

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

---

Кафедра гидротехнических сооружений  
и водоснабжения

# **ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ПО ДИСЦИПЛИНАМ «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ  
И ГИДРОГЕОЛОГИЯ» И «ГЕОЛОГИЯ И БУРОВОЕ ДЕЛО»

Для студентов мелиоративно-строительного факультета  
специальностей 1-74 05 01 – Мелиорация и водное хозяйство  
и 1-74 04 01 – Сельское строительство и обустройство территорий

Горки 2011

Одобрено методической комиссией мелиоративно-строительного факультета  
24.02.2011 (протокол № 6).

Составили: А.А. БОРОВИКОВ, Н.В. ВАСИЛЬЕВА.

УДК 556.5 (076)

**Основы динамики подземных вод:** методические указания для решения задач / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; сост. А.А. Боровиков, Н.В. Васильева. Горки, 2011. 48 с.

Приведены расчетные схемы и теоретические основы движения подземных вод, примеры решения задач по разделу гидрогеологии «Динамика подземных вод».

Для студентов мелиоративно-строительного факультета специальностей 1-74 05 01 – Мелиорация и водное хозяйство и 1-74 04 01 – Сельское строительство и обустройство территорий.

Таблиц 5. Рисунков 32. Библиогр. 9.

Рецензенты: П.Л. МАКАРЕНКО, канд. техн. наук, доцент; Д.В. КОЛЬЧЕВСКИЙ, канд. архитектуры.

© Составление. А.А. Боровиков,  
Н.В. Васильева, 2011

© Учреждение образования  
«Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших экологических проблем, требующих пристального внимания общественности и принятия безотлагательных мер, является защита подземных вод от загрязнения и истощения вследствие постоянного роста антропогенной нагрузки на водосборы в результате интенсивного развития промышленного, коммунального и сельского хозяйства. Как результат интенсивной промышленной и хозяйственной деятельности происходит истощение и загрязнение ресурсов природных вод в значительных размерах. Ухудшению гидрохимического состояния верхних водоносных горизонтов способствуют как промышленные стоки с содержащимися в них вредными и токсичными (фенолы, диоксины, соли тяжелых металлов и др.) веществами, так и стоки крупных животноводческих предприятий. Резко обострившаяся экологическая ситуация возвела проблему чистой воды в ранг наиболее острых и актуальных для всего человечества. Подземные воды являются одним из основных источников для сельскохозяйственного водоснабжения. В Республике Беларусь более 90 % систем сельскохозяйственного водоснабжения базируется на подземных водах, режим, качество и условия добычи которых зависят от условий их залегания.

Дальнейшее развитие промышленности и сельскохозяйственного производства существенным образом определяется количественным и, особенно, качественным состоянием водных ресурсов. Первостепенное значение при этом имеют ресурсы пресных подземных вод, сосредоточенных в верхней части осадочной толщи и являющихся основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Оценка естественной защищенности подземных вод от загрязнения относится к числу важных хозяйственных задач. В настоящее время процессы техногенного воздействия на подземные воды превратились из локальных в региональные, поскольку расположение бассейна подземных вод не подчинено административно-территориальному делению.

Инженер-гидротехник и инженер-строитель должны достаточно хорошо разбираться в природных условиях объекта строительства, уметь правильно оценить их, используя для этого свои и уже имеющиеся материалы исследований. Будущая инженерная деятельность связана с устройством различных инженерных сооружений (каналов, дренажей, водохранилищ, зданий и т.д.), необходимы знания о взаимодействии природной среды (пород-грунтов, подземных вод, различных геологических явлений и др.) с инженерными сооружениями.

Методические указания способствуют приобретению студентами необходимых теоретических и практических знаний по гидрогеологии.

## 1. ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

Движение подземных вод, сложенных глинистыми и песчаными породами, в большинстве случаев является ламинарным и подчиняется закону Дарси:

$$v = K \cdot J, \text{ м/сут}, \quad (1)$$

или

$$Q = K \cdot \omega \cdot J, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость движения подземных вод, м/сут;

$K$  – коэффициент фильтрации, м/сут;

$J$  – напорный градиент;

$Q$  – расход потока подземных вод, м<sup>3</sup>/сут;

$\omega$  – площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>.

В динамике подземных вод этот процесс рассматривается как движение сплошной массы воды без выделения движения отдельных частей ее, двигающихся в этой массе с различными скоростями. Такая масса движущейся подземной воды называется **фильтрационным потоком**.

По гидравлическим признакам потоки делятся на безнапорные и напорные (рис. 1).

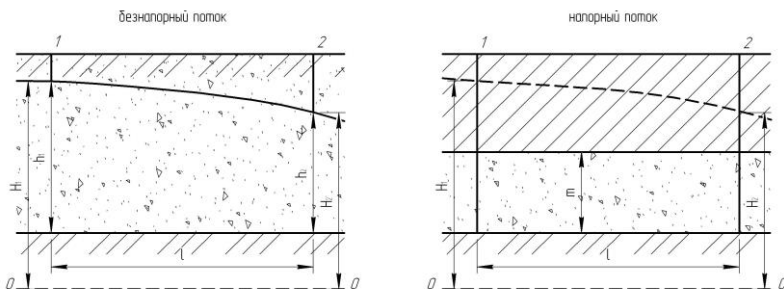


Рис. 1. Продольный разрез фильтрационных потоков.

К элементам фильтрационного потока относятся: мощность потока ( $h$  – для безнапорного потока,  $m$  – для напорного потока); ширина потока (протяжённость в направлении, перпендикулярном движению, –  $b$ );  $H_1, H_2$  – расстояние от свободного (безнапорный поток) или пьезометрического (напорный поток) уровня до условной плоскости сравнения;  $l$  – расстояние между сечениями (длина пути фильтрации).

Градиент напора – это потери напора ( $\Delta H$ ) по длине пути фильтрации  $l$ .

$$J = \frac{\Delta H}{l} = \frac{H_1 - H_2}{l}. \quad (3)$$

Градиент в точке напора

$$i = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{l} = -\frac{dH}{dl}. \quad (4)$$

Производная отрицательна в связи с уменьшением напора по мере увеличения длины.

Тогда величина расхода, по закону Дарси, имеет следующий вид: для безнапорного потока

$$Q = K \cdot \omega \cdot \left( -\frac{dH}{dl} \right) = K \cdot h \cdot b \cdot \left( -\frac{dH}{dl} \right), \quad (5)$$

для напорного потока

$$Q = K \cdot \omega \cdot \left( -\frac{dH}{dl} \right) = K \cdot m \cdot b \cdot \left( -\frac{dH}{dl} \right). \quad (6)$$

Для плоского потока достаточно определить единичный расход потока (расход потока на единицу ширины)

$$q = \frac{Q}{b}. \quad (7)$$

Тогда величина единичного расхода: для безнапорного потока

$$q = -K \cdot h \cdot \frac{dH}{dl}, \quad (8)$$

для напорного потока

$$q = -K \cdot m \cdot \frac{dH}{dl}. \quad (9)$$

### 1.1. Расход плоского безнапорного потока при горизонтальном водоупоре

Расчет производится на основе закона Дарси (8). Расчетная схема приведена на рис. 2.

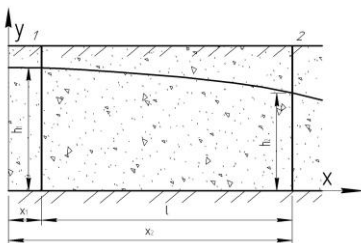


Рис. 2. Схема движения грунтового потока при горизонтальном водоупоре.

Записав уравнение (8) в координатной форме, получим

$$q = -K \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (10)$$

Перенесем постоянные члены уравнения и переменную  $x$  в левую часть:

$$-\frac{q}{K} \cdot dx = y \cdot dy. \quad (11)$$

Интегрируем уравнение (11) от сечения 1 до сечения 2, учитывая, что при увеличении  $x$  от  $x_1$  до  $x_2$  мощность потока изменяется от  $h_1$  до  $h_2$ :

$$-\frac{q}{K} \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{h_1}^{h_2} y \cdot dy. \quad (12)$$

Откуда получаем

$$-\frac{q}{K} \cdot (x_2 - x_1) = \frac{h_2^2 - h_1^2}{2}. \quad (13)$$

Выразив из формулы (13)  $q$ , с учетом того, что  $x_2 - x_1 = l$  (рис. 2), получаем зависимость для определения расхода плоского безнапорного потока при горизонтальном водоупоре (формула Дюпюи).

$$q = K \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot l}. \quad (14)$$

**Задача 1.** Грунтовые воды содержатся в разнородных песках (рис. 3). Отметка уровня воды в скв.1 (верхней по потоку) 130,4 м, в скв.2, расположенной по направлению потока на расстоянии 2000 м от скв.1, – 122,6 м. Водоупорный слой горизонтальный, отметка поверхности водоупора 112,6 м. Коэффициент фильтрации водоносного пласта 16,2 м/сут. Определить единичный расход грунтового потока.

