$ может быть построена кривая депрессии.

1.6.4. Приток грунтовых вод к шахтному колодцу

Шахтные колодцы являются одним из наиболее простых и распространенных водозаборных сооружений в водоснабжении населенных пунктов и отдельно расположенных объектов. Конструктивно они обычно представляют собой вертикальную шахтную выработку прямоугольного или круглого сечения диаметром до 3 м, чаще 1–2 м (рис. 1.14).

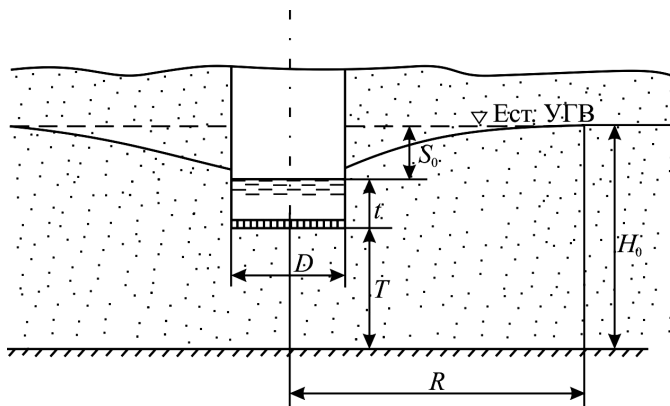


Рис. 1.14. Приток воды к шахтному колодцу

Шахтные колодцы следует применять, как правило, в первых от поверхности безнапорных маломощных водонос-

ных пластах, сложенных рыхлыми породами и залегающих на глубине до 30 м. При мощности водоносного пласта до 3 м следует предусматривать шахтные колодцы совершенного типа со вскрытием всей мощности водоносного пласта; при большей мощности пласта допускается устройство как совершенных, так и несовершенных колодцев со вскрытием части пласта.

По условиям забора воды из водоносного пласта шахтные колодцы подразделяют на работающие дном, стенками и работающие одновременно дном и стенками.

Для определения притока воды к шахтному колодцу только через дно применяется формула, предложенная В. Бабушкиным при безнапорной фильтрации для случая $(T/D) > 1$:

$$Q = \frac{2\pi k S_0 D}{\pi + \frac{D}{T} \left(1 + 0,51 \ln \frac{R}{4H_0} \right)}, \quad (1.53)$$

где S_0 – понижение уровня воды в скважине; T – расстояние от водоупора до дна колодца; D – диаметр колодца.

В случае $(R/H_0) < 10$ и $(D/T) \leq 0,1$ приток воды к колодцу рекомендуется вычислять по формуле Форгеймера:

$$Q = 2kS_0D. \quad (1.54)$$

При определении дебита Q совершенных шахтных колодцев, работающих только боковыми стенками, используют формулы (1.44), (1.45), (1.46).

Пример 1.6.2. Определить приток воды к шахтному колодцу диаметром $D = 2$ м. Фильтрационный поток воды осуществляется только *через дно колодца* (см. рис. 1.14). Глубина откачки $S_0 = 10$ м, расстояние от дна колодца до водоупора $T = 35$ м, коэффициент фильтрации грунта $k = 50$ м/сут, мощность водоносного пласта $H_0 = 56$ м, радиус влияния $R = 1000$ м.

Решение. Так как

$$(T/D) = (35/2) = 17,5 > 1,$$

приток грунтовой воды определяем по формуле В. Бабушкина (1.53).

$$Q = \frac{2\pi k S_0 D}{\pi + \frac{D}{T} \left(1 + 0,51 \ln \frac{R}{4H_0} \right)} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 2}{3,14 + \frac{2}{35} \left(1 + 0,51 \ln \frac{1000}{4 \cdot 56} \right)} = 1938 \text{ м}^3 / \text{сут.}$$

Ответ: $Q = 1938 \text{ м}^3 / \text{сут.}$

При наличии нескольких шахтных колодцев, располагающихся на некотором расстоянии друг от друга, дебит каждого из них будет меньше дебита одиночного колодца.

1.7. Совершенная поглощающая скважина

Здесь имеем случай, когда вода не откачивается из скважины, а наоборот, сбрасывается в скважину с поверхности земли (поглощающие скважины устраиваются, например, с целью осушения поверхности земли).

Течение грунтовых вод имеет такой же осесимметричный характер, как и рассмотренное в подразд. 1.6.3. Однако в отличие от этого случая здесь мы имеем движение грунтовых вод не по направлению к оси колодца, а в противоположную сторону (рис. 1.15).

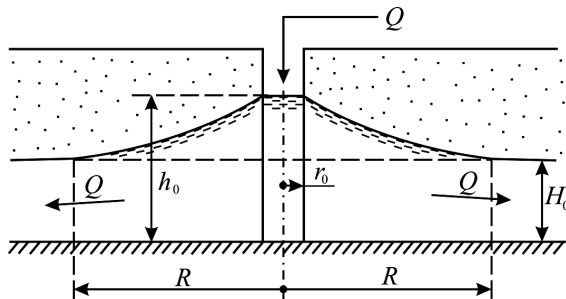


Рис. 1.15. Поглощающий колодец

Применяя тот же метод рассуждения, что и в подразд. 1.6.3, окончательно получаем:

$$Q = \pi k \frac{h_0^2 - H_0^2}{\ln \left(\frac{R}{r_0} \right)}. \quad (1.55)$$

Вопросы для самопроверки

1. Как подсчитывается приток грунтовых вод q к водосборной галерее, расположенной на водоупоре?
2. Из каких составляющих складывается приток грунтовых вод к висячей водосборной галерее?
3. Какие водозаборные скважины называются совершенными, а какие несовершенными?
4. Как определяется приток Q к одиночной совершенной скважине без фильтра при безнапорном потоке грунтовых вод?
5. Как построить кривую депрессии депрессионной воронки совершенной скважины при безнапорном потоке?
6. Как определяется приток Q к одиночной совершенной скважине, оборудованной фильтром, при безнапорном потоке грунтовых вод?
7. Что называется радиусом влияния скважины R ? Как он определяется?
8. Что представляет собой шахтный колодец? При какой мощности водоносного горизонта (пласта) шахтные колодцы вскрывают его полностью?
9. Как подсчитать приток воды к шахтному колодцу, поступающий только через его дно?
10. Как определяется расход Q , сбрасываемый в совершенную поглощающую скважину?