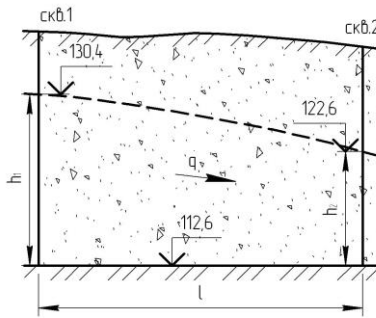


Рис. 3. Расчетная схема к задаче 1.

**Решение.** Единичный расход грунтового потока вычисляется по зависимости (14). Для его определения необходимо рассчитать мощности потока в сечениях 1 и 2:

$$h_1 = 130,4 - 112,6 = 17,8, \text{ м,}$$

$$h_2 = 122,6 - 112,6 = 10,0, \text{ м.}$$

Единичный расход грунтового потока

$$q = K \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot l} = 16,2 \cdot \frac{17,8^2 - 10,0^2}{2 \cdot 2000} = 0,88, \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м.}$$

**Задача 2.** Грунтовые воды содержатся в разнородных песках (рис. 4). Отметка уровня воды в скв.1 (верхней по потоку) 130,4 м, в скв.2, расположенной по направлению потока на расстоянии 1000 м от скв.1, – 122,6 м. Водупорный слой горизонтальный, отметка поверхности водоупора 112,6 м. Определить положение кривой депрессии через каждые 200 м.

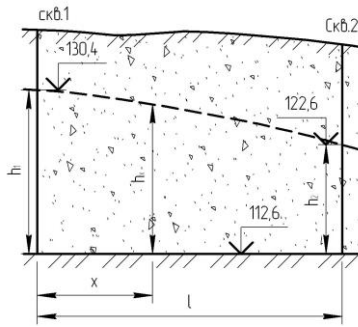


Рис. 4. Расчетная схема к задаче 2.

**Решение.** Единичный расход грунтового потока вычисляется по зависимости (14). Составим уравнения для сечений 1 и 2:

$$q = K \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot l},$$

а также для 1 и x:

$$q = K \cdot \frac{h_1^2 - h_x^2}{2 \cdot x}.$$

Ввиду неразрывности потока его расход одинаков во всех сечениях. Тогда

$$K \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot l} = K \cdot \frac{h_1^2 - h_x^2}{2 \cdot x}.$$

Откуда

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{x}{l} \cdot (h_1^2 - h_2^2)}. \quad (15)$$

Зависимость (15) носит название уравнения кривой депрессии.

Расчет лучше всего выполнять в табличной форме, задаваясь величиной  $x$  и определив первоначально мощность потока в сечениях 1 и 2:

$$h_1 = 130,4 - 112,6 = 17,8, \text{ м,}$$

$$h_2 = 122,6 - 112,6 = 10,0, \text{ м.}$$

$x, \text{ м}$	0	200	400	600	800	1000
$h_x, \text{ м}$	17,8	16,5	15,2	13,7	12,0	10,0

## 1.2. Расход плоского безнапорного потока при наклонном водоупоре

Расчет производится на основе закона Дарси (8). Расчетная схема приведена на рис. 5.

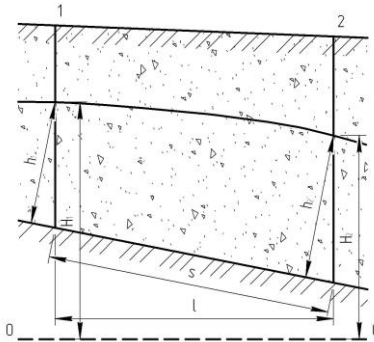


Рис. 5. Схема движения грунтового потока при наклонном водоупоре.

При не очень больших уклонах подстилающего водонепроницаемого слоя ( $0,001 \div 0,0001$ ) и незначительном изменении мощностей потоков по длине можно допустить, что  $S \approx I$ ,  $J \approx J_{cp}$ , а  $h \approx h_{cp}$ , т.е.

$$q = K \cdot h_{п0} \cdot J_{п0} = K \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l}. \quad (16)$$

Данное уравнение расхода получено Г.Н. Каменским исходя из основного закона фильтрации.

**Задача 3.** Грунтовые воды заключены в мелкозернистых песках, имеющих коэффициент фильтрации  $4,7 \text{ м/сут}$ . Определить отметку уровня грунтового потока в сечении 2 и единичный расход. Данные для расчета приведены на рис. 6.

**Решение.** Единичный расход грунтового потока в случае наклонного водоупора определяется по приближенной формуле Г.Н. Каменского (16).

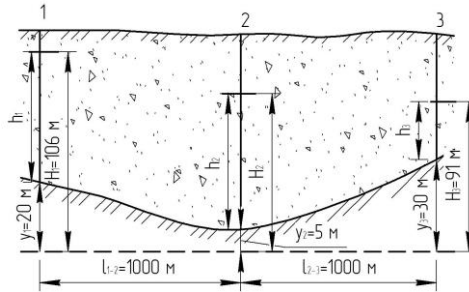


Рис. 6. Расчетная схема к задаче 3.

Составим уравнения для сечений 1 и 2:

$$q = K \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}},$$

а также для 2 и 3:

$$q = K \cdot \frac{h_2 + h_3}{2} \cdot \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}}.$$

Ввиду неразрывности потока его расход одинаков во всех сечениях. Тогда

$$K \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = K \cdot \frac{h_2 + h_3}{2} \cdot \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}}.$$

Здесь

$$h_1 = H_1 - y_1 = 106 - 20 = 86 \text{ м},$$

$$h_2 = H_2 - y_2 = H_2 - 5,$$

$$h_3 = H_3 - y_3 = 91 - 30 = 61 \text{ м}.$$

$$4,7 \cdot \frac{86 + H_2 - 5}{2} \cdot \frac{106 - H_2}{1000} = 4,7 \cdot \frac{H_2 - 5 + 61}{2} \cdot \frac{H_2 - 91}{1000}.$$

Упростив, имеем

$$(81 + H_2) \cdot (106 - H_2) = (H_2 + 56) \cdot (H_2 - 91).$$

Раскрыв скобки, получаем квадратное уравнение

$$H_2^2 - 30 \cdot H_2 - 6841 = 0.$$

Дискриминант равен

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = (-30)^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-6841) = 28264.$$

Корень уравнения равен

$$H_2 = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2 \cdot a} = \frac{30 \pm \sqrt{28264}}{2 \cdot 1} = 15 \pm 84,06.$$

Откуда

$$H_2 = 15 + 84,06 = 99,06, \text{ м,}$$

$$h_2 = H_2 - y_2 = 99,06 - 5 = 94,06, \text{ м.}$$

Единичный расход

$$q = 4,7 \cdot \frac{86 + 94,06}{2} \cdot \frac{106 - 99,06}{1000} = 2,94, \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м.}$$

### 1.3. Расход плоского напорного потока в пласте постоянной мощности

Расчет производится на основе закона Дарси (9). Расчетная схема приведена на рис. 7.

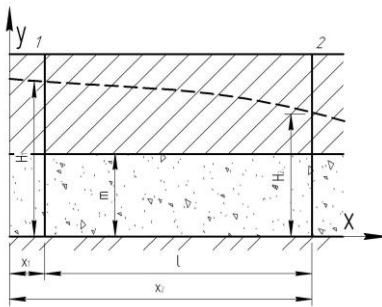


Рис. 7. Схема движения напорного потока в пласте постоянной мощности.

Записав уравнение (9) в координатной форме, получим

$$q = -K \cdot m \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (17)$$

Перенесем постоянные члены уравнения и переменную  $x$  в левую часть:

$$-\frac{q}{K \cdot m} \cdot dx = dy. \quad (18)$$

Интегрируем уравнение (18) от сечения 1 до сечения 2, учитывая, что при увеличении  $x$  от  $x_1$  до  $x_2$  напор изменяется от  $H_1$  до  $H_2$ :

$$-\frac{q}{K \cdot m} \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{H_1}^{H_2} dy. \quad (19)$$

Откуда получаем

$$-\frac{q}{K \cdot m} \cdot (x_2 - x_1) = H_2 - H_1. \quad (20)$$

Выразив из формулы (20)  $q$ , с учетом того, что  $x_2 - x_1 = l$  (рис. 7), получаем зависимость для определения расхода плоского напорного потока в пласте постоянной мощности.

$$q = K \cdot m \cdot \frac{H_1 - H_2}{l}. \quad (21)$$

**Задача 4.** Определить единичный расход напорного потока в пласте постоянной мощности. Пласт мощностью 15 м вскрыт двумя буровыми скважинами, расположенными по направлению потока. Расстояние между скважинами – 200 м. Пьезометрический уровень в скв.1 установился на отметке 64,22 м, в скв.2 – на отметке 63,44 м (рис. 8). Пласт сложен однородным крупнозернистым песком с коэффициентом фильтрации 45 м/сут.

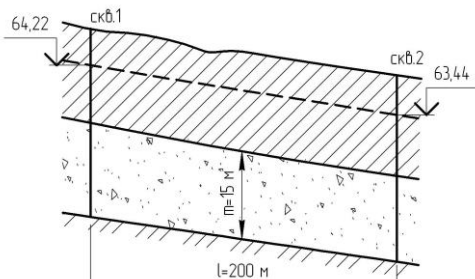


Рис. 8. Расчетная схема к задаче 4.

**Решение.** Единичный расход напорного потока вычисляется по зависимости (21):

$$q = K \cdot m \cdot \frac{H_1 - H_2}{l} = 45 \cdot 15 \cdot \frac{64,22 - 63,44}{200} = 2,63, \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м}.$$

#### 1.4. Расход плоского напорного потока в пласте переменной мощности

Расчет производится на основе закона Дарси (9), приняв  $J \approx J_{\text{ср}}$ , а  $m \approx m_{\text{ср}}$ . Расчетная схема приведена на рис. 9.

$$q = K \cdot m_{\text{ср}} \cdot J_{\text{ср}} = K \cdot \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l}. \quad (22)$$

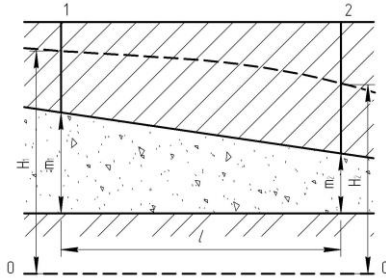


Рис. 9. Схема движения напорного потока в пласте переменной мощности.

**Задача 5.** Напорные воды заключены в среднезернистых песках. Определить пьезометрический уровень водоносного горизонта в сечении 2 и единичный расход потока при коэффициенте фильтрации пласта 3,8 м/сут. Данные для расчета приведены на рис. 10.

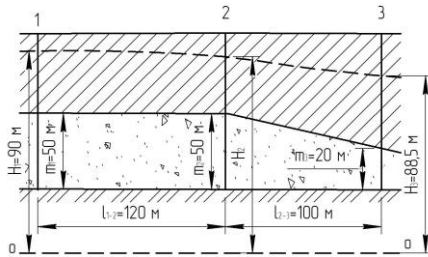


Рис. 10. Расчетная схема к задаче 5.

**Решение.** Единичный расход напорного потока в случае с пластом переменной мощности определяется по формуле (22).

Составим уравнения для сечений 1 и 2:

$$q = K \cdot \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}},$$

а также для 2 и 3:

$$q = K \cdot \frac{m_2 + m_3}{2} \cdot \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}}.$$

Ввиду неразрывности потока его расход одинаков во всех сечениях. Тогда

$$K \cdot \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = K \cdot \frac{m_2 + m_3}{2} \cdot \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}}.$$

$$3,8 \cdot \frac{50+50}{2} \cdot \frac{90-H_2}{120} = 3,8 \cdot \frac{50+20}{2} \cdot \frac{H_2-88,5}{100}.$$

Упростив, имеем

$$10 \cdot 100 \cdot (90 - H_2) = 12 \cdot 70 \cdot (H_2 - 88,5).$$

Раскрыв скобки, получаем следующее уравнение:

$$184 \cdot H_2 = 16434.$$

Откуда

$$H_2 = \frac{16434}{184} = 89,32, \text{ м.}$$

Единичный расход напорного потока

$$q = 3,8 \cdot \frac{50+50}{2} \cdot \frac{90-89,32}{120} = 1,08, \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м.}$$

### 1.5. Движение подземных вод в слоистых пластах

Движение подземных вод в неоднородных пластах, состоящих из ряда слоев разной водопроницаемости, характеризуется средним коэффициентом фильтрации пласта, отражающим его общую водопроницаемость.

Максимальное значение  $K_{cp}$  будет при фильтрации воды параллельно напластованию, минимальное – при фильтрации перпендикулярно напластованию пород.

При движении воды параллельно залеганию пластов средний коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$K_{\text{пд}} = \frac{k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2 + \dots + k_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (23)$$

где  $h_1, h_2, \dots, h_n$  – мощности слоев с коэффициентами фильтрации  $k_1, k_2, \dots, k_n$ .

При движении воды по нормали к напластованию средний коэффициент фильтрации определяется по формуле Г.Н. Каменского:

$$K_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \dots + \frac{h_n}{k_n}}, \quad (24)$$

где  $h_1, h_2, \dots, h_n$  – путь фильтрации в пределах каждого слоя.

**Задача 6.** Определить единичный расход в двухслойном водоносном пласте (рис. 11). Нижний пласт сложен крупнозернистым гравелистым песком с коэффициентом фильтрации 16,2 м/сут, верхний – мелкозернистым песком с коэффициентом фильтрации 2,2 м/сут. В результате бурения скважин получены следующие данные: отметка кровли водоупора – 45,2 м; отметка кровли нижнего пласта – 60,4 м;

отметка уровня воды в скв.1 – 78,6 м; отметка уровня воды в скв.2 – 77,2 м. Расстояние между скважинами – 400 м.

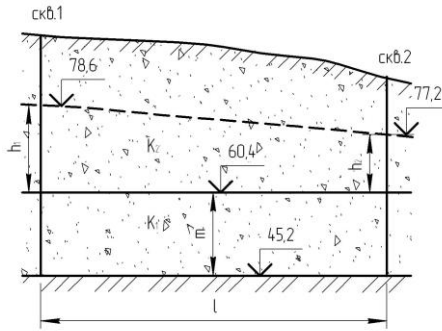


Рис. 11. Расчетная схема к задаче 6.

**Решение.** Единичный расход подземных вод определяем, считая расход для верхнего пласта по зависимости (14), для нижнего пласта – по зависимости (21), предварительно вычислив

$$h_1 = 78,6 - 60,4 = 18,2, \text{ м,}$$

$$h_2 = 77,2 - 60,4 = 16,8, \text{ м,}$$

$$m = 60,4 - 45,2 = 15,2, \text{ м,}$$

$$q = K_2 \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot l} + K_1 \cdot m \cdot \frac{H_1 - H_2}{l} =$$

$$= 2,2 \cdot \frac{18,2^2 - 16,8^2}{2 \cdot 400} + 16,2 \cdot 15,2 \cdot \frac{78,6 - 77,2}{400} = 0,997, \text{ л}^3 / \text{с} \cdot \text{м}^2.$$

**Задача 7.** Определить единичный расход грунтового потока в наклонном пласте, состоящем из трех песчаных слоев различной водопроницаемости, в условиях равномерного движения грунтовых вод. Песчаная толща подстилается глинами. Данные для расчета: уровень воды в скв.1 находится на отметке 35,2 м, в скв.2 – на отметке 31,8 м. Мощность нижнего слоя – 8,0 м, среднего – 4,6, мощность водоносной части верхнего слоя – 6,0 м; коэффициент фильтрации верхнего слоя – 7,2 м/сут, среднего – 5,6, нижнего – 3,2 м/сут. Расстояние между скважинами – 470 м (рис. 12).