2. ФИЛЬТРАЦИЯ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ОДНОРОДНУЮ ЗЕМЛЯНУЮ ПЛОТИНУ

Рассмотрим плотину, образованную грунтом, однородным в отношении коэффициента фильтрации, т. е. такую плотину, во всех точках которой коэффициент фильтрации одинаков.

При этом будем иметь в виду плотину, расположенную на водонепроницаемом основании.

2.1. Общий вид фильтрационного потока в теле плотины, расположенной на водонепроницаемом основании

Если пренебречь капиллярным поднятием воды, которое имеет место в грунте, то картина фильтрации получает вид, представленный на рис. 2.1. Из этого рисунка видно, что область фильтрации получает форму фигуры $ABCDE$.

Можно различать пять участков границы этой области.

а) *Участок AB* . Во всех точках его напор H одинаков и равен H_1 . Отсюда заключаем, что AB является линией равного напора (относительно выбранной плоскости сравнения $O-O$).

б) *Участок DE* . Этот участок так же, как и AB , представляет собой линию равного напора ($H_2 = \text{const}$).

в) *Участок AE* (поверхность водоупора). Как известно, поверхность водоупора представляет собой самую нижнюю линию тока.

г) *Участок BC* (кривая депрессии). Кривая депрессии является линией равного давления (линией атмосферного давления); кроме того, как известно, кривая депрессии есть самая верхняя линия тока. Характерно для кривой депрессии то обстоятельство, что в любой ее точке

$$H = z, \tag{2.1}$$

где z – превышение рассматриваемой точки над плоскостью сравнения.

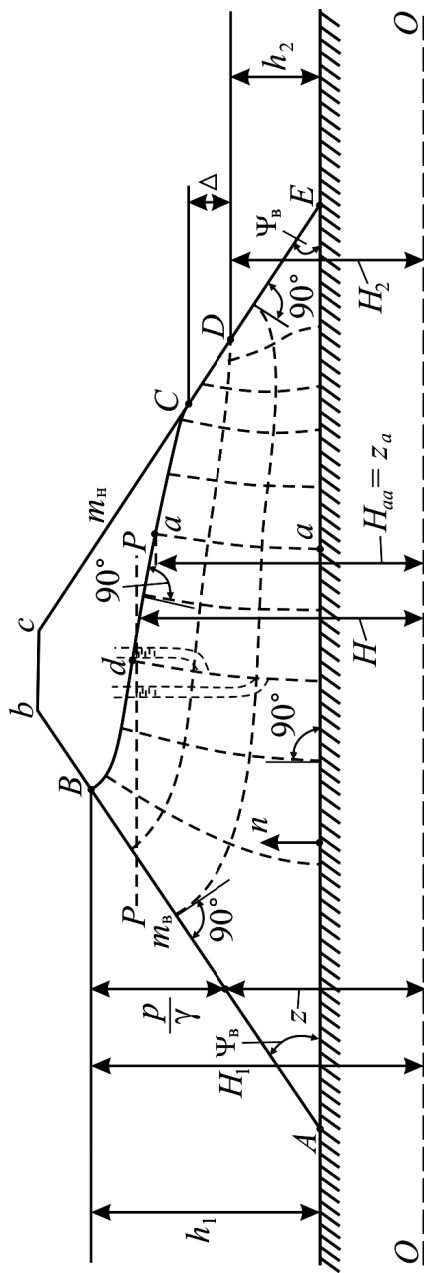


Рис. 2.1. Вид фильтрационного потока в теле земляной плотины на водонепроницаемом основании.

A и E — «особые точки» фильтрационного потока; m_b — коэффициент верхового откоса, $m_b = \text{ctg } \Psi_b$;
 m_h — коэффициент низового откоса, $m_h = \text{ctg } \Psi_h$

Надо запомнить, что в *любой точке кривой депрессии напор равен превышению этой точки над плоскостью сравнения* (атмосферное давление всюду не учитываем).

д) *Участок CD*. Он представляет собой промежуток высачивания воды непосредственно в атмосферу.

Этот участок так же, как и кривая депрессии, является линией атмосферного давления, в связи с чем к нему также относится соотношение (2.1). Однако данный участок не является линией тока; линии тока пересекают его под некоторым углом, не равным 90° .

В точке *C* линия откоса *CE* является касательной к кривой депрессии.

Пунктиром на чертеже показаны линии равного напора; штриховыми линиями – ортогональные им линии тока. Линии равного напора составляют прямой угол с поверхностью водопора *AE*. Здесь исключением являются только так называемые особые точки *A* и *E*. Линии равного напора являются также ортогональными к кривой депрессии *BC*. В связи со сказанным, каждая точка линий *AE* и *BC* за исключением точек *A* и *E* характеризуется дополнительным условием:

$$\frac{\partial H}{\partial N} = 0, \quad (2.2)$$

где *N* – нормаль к *AE* или *BC*.

Линии тока (за исключением линии тока *AE*) составляют прямые углы с линиями откосов *AB* и *DE* (но не *CD*).

Если к какой-нибудь линии равного напора присоединить ряд пьезометров, то горизонты воды в них, как отмечалось ранее, должны установиться в одной горизонтальной плоскости *P–P*, пересекающей кривую депрессии в точке примыкания к ней рассматриваемой линии равного напора (см. на рис. 2.1 точку *d*). Это справедливо для плавноизменяющегося движения.

Гидравлический расчет земляной плотины, необходимый при проектировании плотины, состоит в определении фильтра-

ционного расхода воды, просачивающейся через плотину, и в построении кривой депрессии BC .

2.2. Фильтрационный расчет однородной земляной плотины на водонепроницаемом основании

Для упрощения расчета земляной плотины рядом авторов было предложено заменять действительный трапецидальный профиль плотины $AbcE$ (рис. 2.2) условным трапецидальным профилем $A'b'cE$, имеющим вертикальный верховой «откос» (вертикальное ограничение) $A'b'$.

Расстояние εh_1 (где h_1 – глубина в верхнем бьефе) между сечением W_1-W_1 , проведенным по урезу воды через точку B , и вертикальным ограничением $A'b'$ условного профиля плотины должно быть выбрано таким, при котором:

а) фильтрационный расход q , отвечающий условному профилю $A'b'cE$, оказывается примерно равным фильтрационному расходу q , отвечающему действительному профилю плотины $AbcE$;

б) кривая депрессии для условного профиля на значительном протяжении $C'C$ совпадает с кривой депрессии BC , относящейся к действительному профилю плотины.