**Решение.** Находим среднее значение коэффициента фильтрации по зависимости (23):

$$K_{\text{ср}} = \frac{k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2 + k_3 \cdot h_3}{h_1 + h_2 + h_3} = \frac{7,2 \cdot 6 + 5,6 \cdot 4,6 + 3,2 \cdot 8}{6 + 4,6 + 8} = 5,08, \text{ м/сут.}$$

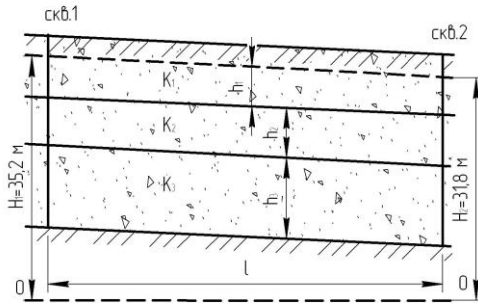


Рис. 12. Расчетная схема к задаче 7.

Определяем уклон грунтового потока:

$$J = \frac{H_1 - H_2}{l} = \frac{35,2 - 31,8}{470} = 0,0072.$$

Единичный расход грунтового потока вычисляем по формуле

$$q = K_{cp} \cdot h \cdot J = 5,08 \cdot (6 + 4,6 + 8) \cdot 0,0072 = 0,68, \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м}.$$

## 2. ПРИТОК ВОДЫ К ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВОДОСБОРАМ

Вертикальные водосборы можно разделить на шахтные колодцы и буровые скважины. Нередко через открытую площадь дна шахтного колодца поступает больше воды, чем через стенки, чего нет в буровых скважинах. Поэтому при расчете шахтного колодца возникает необходимость учитывать поступление воды через дно.

По характеру эксплуатируемых водоносных горизонтов колодцы разделяются на безнапорные (грунтовые) и напорные (рис. 13). При понижении в напорном колодце пьезометрического уровня ниже кровли водоносного слоя колодец носит название грунтово-напорного.

По характеру заложения в водоносном слое колодцы подразделяются на совершенные и несовершенные. Несовершенные колодцы, преимущественно не доведенные до нижнего водоупора, могут иметь проницаемые дно и стенки, проницаемые стенки и глухое дно, глухие стенки и проницаемое дно. Совершенные колодцы прорезают водоносный горизонт на полную мощность и имеют проницаемые стенки.

От типа вертикального водосбора зависит выбор расчетных уравнений движения воды к колодцам.

В результате откачки воды из бурового колодца вокруг водозабора формируется радиальный поток (приток воды к скважине идет со всех сторон), при этом в безнапорном водоносном горизонте осушается часть пласта в виде воронки с радиусом  $R$ , а в напорном горизонте во-

круг скважины образуется зона сниженных напоров в виде воронки с радиусом  $R$  (см. рис. 13) пласта в виде воронки с радиусом  $R$ .

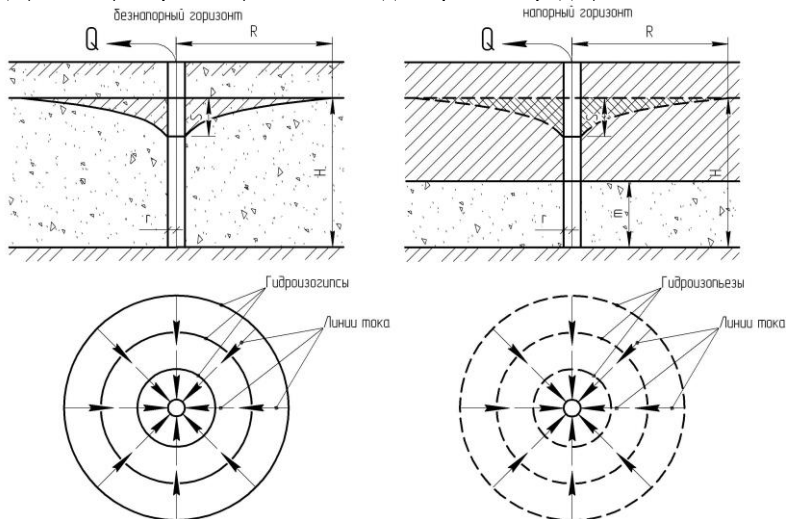


Рис. 13. Схемы совершенных буровых колодцев в безнапорном и напорном горизонтах:  $Q$  – дебит скважины;  $H$  – мощность безнапорного водоносного пласта (напор в напорном водоносном горизонте);  $m$  – мощность напорного водоносного пласта;  $r$  – радиус скважины;  $R$  – радиус влияния;  $S$  – понижение уровня воды в скважине при откачке.

### 2.1. Дебит совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения

Определение дебита совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения ведется на основе закона Дарси (2) согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 14.

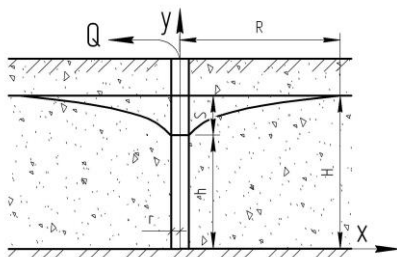


Рис. 14. Схема совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое.

Площадь поперечного сечения потока

$$w = 2 \cdot \pi \cdot x \cdot y. \quad (25)$$

Напорный градиент

$$J = \frac{dy}{dx}. \quad (26)$$

Подставив значения площади потока и напорного градиента в формулу (2), получаем

$$Q = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot x \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (27)$$

Перенесем постоянные члены уравнения и переменную  $x$  в левую часть:

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K} \cdot \frac{dx}{x} = y \cdot dy. \quad (28)$$

Интегрируем уравнение (28), учитывая, что при увеличении  $x$  от  $r$  до  $R$  напор изменяется от  $h$  до  $H$ :

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K} \cdot \int_r^R \frac{dx}{x} = \int_h^H y \cdot dy. \quad (29)$$

Откуда получаем

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K} (\ln R - \ln r) = \frac{H^2 - h^2}{2}. \quad (30)$$

Выразив из формулы (30)  $Q$ , получаем зависимость для определения дебита совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения:

$$Q = \frac{\pi \cdot K \cdot (H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (31)$$

Выполнив несложные преобразования и учитывая, что

$$\ln \frac{R}{r} = \frac{1}{\lg e} \cdot \lg \frac{R}{r} = 2,303 \cdot \lg \frac{R}{r}, \quad (32)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма,  $e = 2,718$ , получаем зависимость для определения дебита совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения в другой записи:

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot (2 \cdot H - S) \cdot S}{\lg \frac{R}{r}}. \quad (33)$$

**Задача 8.** Грунтовые воды вскрыты скважиной в крупнозернистых песках с коэффициентом фильтрации 10 м/сут, подстилаемых глинами. Мощность водоносного пласта равна 14 м. Диаметр скважины – 305 мм. Понижение уровня воды в скважине при откачке – 4 м. Радиус влияния – 300 м (рис. 15). Определить дебит скважины.

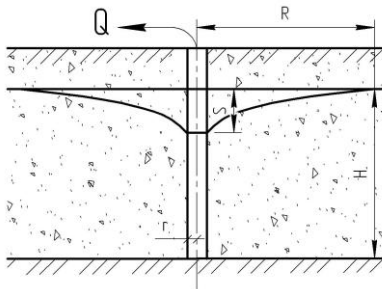


Рис. 15. Расчетная схема к задаче 8.

**Решение.** Определяем дебит скважины по формуле (33):

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot (2 \cdot H - S) \cdot S}{\lg \frac{R}{r}} = \frac{1,36 \cdot 10 \cdot (2 \cdot 14 - 4) \cdot 4}{\lg \frac{300}{0,1525}} = 396,4, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

## 2.2. Дебит совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения

Определение дебита совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения ведется на основе закона Дарси (2) согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 16.

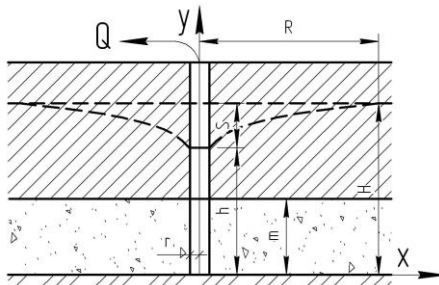


Рис. 16. Схема совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое.

Площадь поперечного сечения потока

$$w = 2 \cdot \pi \cdot x \cdot m. \quad (34)$$

Напорный градиент

$$J = \frac{dy}{dx}. \quad (35)$$

Подставив значения площади потока и напорного градиента в формулу (2), получаем

$$Q = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot x \cdot m \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (36)$$

Перенесем постоянные члены уравнения и переменную  $x$  в левую часть:

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot m} \cdot \frac{dx}{x} = dy. \quad (37)$$

Интегрируем уравнение (37), учитывая, что при увеличении  $x$  от  $r$  до  $R$  напор изменяется от  $h$  до  $H$ :

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot m} \cdot \int_r^R \frac{dx}{x} = \int_h^H dy. \quad (38)$$

Откуда получаем

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot m} (\ln R - \ln r) = H - h. \quad (39)$$

Согласно расчетной схеме

$$H - h = S. \quad (40)$$

Выразив из формулы (39)  $Q$  и учитывая формулу (40), получаем зависимость для определения дебита совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot m \cdot S}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (41)$$

Выполнив несложные преобразования с учетом формулы (32), получаем зависимость для определения дебита совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения в другой записи:

$$Q = \frac{2,73 \cdot K \cdot m \cdot S}{\lg \frac{R}{r}}. \quad (42)$$

**Задача 9.** Буровой скважиной вскрыты напорные воды (рис. 17), залегающие в песчаном пласте мощностью 15,9 м. Напор над подошвой водоупора составляет 24,8 м. Коэффициент фильтрации песков

8 м/сут. Диаметр скважины – 25,4 см. Радиус влияния – 100 м. Вычислить приток воды в скважину при понижении напорного уровня на 5,0 м.

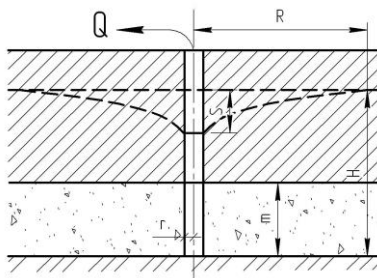


Рис. 17. Расчетная схема к задаче 9.

**Решение.** Определяем дебит скважины по формуле (42):

$$Q = \frac{2,73 \cdot K \cdot m \cdot S}{\lg \frac{R}{r}} = \frac{2,73 \cdot 8 \cdot 15,9 \cdot 5}{\lg \frac{100}{0,1252}} = 598,7, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

**Задача 10.** Совершенная буровая скважина вскрыла в песчаном пласте водоносный горизонт со свободной поверхностью. Водоносный пласт состоит из двух слоев: верхний слой мощностью 9,2 м сложен мелкозернистыми песками с коэффициентом фильтрации 1,3 м/сут, нижний слой мощностью 4,8 м – грубыми песками с галькой с коэффициентом фильтрации 27,4 м/сут. Диаметр скважины равен 254 мм. Радиус влияния – 200 м (рис. 18). Определить дебит скважины при понижении уровня на 3 м.

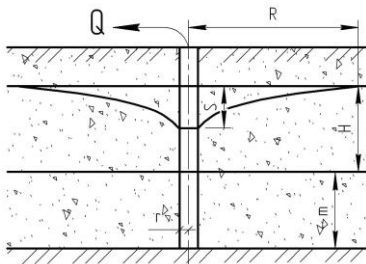


Рис. 18. Расчетная схема к задаче 10.

**Решение.** Дебит скважины определяем как сумму дебитов из верхнего и нижнего пластов, считая для верхнего пласта по зависимости (33), для нижнего пласта – по зависимости (42).

$$Q = \frac{1,36 \cdot 1,3 \cdot (2 \cdot 9,2 - 3) \cdot 3}{\lg \frac{200}{0,127}} + \frac{2,73 \cdot 27,4 \cdot 4,8 \cdot 3}{\lg \frac{200}{0,127}} = 362,4, \text{ м}^3/\text{сут}$$

### 2.3. Расчет водопонижающих скважин

В задачу расчета установки водопонижающих скважин, расположенных по прямоугольному контуру с размерами  $B \times L$  для понижения уровня воды на величину  $S$ , входит определение необходимого количества скважин и максимальной глубины котлована при известных: диаметре водопонижительных скважин  $d$ , мощности водоносного горизонта  $H$ , коэффициенте фильтрации водоносного горизонта  $K$ .

Суммарный расход кольцевого вертикального дренажа

$$Q = n \cdot Q_0, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (43)$$

где  $Q_0$  – дебит каждого колодца кольцевой группы;

$n$  – число колодцев в кольцевом дренаже.

В условиях безнапорных вод дебит каждого колодца совершенного типа при расположении их по периметру кругового контура (рис. 19) может быть определен по формуле В.Н. Щелкачева, приведенной ниже.

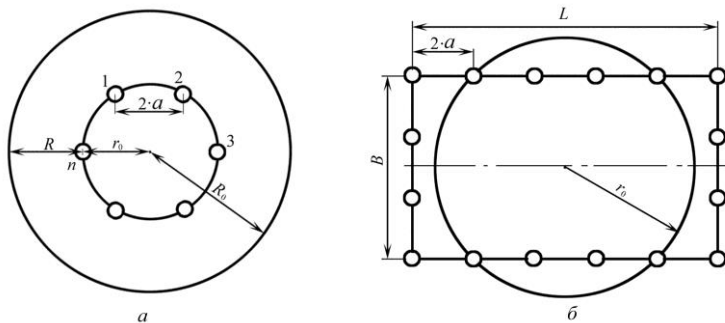


Рис. 19. Схема расположения скважин при круговом контуре питания:  
 а – по окружности; б – по прямоугольному контуру.

$$Q_0 = \frac{1,36 \cdot K \cdot (2 \cdot H - S) \cdot S}{\lg \left( \frac{R_0^n}{n \cdot r_0^{n-1} \cdot r} \right)}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (44)$$

где  $S$  – понижение уровня воды в колодцах, м;

$H$  – мощность безнапорного водоносного горизонта, м;

$R_0$  – радиус депрессии при работе дренажа, м;

$r_0$  – радиус круга, или равновеликого круга, к которому приводится реальный контур;

$r$  – радиус колодцев.

Дебит каждой из артезианских скважин в тех же условиях

$$Q_0 = \frac{2,73 \cdot K \cdot m \cdot S}{\lg \left( \frac{R_0^n}{n \cdot r_0^{n-1} \cdot r} \right)}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (45)$$

где  $m$  – мощность напорного водоносного горизонта, м.

Данные расчеты справедливы при отношении длины к ширине контура  $L/B < 2,5$ . Установка удлиненной формы при отношении длины к ширине контура  $L/B > 2,5$  рассматривается как двухлинейный ряд.

Величина приведенного радиуса  $r_0$  подсчитывается при:

1) неправильной форме котлована в плане и отношении  $L/B < 2 \div 3$  по формуле

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}, \text{ м}, \quad (46)$$

а при отношении  $L/B > 2 \div 3$  – по формуле

$$r_0 = \frac{P}{2 \cdot \pi}, \text{ м}; \quad (47)$$

2) прямоугольной форме котлована и  $L/B < 2,5$  – по формуле Н.К. Гириного:

$$r_0 = \eta \cdot \frac{L+B}{4}, \text{ м}, \quad (48)$$

где  $F$  – площадь котлована,  $\text{м}^2$ ;

$P$  – периметр котлована, м;

$L$  – длина котлована, м;

$B$  – ширина котлована, м;

$\eta$  – коэффициент, значение которого находится в зависимости от отношения  $B/L$  по табл. 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента  $\eta$  от отношения размеров котлована

$B/L$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\eta$	1,0	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18

При откачках из котлованов и водопонижающих установок с приведенным радиусом  $r_0$  до  $40 \div 50$  м радиус влияния  $R_0$  определяется по формуле

$$R_0 = R + r_0, \text{ м}, \quad (49)$$

где  $R$  – радиус влияния одиночной скважины, м.