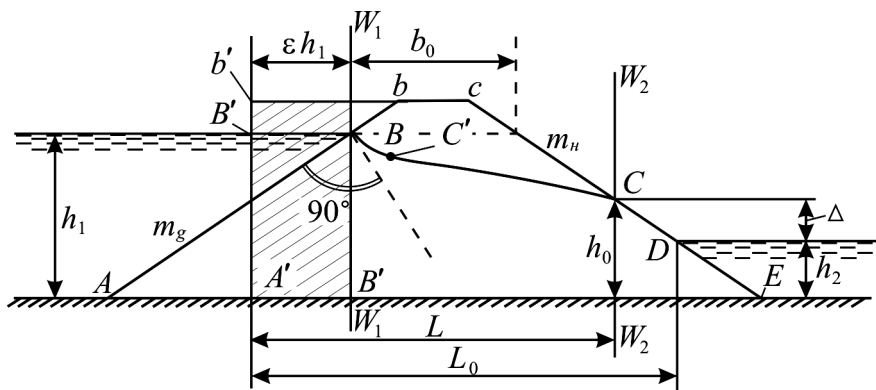


Рис. 2.2. К фильтрационному расчету земляной плотины

Для величины ε Р.Р. Чугаевым была предложена формула (пригодная и для плотин на проницаемом основании)[3]:

$$\varepsilon = \frac{0,44}{1 + \frac{1}{2m_b}} \approx 0,40, \quad (2.3)$$

где m_b – коэффициент верхового откоса.

Используя поясненное допущение, вместо действительного профиля $abcE$ подвергаем расчету условный профиль $A'b'cE$. Такой условный профиль рассчитываем по способу Шаффернака следующим образом.

Из рассмотрения рис. 2.2 и 2.3 можно видеть, что в области низового клина условной плотины $A'b'cE$ должно быть резко изменяющееся движение воды; в остальной же части условного тела плотины – плавно изменяющееся движение.

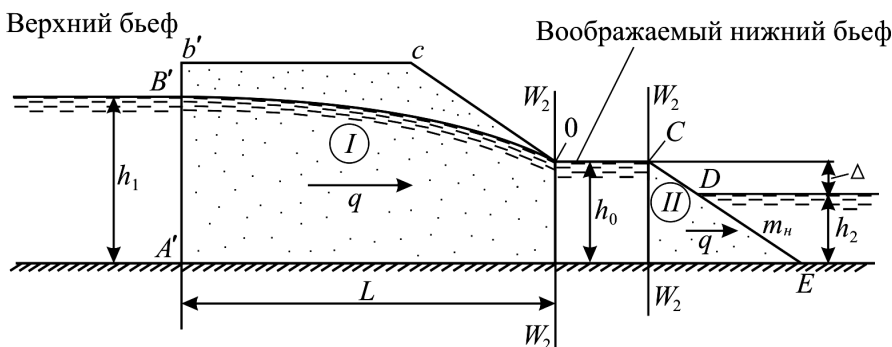


Рис. 2.3. К фильтрационному расчету земляной плотины

Учитывая это обстоятельство, разбиваем вертикалью W_2-W_2 всю рассматриваемую условную область фильтрации на две части (на два *фрагмента*) так, как показано на рис. 2.3.

Имея в виду плоскую задачу и обозначая глубину фильтрационного потока в месте вертикали W_2-W_2 через h_0 , рассмат-

риваем далее два выделенных фрагмента плотины в отдельности и находим для каждого из них удельный расход q .

Первый фрагмент условной плотины – область плавноизменяющегося движения (см. рис. 2.3, фрагмент I). В этом случае для определения q можно использовать уравнение Дюпюи, поскольку здесь имеем плавноизменяющееся движение; это уравнение переписываем в виде

$$q = k \frac{h_1^2 - h_0^2}{2L} = k \frac{h_1^2 - h_0^2}{2(L_0 - m_n \Delta)}, \quad (2.4)$$

где L – длина части I плотины (см. рис. 2.3); Δ – высота промежутка высачивания; m_n – коэффициент низового откоса плотины (называемый иногда коэффициентом заложения откоса); L_0 – расстояние от вертикального ограничения $A'b'$ до уреза нижнего бьефа (см. рис. 2.2):

$$L_0 = \varepsilon h_1 + b_0 + (h_1 - h_2) m_n. \quad (2.5)$$

Здесь b_0 – ширина действительного профиля плотины на уровне горизонта воды верхнего бьефа; h_2 – глубина воды в нижнем бьефе.

Второй фрагмент условной плотины – область резко изменяющегося движения (фрагмент II – низовой клин). Для определения величины q в случае низового клина плотины используется особый прием, который называется приемом *прямолинейных струек*. Согласно этому приему считается, что в низовом клине все струйки фильтрационного потока движутся прямолинейно, параллельно поверхности водоупора (на рис. 2.4 показаны две струйки: I и 2).

Искомый удельный расход q через низовой клин будет равен:

$$q = q_1 + q_2, \quad (2.6)$$

где q_1 – удельный расход через низовой клин в пределах высоты высачивания Δ ; q_2 – удельный фильтрационный расход через низовой клин в пределах глубины h_2 нижнего бьефа за плотиной.