Величина радиуса влияния скважины для грунтовых безнапорных вод ориентировочно может быть определена по формуле Кусакина:

$$R = 2 \cdot S \cdot \sqrt{H \cdot K}, \text{ м.} \quad (50)$$

Для напорных вод может быть использована формула Зихарда:

$$R = 10 \cdot S \cdot \sqrt{K}, \text{ м.} \quad (51)$$

Водопропускная способность скважины

$$Q_{\text{н\acute{e}а}} = 120 \cdot \pi \cdot r \cdot (H - S) \cdot \sqrt[3]{K}, \text{ м}^3/\text{сут.} \quad (52)$$

Для проектируемых водопонизительных скважин должно выполняться условие  $Q_0 \leq Q_{\text{н\acute{e}а}}$ . Если условие не выполняется, то количество проектируемых водопонизительных скважин (n) необходимо увеличить.

Высота пониженного уровня подземных вод в центре участка может быть приближенно вычислена по формуле «большого колодца»:  
для безнапорных вод (рис. 20)

$$h_{\text{max}} = \sqrt{H^2 - \frac{n \cdot Q_0}{1,36 \cdot K} \cdot \lg \frac{R_0}{r_0}}, \text{ м;} \quad (53)$$

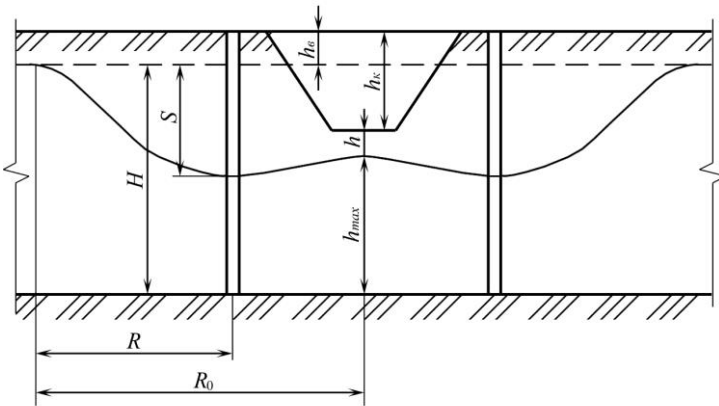


Рис. 20. Расчетная схема дренажа вертикального типа из совершенных колодцев при его работе в безнапорных водах.

для напорных вод (рис. 21)

$$h_{\text{max}} = H - \frac{n \cdot Q_0}{2,73 \cdot K \cdot m} \cdot \lg \frac{R_0}{r_0}, \text{ м,} \quad (54)$$

где H – высота непониженного столба воды над горизонтальной подошвой пласта на участке скважин.

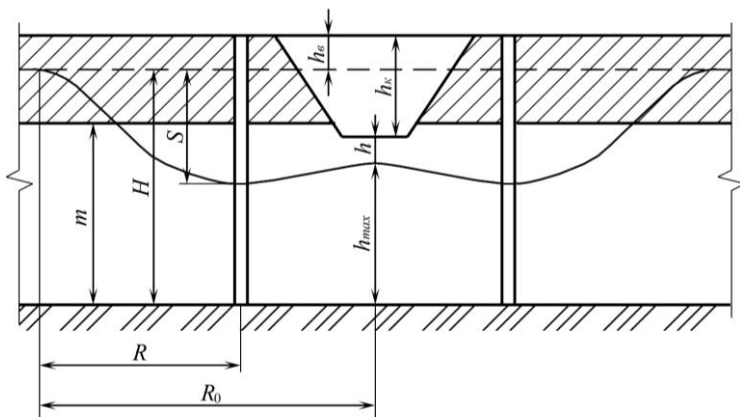


Рис. 21. Расчетная схема дренажа вертикального типа из совершенных колодцев при его работе в напорных водах.

Более точно эта величина определяется по формуле Форхгеймера: для безнапорных вод

$$h_{\max} = \sqrt{H^2 - \frac{n \cdot Q_0}{1,36 \cdot K} \left( \lg R_0 - \frac{1}{n} \cdot \lg(x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n) \right)}, \text{ м}, \quad (55)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – расстояния от соответствующих колодцев до центра участка;

для напорных вод

$$h_{\max} = H - \frac{n \cdot Q_0}{2,73 \cdot K \cdot m} \left( \lg R_0 - \frac{1}{n} \cdot \lg(x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n) \right), \text{ м}. \quad (56)$$

Максимально возможная глубина котлована (из условия обеспечения сухого дна)

$$h_{\hat{e}} = h_{\hat{a}} + H - (h_{\max} + h_{\hat{e}\hat{a}\hat{i}} + 0,5), \text{ м}, \quad (57)$$

где  $h_{\hat{b}}$  – глубина статического уровня воды, м;

$h_{\text{кап}}$  – высота капиллярной каймы, м.

Высота капиллярной каймы для: крупнозернистого песка – 0,05 м; среднезернистого – 0,15–0,35; мелкозернистого – 0,35–1,0; супеси – 1,0–1,5 м.

**Задача 11.** Рассчитать установку совершенных водопонижающих скважин и определить максимальную глубину котлована по следующим исходным данным: длина контура  $L = 100$  м; ширина контура  $B = 50$  м; понижение уровня воды  $S = 5$  м; диаметр водопонижительных скважин  $d = 0,2$  м; мощность водоносного горизонта  $H = 10$  м; глубина

статического уровня  $h_{ст} = 2$  м; водоносный горизонт – мелкий песок; коэффициент фильтрации водоносного горизонта  $k = 2$  м/сут.

**Решение.** Задаемся количеством водопонижительных скважин  $n=6$ . Скважины располагаем на одинаковом расстоянии друг от друга,  $2 \cdot a = 50$  м.

Радиус влияния одиночной скважины

$$R = 2 \cdot S \cdot \sqrt{H \cdot K} = 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{10 \cdot 2} = 44,7, \text{ м.}$$

Величина приведенного радиуса для прямоугольной формы котлована при  $L/B = 100/50 = 2 < 2,5$

$$r_0 = \eta \cdot \frac{L+B}{4} = 1,17 \cdot \frac{100+50}{4} = 43,9, \text{ м.}$$

Радиус депрессии при работе дренажа

$$R_0 = R + r_0 = 44,7 + 43,9 = 88,6, \text{ м.}$$

В условиях безнапорных вод дебит каждой скважины

$$Q_0 = \frac{1,36 \cdot K \cdot (2 \cdot H - S) \cdot S}{\lg\left(\frac{R_0^n}{n \cdot r_0^{n-1} \cdot r}\right)} = \frac{1,36 \cdot 2 \cdot (2 \cdot 10 - 5) \cdot 5}{\lg\left(\frac{88,6^6}{6 \cdot 43,9^5 \cdot 0,1}\right)} = 55,2, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Водопропускная способность скважины

$$Q_{н\hat{e}a} = 120 \cdot \pi \cdot r \cdot (H - S) \cdot \sqrt[3]{K} = 120 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot (10 - 5) \cdot \sqrt[3]{2} = 237,4, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Так как условие  $Q_0 = 55,2 \leq Q_{н\hat{e}a} = 237,4$  выполняется, то количество проектируемых водопонижительных скважин достаточно.

Суммарный расход кольцевого вертикального дренажа

$$Q = n \cdot Q_0 = 6 \cdot 55,2 = 331,2, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Высота пониженного уровня подземных вод в центре участка

$$h_{max} = \sqrt{H^2 - \frac{n \cdot Q_0}{1,36 \cdot K} \cdot \lg \frac{R_0}{r_0}} = \sqrt{10^2 - \frac{6 \cdot 55,2}{1,36 \cdot 2} \cdot \lg \frac{88,6}{43,9}} = 7,93, \text{ м.}$$

Максимально возможная глубина котлована

$$h_k = h_v + H - (h_{max} + h_{кап} + 0,5) = 2 + 10 - (7,93 + 0,5 + 0,5) = 3,07, \text{ м.}$$

## 2.4. Расчет притока воды в котлован

Расчет притока воды в котлован с размерами  $B \times L$  при понижении уровня воды в нем до дна при известных мощности водоносного горизонта  $H$  и коэффициенте фильтрации водоносного горизонта  $K$  ведут в следующей последовательности.

При доведении дна котлована до нижнего водоупора, т.е. для совершенных котлованов, расчет притока воды можно производить в:

1) условиях безнапорных вод как к совершенному грунтовому колодцу при понижении уровня воды в нем до дна по формуле

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot H^2}{lg(R + r_0) - lg r_0}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (58)$$

2) условиях артезианских вод как к грунтово-артезианскому колодцу при понижении уровня воды в нем до дна по формуле

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot (2 \cdot H - m) \cdot m}{lg(R + r_0) - lg r_0}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (59)$$

где  $H$  – мощность безнапорного водоносного горизонта, или высота столба воды над нижним водоупором, м;

$m$  – мощность напорного водоносного горизонта, м;

$R$  – радиус влияния при откачке воды из котлована, отсчитываемый от границы котлована, м;

$r_0$  – приведенный радиус котлована, м.

Карьеры, шахты и котлованы квадратной, прямоугольной или неправильной в плане формы, имеющие отношение их длины к ширине менее 10:1, при определении ожидаемого притока воды к ним можно рассматривать как большие колодцы круглой формы с приведенным радиусом  $r_0$  и расчет притока вести по методу «большого колодца».

Величина приведенного радиуса  $r_0$  подсчитывается при:

1) неправильной форме котлована в плане и отношении  $L/B < 2 \div 3$  по формуле (46), а при отношении  $L/B > 2 \div 3$  – по формуле (47);

2) прямоугольной форме котлована и  $L/B < 2,5$  – по формуле (48).

При откачках из котлованов и водопонижающих установок с приведенным радиусом  $r_0$  до 40÷50 м радиус влияния  $R_0$  вычисляется по формуле (49).

Величина радиуса влияния скважины для грунтовых безнапорных вод ориентировочно может быть определена по формуле (50), а для напорных вод может быть использована формула (51).

**Задача 12.** Рассчитать приток воды в котлован при понижении уровня воды в нем до дна по следующим исходным данным: длина котлована  $L=10$  м; ширина котлована  $B=5$  м; понижение уровня воды  $S=5$  м; мощность водоносного горизонта  $H=5$  м; водоносный горизонт – мелкий песок; коэффициент фильтрации водоносного горизонта  $K=2$  м/сут.

**Решение.** Радиус влияния скважины для грунтовых безнапорных вод

$$R = 2 \cdot S \cdot \sqrt{H \cdot K} = 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{5 \cdot 2} = 31,62, \text{ м.}$$

Приведенный радиус при прямоугольной форме котлована и  $B/L=0,5$

$$r_0 = \eta \cdot \frac{L+B}{4} = 1,17 \cdot \frac{10+5}{4} = 4,39, \text{ м.}$$

Приток воды в котлован в условиях безнапорных вод

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot H^2}{\lg(R+r_0) - \lg r_0} = \frac{1,36 \cdot 2 \cdot 5^2}{\lg(31,62+4,39) - \lg 4,39} = 74,4, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

## 2.5. Расчет притока воды в шахтный колодец

Шахтные колодцы чаще всего применяют для приема относительно неглубоко залегающих вод (обычно на глубине не более 20–30 м) из безнапорных водоносных пластов. Прием воды осуществляется через их дно и частично стенки (рис. 22).

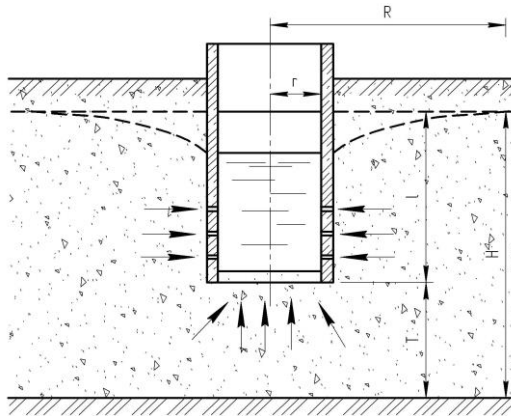


Рис. 22. Схема шахтного колодца.

На дно колодца укладывается обратный фильтр в виде слоев гравия с возрастающей сверху крупностью для предотвращения занесения в колодец частиц песка из водоносного пласта. В стенках колодца в пределах водоносного пласта для увеличения притока воды в колодец оставляют отверстия. Диаметр шахтного колодца обычно не превышает 3–4 м. При устройстве нескольких колодцев их располагают в одну линию и соединяют между собой сифонными, а иногда самотечными трубами. Отбор воды осуществляется насосами из сборного колодца, который часто используется одновременно и для приема воды из грунта.

Приток воды через дно к несовершенному шахтному колодцу при условии, что  $T \geq r$ , может быть определен по формуле, предложенной В.Д. Бабушкиным:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot r \cdot S}{\frac{\pi}{2} + \frac{r}{T} \left( 1 + 1,18 \cdot \lg \frac{R}{4 \cdot H} \right)}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (60)$$

где  $T$  – расстояние от дна колодца до водоупора, м;

$R$  – радиус влияния для безнапорных вод, определяемый по формуле (50).

Приток воды через боковую поверхность

$$Q = \frac{1,36 \cdot K \cdot S \cdot (2 \cdot H - S)}{\lg \frac{R}{r} + 0,43 \cdot \xi}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (61)$$

где  $\xi$  – фильтрационные сопротивления по степени вскрытия водоносного горизонта.

Для безнапорного пласта  $m = H_{\text{нв}} = 0,8 \cdot H$ .

Таблица 2. Значения коэффициента  $\xi$

$\frac{l}{m}$	m/r							
	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	1,2	6,3	17,8	40	47	63	74,5	84,5
0,1	1,0	5,2	12,2	21,8	27,4	35,1	40,9	46,8
0,3	0,65	2,4	4,6	7,2	8,8	10,9	12,4	14,1
0,5	0,33	1,1	2,1	3,2	3,9	4,8	5,5	6,2
0,7	0,12	0,44	0,84	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6
0,9	0,01	0,06	0,15	0,27	0,34	0,43	0,5	0,58

**Задача 13.** Рассчитать приток воды в шахтный колодец через дно и боковые стенки при понижении уровня воды в нем на  $S = 1$  м. Мощность водоносного горизонта  $H = 20$  м; расстояние от дна колодца до водоупора  $T = 15$  м; коэффициент фильтрации водоносного горизонта  $K = 12$  м/сут; радиус колодца  $r = 0,8$  м.

**Решение.** Приток воды через боковую поверхность определяем по формуле (61), вычислив предварительно  $\xi$  по табл. 2.

$$\text{Так, для } \frac{l}{m} = \frac{H-T}{0,8 \cdot H} = \frac{20-15}{0,8 \cdot 20} = 0,31 \text{ и } \frac{m}{r} = \frac{0,8 \cdot H}{r} = \frac{0,8 \cdot 20}{0,8} = 20$$

(см. рис. 22)  $\xi = 3,4$ .

Радиус влияния может быть вычислен по формуле (50):

$$R = 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{20 \cdot 12} = 30,98, \text{ м.}$$

$$Q = \frac{1,36 \cdot 12 \cdot 1 \cdot (2 \cdot 20 - 1)}{\lg \frac{30,98}{0,8} + 0,43 \cdot 3,4} = 208,7, \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Приток воды через дно к несовершенному шахтному колодцу может быть определен по формуле (60):

$$Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 0,8 \cdot 1}{\frac{3,14}{2} + \frac{0,8}{15} \left( 1 + 1,18 \cdot \lg \frac{30,98}{4 \cdot 20} \right)} = 37,7, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Суммарный приток воды в шахтный колодец

$$Q_{\text{сум}} = 208,7 + 37,7 = 246,4, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

### 3. ПРИТОК ВОДЫ К ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ВОДОСБОРАМ

#### 3.1. Расчет притока воды в совершенную дренажную канаву

Приток воды в совершенную дренажную канаву (канал) с одной стороны при горизонтальном залегании водоупора можно вычислить по формуле Дюпюи (14).

В случае притока воды с двух сторон (рис.23) формула примет следующий вид:

$$Q = K \cdot L \cdot \frac{H^2 - h^2}{R}, \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad (62)$$

где  $L$  – длина канала (дренажной канавы), м;

$R$  – ширина полосы влияния, определяемая приближенно по формуле Кусакина (50) или по формуле Лембке, приведенной ниже.