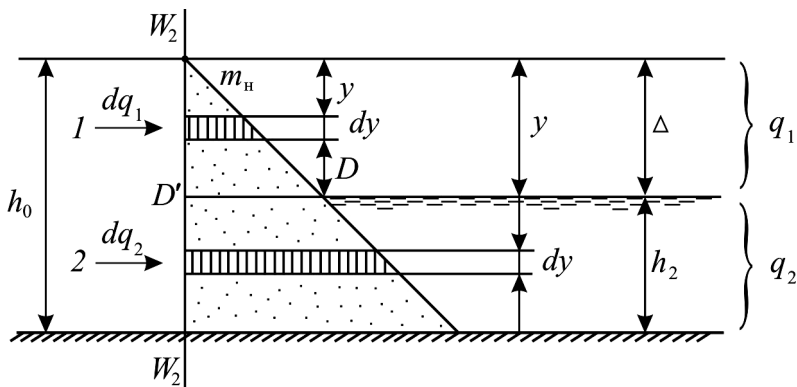


Рис. 2.4. К пояснению формулы для расхода q , через низовой клин согласно приему прямолинейных струек

Используя приём прямолинейных струек, Шаффернак получил следующее уравнение для полного удельного расхода через весь клин:

$$q = q_1 + q_2 = k \frac{\Delta}{m_n} \left(1 + \ln \frac{h_2 + \Delta}{\Delta} \right). \quad (2.7)$$

В результате рассмотрения двух отдельных фрагментов, на которые был разбит условный профиль плотины (см. рис. 2.3), получили систему двух уравнений (2.4) и (2.7):

$$\frac{q}{k} = \frac{h_1^2 - h_0^2}{2(L_0 - m_n \Delta)} = f_1(\Delta), \quad (2.8a)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{\Delta}{m_n} \left(1 + \ln \frac{h_2 + \Delta}{\Delta} \right) = f_2(\Delta), \quad (2.8б)$$

где $h_0 = h_2 + \Delta$.

Если поперечное сечение плотины нам задано, а также заданы глубины h_1 и h_2 в верхнем и нижнем бьефах, то указанная система содержит два неизвестных: q и Δ . Эту систему уравнений удобно решать с помощью компьютерной программы или

графически: задаваться разными значениями Δ и вычислять по формулам (2.8а) и (2.8б) величины q/k , причем строить две кривые $q/k = f(\Delta)$ соответственно по уравнению (2.8а) и уравнению (2.8б). Точка пересечения этих кривых будет давать искомое значение $\Delta_{\text{иск}}$ (рис. 2.5).

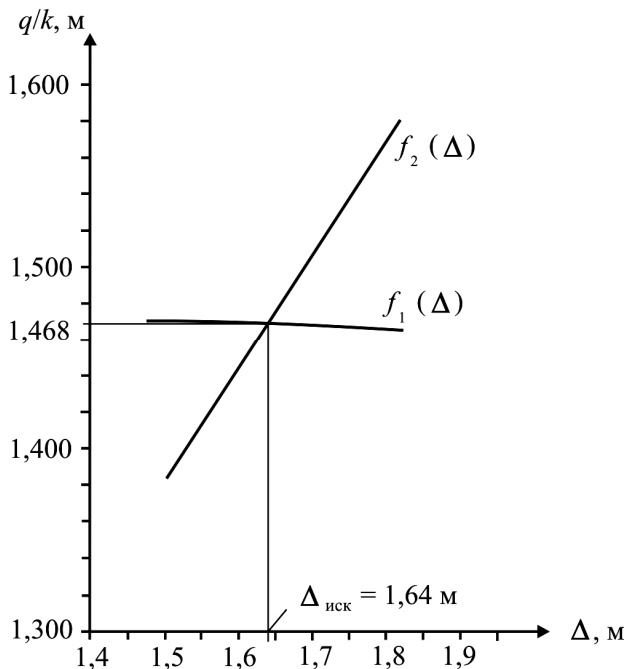


Рис. 2.5. График для определения $\Delta_{\text{иск}}$

В случае, когда воды в нижнем бьефе нет ($h_2 = 0$), данная система легко решается в отношении Δ :

$$\Delta = \frac{L_0}{m_{\text{н}}} - \sqrt{\left(\frac{L_0}{m_{\text{н}}}\right)^2 - h_1^2}. \quad (2.9)$$

Зная $\Delta_{\text{иск}}$, находим величину $(q/k)_{\text{иск}}$; и, наконец, удельный расход q :

$$q = \left(\frac{q}{k} \right)_{\text{иск}} k. \quad (2.10)$$

Найденная таким образом для условного профиля плотины величина q и будет представлять собой удельный расход для действительного профиля.

Зная величину Δ (см. рис. 2.2), кривую депрессии $B'C$ для первого фрагмента условной плотины строим по уравнению Дюпюи (1.28) или (1.29), полагая в этих уравнениях $h_2 = h_0$.

Получив кривую депрессии $B'C$ (см. рис. 2.2) для условного профиля плотины, далее небольшой участок ее $B'C'$ заменяем проведенной кривой BC' ; кривая BC' должна иметь в точке B касательную, ортогональную к линии откоса. Этим и исчерпывается задача фильтрационного расчета земляной плотины на водонепроницаемом основании.

Пример. Определить удельный фильтрационный расход q и построить кривую депрессии в однородной земляной плотине, расположенной на горизонтальном водоупоре (рис. 2.6), если высота плотины $H_{\text{п}} = 11$ м, $h_1 = 10$ м, $h_2 = 2$ м, ширина плотины по верху $b = 8$ м, коэффициенты заложения откосов $m_{\text{в}} = 3$, $m_{\text{н}} = 2$, коэффициент фильтрации $k = 0,4$ м/сут.

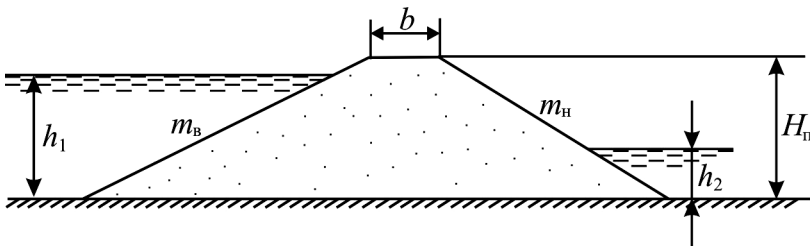


Рис 2.6. Исходная однородная земляная плотина

Решение

Заменим действительный профиль $AbcE$ на условный $A'b'cE$ (см. рис 2.2). Для этого предварительно определим величину ϵ по формуле (2.3)

$$\varepsilon = \frac{0,44}{1 + \frac{1}{2m_b}} = \frac{0,44}{1 + \frac{1}{(2 \cdot 3)}} = 0,377.$$

Тогда для рассматриваемой задачи будут справедливыми дифференциальные уравнения (2.8а) и (2.8б).

Эту систему уравнений решаем графически. Для этого задаваясь одними и теми же значениями Δ (см. рис. 2.5), вычисляем значения функций $f_1(\Delta)$ и $f_2(\Delta)$. Предварительно определим длину L_0 , входящую в уравнение (2.8а). Ширина плотины на отметке уровня воды перед плотиной (см. рис. 2.2):

$$b_0 = b + (m_b + m_n)(H_{пл} - h_1) = 8 + (3 + 2)(11 - 10) = 13 \text{ м.}$$

$$L_0 = \varepsilon h_1 + b_0 + (h_1 - h_2)m_n = 0,377 \cdot 10 + 13 + (10 - 2) \cdot 2 = 32,77 \approx 32,8 \text{ м.}$$

Результаты расчетов заносим в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Δ , м	$h_0 = h_2 + \Delta$	$f_1(\Delta)$, м	$f_2(\Delta)$, м
1,800	3,800	1,465	1,572
1,700	3,700	1,468	1,510
1,600	3,600	1,470	1,448
1,500	3,500	1,472	1,385

По полученным данным строим кривые $f_1(\Delta)$ и $f_2(\Delta)$ (см. рис. 2.5). По точке пересечения их находим $\Delta = 1,64$ м и $(q/k)_{иск} = 1,469$ м.

Тогда

$$q = (q/k)_{иск} k = 1,469 \cdot 0,4 \text{ м/сут} = 0,5876;$$

$$L = L_0 - m_n \Delta = 32,8 - 2 \cdot 1,634 = 29,53 \text{ м.}$$

Далее строим кривую депрессии для условного профиля плотины от глубины $h_1 = 10$ м до глубины $h_0 = h_2 + \Delta = 2,0 + 1,634 = 3,634$ м в пределах первого фрагмента (рис. 2.7).

Для построения кривой депрессии определяем глубину h_i на расстоянии x_i от конечного сечения с глубиной h_0 по формуле (1.29):

$$h = \sqrt{h_0^2 + \left(\frac{q}{k}\right)_{\text{иск}} 2x}.$$

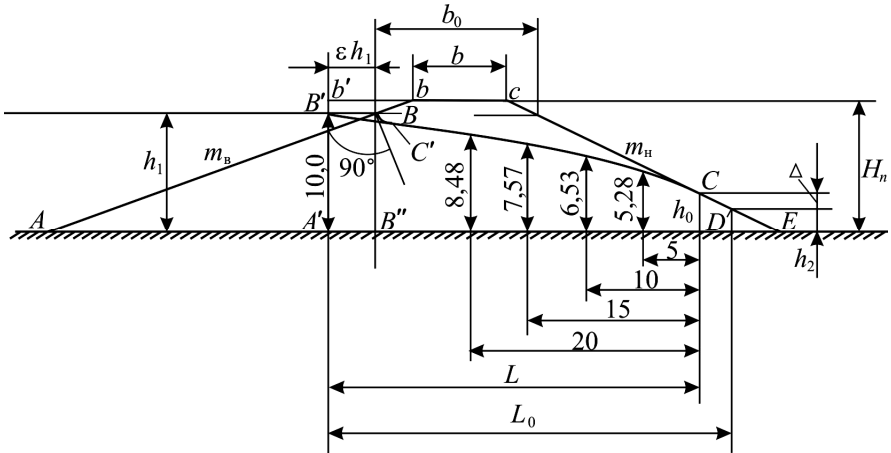


Рис. 2.7. К построению кривой депрессии

Так, на расстоянии $x = 5$ м глубина h будет равна:

$$h = \sqrt{h_0^2 + \left(\frac{q}{k}\right)_{\text{иск}} 2x} = \sqrt{3,634^2 + 1,469 \cdot 2 \cdot 5} = 5,28 \text{ м.}$$

Результаты расчетов заносим в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$x_i, \text{ м}$	5	10	15	20	29,52
$h_i, \text{ м}$	5,28	6,53	7,57	8,48	9,998 $\approx$ 10

По данным этой таблицы строим кривую депрессии $C'-C$ (см. рис. 2.7). От точки B до точки C' кривую депрессии проводим приближенно, начиная от напорной грани AB по нормали к ней и плавно сопрягая её с основной частью кривой депрессии в точке C' (см. рис. 2.7).

3. ЗАМЕЧАНИЯ О ТУРБУЛЕНТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, ОТВЕЧАЮЩЕЙ КВАДРАТИЧНОЙ ОБЛАСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В случае турбулентной фильтрации вместо формулы Дарси для ламинарной фильтрации $v = kJ$ пользуются другими зависимостями.

Первый вид (одночленная формула):

$$v = kJ^{\frac{1}{m}} \quad \text{или} \quad J = \frac{1}{k^m} v^m. \quad (3.1)$$

Второй вид (двучленная формула):

$$J = av + bv^2, \quad (3.2)$$

где a и b – постоянные (для данного грунта и для данной воды) коэффициенты, устанавливаемые экспериментально.

При малых скоростях членом bv^2 можно пренебречь, и последняя формула обращается в формулу Дарси с коэффициентом фильтрации $k = \frac{1}{a}$.

При больших же скоростях можно пренебречь членом av и последняя зависимость обращается в формулу

$$J = bv^2, \quad (3.3)$$

отвечающую области квадратичного сопротивления.

Двучленная формула (3.2) для J предпочтительнее.

Для расчета турбулентной фильтрации воды, относящейся к квадратичной области сопротивления, А.А. Краснопольским была предложена зависимость

$$v = k_T \sqrt{J}, \quad (3.4)$$

где v – скорость фильтрации; J – пьезометрический уклон; k_T – коэффициент фильтрации для турбулентного движения воды.

Если движение плавноизменяющееся, то

$$J = J_p + \frac{\alpha v^2}{n^2 2g}, \quad (3.5)$$

где J_p – пьезометрический уклон; v – скорость фильтрации в данном вертикальном сечении; n – пористость наброски камня (или гальки).

С.В. Избаш для величины k_T дал следующую эмпирическую зависимость в случае каменной наброски:

$$k_T = 28,7 \frac{n^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{(1-n)\psi}} \sqrt{d_{cp}}, \quad (3.6)$$

где k_T – в см/с; d_{cp} – средний диаметр камня, см; ψ – коэффициент формы камня (или гальки), изменяющийся в пределах 1,15–2,35.

С.В. Избашем даются следующие экспериментальные значения k_T , приведенные в таблице (для случая $n = 0,4$):

d , см	10	20	40	50	75
k_T , см/с	23,5	34,5	50	57	69

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какие характерные участки границы можно различить в области фильтрации потока в теле однородной земляной плотины на водонепроницаемом основании?

2. Каким условным профилем заменяется действительный трапецеидальный профиль однородной земляной плотины при фильтрационном расчете?

3. На какие фрагменты разбивается условный профиль однородной земляной трапецеидальной плотины при фильтрационном расчете?

4. Как определяется удельный расход q фильтрационного потока через первый фрагмент условного профиля плотины (через основную часть тела плотины)?

5. Какой прием используется при определении удельного расхода q через низовой клин условного профиля земляной плотины? Какими при этом принимаются струйки?

6. Как построить кривую депрессии для условного и действительного профилей однородной земляной плотины?

7. Приведите одночленную формулу для расчета турбулентной фильтрации.

8. Приведите двучленную формулу для расчета турбулентной фильтрации.

9. Приведите формулу для определения скорости фильтрации v , относящейся к квадратичной области сопротивления (формулу А.А. Краснопольского).

10. Как подсчитать гидравлический уклон J для случая турбулентной фильтрации, относящейся к квадратичной области сопротивления?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее учебное пособие, как мог убедиться читатель, охватывает большой объём материала, относящегося к гидравлике грунтовых вод. Ограниченное число аудиторных занятий и часов, отведенных на самостоятельную работу студента, сложность отдельных вопросов гидравлики грунтовых вод, наконец, нехватка учебной литературы подвигнули автора рассмотреть значительную часть задач, стоящих перед гидравликой грунтовых вод, но в отдельных случаях ограничиться постановкой вопроса или изложением основных положений, имея в виду, что студентам специальности «Водоснабжение и водоотведение» предстоит изучение дисциплин «Водозаборные сооружения из подземных источников» и «Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения».

Автор надеется, что настоящее учебное пособие при усидчивой вдумчивой работе студентов над теоретическим материалом, а также приведенные примеры решения задач позволит им хорошо усвоить материал, входящий в программу дисциплины «Гидравлика безнапорных потоков и грунтовых вод» и облегчит начальный этап изучения дисциплины «Водоснабжение из подземных источников» и раздела «Гидротехнические сооружения» дисциплины «Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения».

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. *Ухин, Б.В.* Инженерная гидравлика : учебн. пособие / Б.В. Ухин, Ю.Ф. Мельников ; под ред. Б.В. Ухина. – М. : Издательство «Ассоциация строительных вузов», 2007. – 344 с.

Дополнительная литература

2. *Константинов, Ю.М.* Гидравлика : учебник / Ю.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Высшая шк., Головное изд-во, 1988. – 398 с.

3. *Чугаев, Р.Р.* Гидравлика : учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 672 с.

4. *СниП 2.04.02–84** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой России. – М. ГУП ЦПП, 2001. – 128 с.

5. *Гигридов, А.Д.* Механика жидкости и газа : учебник для вузов / А.Д. Гигридов. – СПб. : Изд-во СпбГТУ, 1999. – 395 с.

6. *Штеренлихт, Д.В.* Гидравлика : учебник для вузов / Д.В. Штеренлихт. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

7. *Лапшев, Н.Н.* Гидравлика : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н.Н. Лапшев. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

При выполнении контрольной работы каждый студент должен ответить на три вопроса и решить пять задач. Номера теоретических вопросов выбираются по последней цифре номера зачетки. Например, если номер зачетки заканчивается цифрой 3, студенту надо ответить на вопросы 3, 13, 23; если номер зачетки заканчивается цифрой 0, необходимо ответить на вопросы 10, 20, 30 и т. д.

При решении задач номер варианта определяется по двум последним цифрам номера зачетки.

1. Контрольные вопросы

1. Какие подземные воды относятся к грунтовым? Общие сведения о фильтрации.

2. В каком случае движение грунтовых вод является ламинарным? Критерий Рейнольдса.

3. Как определяется эффективный (эквивалентный) диаметр частицы d_s ?

4. Раскройте содержание понятия о скорости фильтрации v .

5. Что называется удельным расходом q грунтового потока?

6. Сформулируйте основной закон ламинарной фильтрации (закон Дарси для v).

7. Какие существуют методы определения коэффициента фильтрации k ?

8. Что представляет собой основное уравнение плавноизменяющегося установившегося безнапорного движения грунтовых вод? (Уравнение Дюпюи для v).

9. Как определяется удельный расход q плавноизменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?

10. Как построить кривую депрессии плавноизменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?

11. Как подсчитывается приток грунтовых вод q к водосборной галерее, расположенной на водоупоре?

12. Из каких составляющих складывается приток грунтовых вод к висячей водосборной галерее?

13. Какие водозаборные скважины называются совершенными, а какие несовершенными?

14. Как определяется приток Q к одиночной совершенной скважине без фильтра при безнапорном потоке грунтовых вод?

15. Как построить кривую депрессии депрессионной воронки одиночной совершенной скважины без фильтра при безнапорном потоке грунтовых вод?

16. Как определяется приток Q к одиночной совершенной скважине, оборудованной фильтром, при безнапорном потоке грунтовых вод?

17. Что называется радиусом влияния скважины R ? Как он определяется?

18. Что представляют собой шахтные колодцы? При какой мощности водоносного горизонта (пласта) шахтные колодцы вскрывают его полностью?

19. Как определяется расход Q , сбрасываемый в совершенную поглощающую скважину?

20. Как подсчитать приток воды к шахтному колодцу, поступающий только через его дно?

21. Какие характерные участки границы можно различить в области фильтрации потока в теле однородной земляной плотины на водонепроницаемом основании?

22. Каким условным профилем заменяется действительный трапецеидальный профиль однородной плотины при фильтрационном расчете?

23. На какие фрагменты разбивается условный профиль однородной земляной трапецеидальной плотины при фильтрационном расчете?

24. Как определяется удельный расход q фильтрационного потока через первый фрагмент условного профиля плотины (через основную часть тела плотины)?

25. Какой прием используется при определении удельного расхода q через низовой клин условного профиля земляной плотины? Какими при этом принимаются струйки?

26. Как построить кривую депрессии для условного и действительного профилей однородной земляной плотины на водопроницаемом основании?

27. Приведите одночленную формулу для расчета турбулентной фильтрации.

28. Приведите двучленную формулу для расчета турбулентной фильтрации.

29. Приведите формулу для определения скорости фильтрации v , относящейся к квадратичной области сопротивления (формулу А.А. Краснопольского).

30. Как подсчитать гидравлический уклон J для случая турбулентной фильтрации, относящейся к квадратичной области сопротивления?

2. Задачи

Задача № 1. Глубина водоносного пласта в створах, расположенных на расстоянии l , равна h_1 и h_2 (рис. П.1).

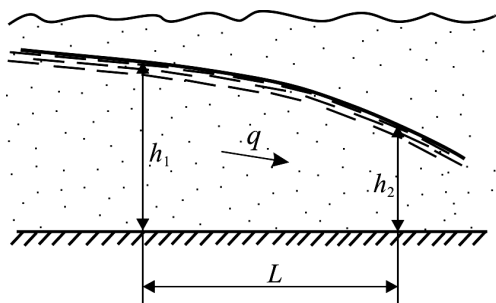


Рис. П.1. К задаче № 1

Определить расход воды q в пласте единичной ширины. Исходные данные приведены в табл. П.1. Коэффициент фильтрации k принять по табл. 1.2. настоящего учебного пособия.

Задача № 2. Определить приток воды q к дренажной галерее из пласта единичной ширины (рис. П.2) при заданных глубинах h_1 и h_2 , коэффициенте фильтрации k и длине влияния L . Исходные данные приведены в табл. П.1.

Примечание. При подстановке коэффициента фильтрации k в м/сут приток воды выразится в м³/сут.

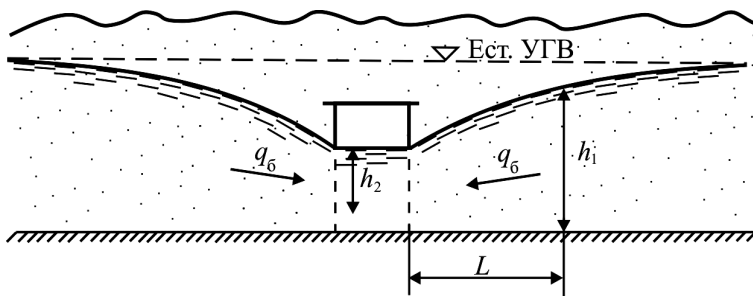


Рис. П.2. К задаче № 2

Задача № 3. Совершенная скважина забирает воду из безнапорного водоносного пласта (рис. П.3).

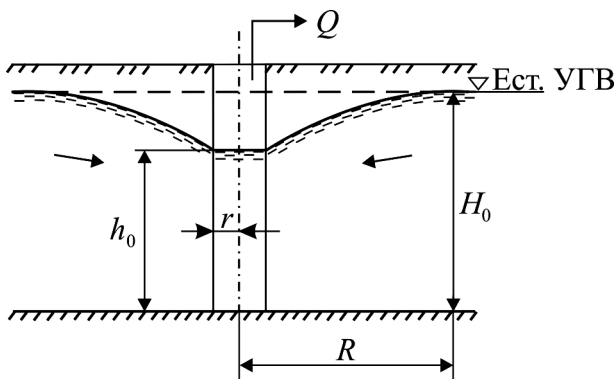


Рис. П.3. К задаче № 3

Заданы мощность водоносного пласта H_0 , глубина воды в скважине h_0 , диаметр скважины d_0 и коэффициент фильтрации k . Исходные данные приведены в табл. П.2.

Требуется:

1. Определить дебит Q скважины;
2. Вычислить глубины грунтового потока h_1, h_2, h_3, h_4 соответственно на расстояниях $r_1 = 0,025R, r_2 = 0,0625R, r_3 = 0,125R, r_4 = 0,5R$ от оси скважины и построить кривую депрессии. Радиус влияния определить по формуле (1.51) Н. Кусакина.

Задача № 4. Определить приток воды к шахтному колодцу диаметром D . Фильтрационный поток воды осуществляется только через дно колодца (рис. П.4). Глубина откачки S_0 , расстояние от дна колодца до водоупора T . Коэффициент фильтрации грунта k . Исходные данные приведены в табл. П.3. Радиус влияния R определить по формуле Н. Кусакина.

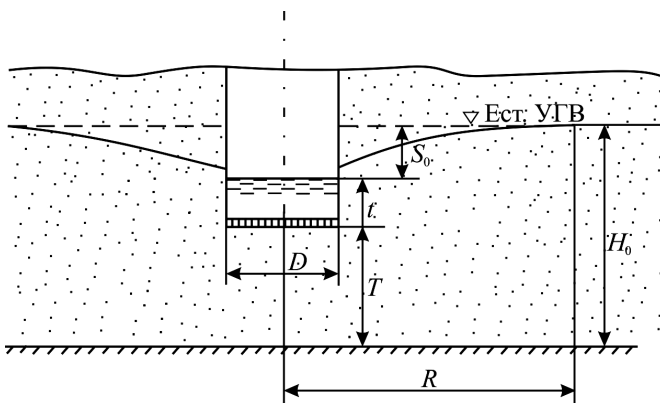


Рис. П.4. К задаче № 4

Задача № 5. Определить удельный расход q и построить кривую депрессии однородной земляной плотины, расположенной на горизонтальном водоупоре (см. рис. 2.6) при заданных $H_n, h_1, h_2, b, m_v, m_n, k$. Исходные данные приведены в табл. П.3.

Исходные данные для решения задач № 1 и 2

Задача № 1					Задача № 2			
№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	L , м	Вид грунта	h_1 , м	h_2 , м	L , м	k , м/сут
01	2,5	1,5	8	Суглинок тяжелый	3,0	1,5	16	2,5
02	2,0	1,0	7	Суглинок легкий	3,0	1,0	50	30
03	3,0	1,5	9	Супесь	2,5	0,8	35	40
04	3,0	1,5	10	Лесс	4,0	1,0	52	20
05	4,0	2,5	11	Песок пылеватый	4,0	1,2	90	50
06	3,1	1,0	12	Песок мелкозернистый	4,5	0,5	120	10
07	5,0	2,0	15	Песок среднезернистый	4,5	1,0	65	35
08	2,0	0,5	30	Песок крупнозернистый	3,5	0,5	55	45
09	5,5	2,0	20	Суглинок легкий	3,5	0,8	50	50
10	6,0	2,0	22	Супесь	3,0	0,6	50	50
11	9,0	5,5	50	Лесс	5,5	0,8	80	45
12	10,0	5,0	15	Песок пылеватый	5,0	1,0	50	50
13	12,0	4,0	200	Песок мелкозернистый	5,5	0,9	60	55
14	2,5	0,5	18	Песок среднезернистый	6,0	1,0	70	48
15	7,0	1,0	110	Песок крупнозернистый	6,5	1,5	62	52
16	6,5	3,0	10	Суглинок легкий	6,5	0,8	50	50
17	6,0	1,5	25	Супесь	7,0	1,5	65	53
18	2,5	0,6	9	Лесс	7,2	1,8	80	40
19	3,0	2,0	50	Песок мелкозернистый	7,5	2,0	90	35
20	8,0	2,0	200	Песок среднезернистый	8,0	4,5	61	45
21	8,0	2,5	300	Песок крупнозернистый	6,0	2,0	65	50
22	8,5	3,0	17	Суглинок легкий	4,8	1,2	80	25
23	5,5	3,5	25	Супесь	2,0	0,8	30	48
24	9,0	3,5	60	Лесс	4,8	1,5	62	51
25	9,5	3,0	160	Песок мелкозернистый	4,5	0,8	93	46
26	9,5	4,0	130	Песок среднезернистый	20,0	3,5	100	0,5
27	2,9	1,0	90	Песок крупнозернистый	2,2	0,8	50	50
28	11,0	4,0	28	Суглинок легкий	8,0	0,5	58	52
29	11,5	3,5	25	Супесь	18,0	1,0	175	0,2
30	12,0	5,0	170	Песок мелкозернистый	28,5	2,5	255	0,05

Исходные данные для решения задачи № 3

Задача № 3				
№ варианта	H_0 , м	h_0 , м	d_0 , мм	k , м/сут
01	32	22	400	2,5
02	33	23	400	2
03	37	25	300	3
04	34	23	300	4
05	35	23	150	5,5
06	24	16	300	6
07	27	18	150	7
08	42	28	200	8
09	34	23	300	9,5
10	37	25	250	10
11	39	26	200	15
12	25	17	200	20
13	28	20	400	18,5
14	29	19	500	13
15	13	9	200	10
16	24	16	500	9
17	38	25	150	10
18	24	16	200	11
19	29	20	400	12
20	35	26	300	14
21	23	15	250	16
22	26	17	300	20
23	23	15	300	25
24	25	17	250	26
25	17	11	300	20
26	18	12	300	12
27	20	14	250	15
28	14	10	250	18
29	22	15	400	20
30	24	16	400	15

Исходные данные для решения задач № 4 и 5

Задача № 4					Задача № 5						
№ вари-анта	D , мм	T , м	S_0 , м	k , м/сут	$H_{п}$, м	h_1 , м	h_2 , м	b , м	m_b , мм	$m_{п}$, мм	k , м/сут
01	750	6,0	2,0	0,1	4	3	0,4	4	1,5	1	0,04
02	750	7,0	1,5	0,5	4,2	3,2	0,5	4	2	1	0,5
03	800	5,0	1,0	0,1	4,4	3,4	0,6	4	2,5	1,5	0,5
04	800	6,0	0,8	0,5	4,6	3,6	0,8	4	3	2	0,6
05	800	7,0	1,2	5	4,8	3,8	0,9	4	3,5	2	0,7
06	850	2,5	0,5	0,1	5	4	1	5	1,5	1	0,05
07	850	8,0	2,0	5	5,2	4,2	1,2	5	2	1	0,3
08	900	3,0	0,5	0,1	5,4	4,4	1,4	5	2,5	1,5	0,4
09	900	8,0	3,0	0,5	5,6	4,6	1,6	5	3	2	0,5
10	900	6,0	2,5	5	5,8	4,8	1,8	5	3,5	2	0,6
11	1000	6,5	2,0	0,1	6	5	2	5	1,5	1	0,4
12	1000	5,0	1,0	0,5	6,2	5,2	1	5	2	1	0,3
13	1000	9,0	2,5	5	6,4	5,4	1,2	5	2,5	1,5	0,4
14	1050	5,0	1,0	0,1	6,6	5,6	1,4	5	3	2	0,5
15	1050	8,0	3,0	0,5	6,8	5,8	1,6	5	3,5	2	0,6
16	1200	10,0	2,5	0,1	7	6	1,8	8	1,5	1	0,4
17	1200	3,0	0,5	0,5	7,2	6,2	1,2	8	2	1	0,3
18	1200	5,0	1,2	5	7,4	6,4	1,4	8	2,5	1,5	0,4
19	1250	5,5	1,0	0,1	7,6	6,6	1,6	8	3	2	0,5
20	1250	10,0	3,0	0,5	7,8	6,8	1,8	8	3,5	2	0,6
21	1300	4,5	0,8	0,1	9	8	2	8	1,5	1	0,06
22	1300	6,0	2,0	0,5	9,2	8,2	1,2	8	2	1	0,3
23	1300	7,0	1,6	5	9,4	8,4	1,4	8	2,5	1,5	0,4
24	950	4,0	1,0	0,1	9,6	8,6	1,6	8	3	2	0,5
25	950	9,0	2,0	0,5	9,8	8,8	1,8	8	3,5	2	0,6
26	1100	9,0	2,0	0,1	11	10	1,2	8	1,5	1	0,07
27	1100	5,0	0,5	0,5	11,2	10,2	1,4	8	2	1	0,3
28	1100	10,0	2,0	5	11,4	10,4	1,6	8	2,5	1,5	0,08
29	1150	8,0	2,0	30	11,6	10,6	1,8	8	3	2	0,5
30	1150	9,0	1,8	25	11,8	10,8	2	8	3,5	2	0,6

Учебное издание

Александр Федорович Тернов

ГИДРАВЛИКА ГРУНТОВЫХ ВОД

Учебное пособие

Редактор Е.А. Кулешова
Технический редактор А.А. Маракулина

Подписано в печать 30.10.2010. Формат 60×84.
Усл.печ. л. 3,66. Уч.-изд. л. 3,32. Тираж 80 экз. Заказ № 391.
Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООО ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.