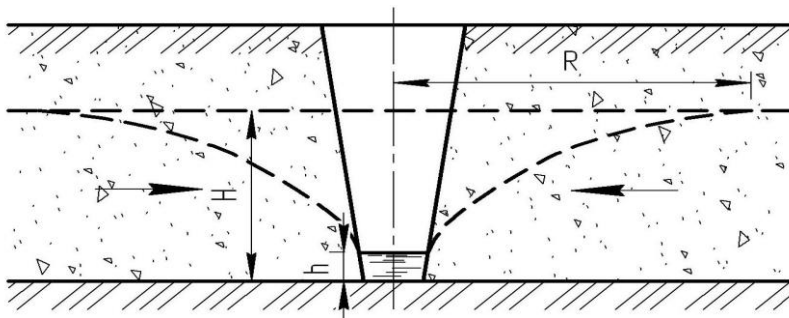


Рис. 23. Схема притока воды в совершенную дренажную канаву.

$$R = \sqrt{\frac{3 \cdot H \cdot K \cdot t}{\mu}}, \text{ м.}, \quad (63)$$

где  $t$  – время осушения, сут;

$\mu$  – водоотдача водоносного горизонта в долях единицы.

Применение формулы Кусакина для определения ширины полосы влияния, выведенной для вертикального водосбора, будет весьма условно и допускается вследствие отсутствия других приемов определения полосы действия горизонтальной дрены.

Расстояние между дренажными каналами вычисляют по формуле

$$L = 2 \cdot (H - S_0) \cdot \sqrt{\frac{k}{W}}, \text{ м}, \quad (64)$$

где  $H$  – мощность водоносного горизонта, м;

$S_0$  – понижение уровня грунтовых вод в междренажном пространстве, м;

$k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;

$W$  – инфильтрация атмосферных осадков, м/сут.

Понижение уровня грунтовых вод в междренажном пространстве (рис. 24) рассчитывают по формуле

$$S_0 = H - \sqrt{h^2 + \frac{W}{k} \cdot a^2}, \text{ м}, \quad (65)$$

где  $h$  – глубина воды в канале, м;

$a$  – половина расстояния между каналами, м.

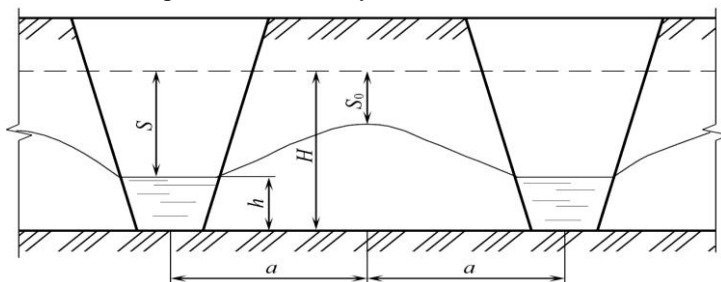


Рис. 24. Схема для определения притока воды к совершенным дренажным каналам большой длины.

Приток воды к каналу (по Роте)

$$Q = W \cdot L \cdot l, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (66)$$

где  $l$  – длина канала, м.

**Задача 14.** В песках проектируется дренажная канава длиной 100 м, доведенная до подстилающих водоупорных глин. Мощность водоносного слоя – 3,0 м, коэффициент фильтрации – 5,0 м/сут. Ширина полосы влияния – 50 м. Уровень воды в канаве – 0,5 м. Определить приток воды в канаву с двух сторон.

**Решение.** Определяем приток воды в канаву по формуле (62):

$$Q = 5 \cdot 100 \cdot \frac{3^2 - 0,5^2}{50} = 87,5, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

**Задача 15.** Определить величину снижения уровня грунтовых вод на осушаемом участке между двумя дренажными канавами. Разведкой установлено, что мелкозернистые пески на глубине 4 м от поверхности подстилаются водонепроницаемыми глинами, а уровень грунтовых вод находится на глубине 0,5 м. Коэффициент фильтрации песков 0,9 м/сут. Количество инфильтрующихся осадков – 2,0 мм/сут. Расстояние между дренажными каналами равно 60 м. Слой воды в каналах – 0,2 м.

**Решение.** Величину снижения уровня грунтовых вод на осушаемом участке определяем по формуле (65):

$$S_0 = H - \sqrt{h^2 + \frac{W}{k} \cdot a^2} = 3,5 - \sqrt{0,2^2 + \frac{0,002}{0,9} \cdot 30^2} = 2,07, \text{ м.}$$

**Задача 16.** Рассчитать расстояние между каналами и определить приток воды в осушители по следующим исходным данным: мощность водоносного горизонта  $H = 10$  м; коэффициент фильтрации водоносного горизонта  $k = 0,5$  м/сут; понижение уровня грунтовых вод в междренажном пространстве  $S_0 = 3,5$  м; инфильтрация атмосферных осадков  $W = 0,02$  м/сут; длина канала  $l = 100$  м.

**Решение.** Расстояние между дренажными каналами вычисляем по формуле (64):

$$L = 2 \cdot (H - S_0) \cdot \sqrt{\frac{k}{W}} = 2 \cdot (10 - 3,5) \cdot \sqrt{\frac{0,5}{0,02}} = 65,0, \text{ м.}$$

Приток воды к каналу определяем по формуле (66):

$$Q = W \cdot L \cdot l = 0,02 \cdot 65 \cdot 100 = 130, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

### 3.2. Расчет притока воды в несовершенную дренаж

Приток воды в несовершенную дренаж с двух сторон при бесконечно большой мощности водоносного слоя (рис. 25) можно определить по формуле А.Н. Костякова:

$$Q = \frac{2 \cdot \alpha \cdot K \cdot H \cdot L}{\ln \frac{R}{r}}, \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad (67)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, вычисляемый по формуле

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{H}{R}, \quad (68)$$

$H$  – глубина погружения центра дрены, м;  
 $L$  – длина дрены, м;  
 $R$  – ширина полосы влияния, определяемая приближенно по формуле Кусакина (50) или по формуле Лембке (63), м;  
 $r$  – радиус дрены, м.

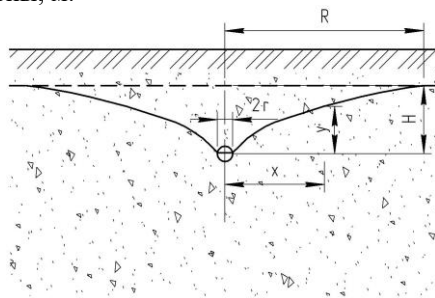


Рис. 25. Схема притока воды в несовершенную дрену.

Ординаты кривой депрессии находятся по формуле

$$y = \frac{q}{\alpha \cdot k} \cdot \ln \frac{x}{r}, \quad (69)$$

где  $q$  – единичный приток воды в дрену с одной стороны, равный

$$q = \frac{Q}{2 \cdot B}, \text{ м}^2/\text{сут} \quad (70)$$

где  $B$  – ширина потока, м.

**Задача 17.** Определить дебит горизонтального дренажа длиной 500 м, закладываемого перпендикулярно движению грунтовых вод для защиты от подтопления промышленного предприятия с заглубленными подвальными помещениями (рис. 26).

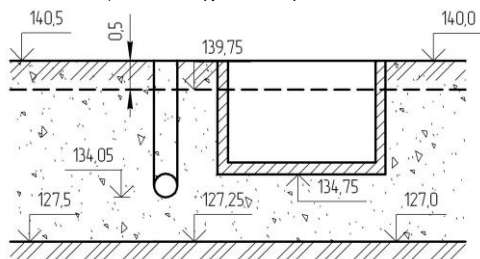


Рис. 26. Схема к расчету защитного дренажа промышленного предприятия.

На участке от поверхности земли до отметок 127–127,5 м залегают аллювиальные мелкозернистые пески с коэффициентом фильтрации

6 м/сут, подстилаемые мергелями, принимаемыми за водоупор. Уровень грунтовых вод залегает на 0,5 м ниже поверхности земли. Средняя отметка уровня грунтовых вод – 139,75 м. Дно дрена расположено ниже пола подвала на 0,7 м (на отметке 134,05 м). Диаметр дрена  $d = 40$  см, глубина наполнения  $h = 20$  см.

**Решение.** Средняя мощность водоносного горизонта

$$H = 139,75 - 127,25 = 12,5, \text{ м.}$$

Глубина заложения дна дрена ниже уровня грунтовых вод

$$h_1 = 139,75 - 134,05 = 5,7, \text{ м.}$$

Требуемое понижение при поддержании уровня воды в дренае на линии оси дрена равно

$$S = H_1 = 5,7 - 0,2 = 5,5, \text{ м.}$$

Ширину полосы влияния дренажа вычисляем по формуле Кусакина (50):

$$R = 2 \cdot 5,5 \cdot \sqrt{12,5 \cdot 6} = 95, \text{ м.}$$

Дебит дренажа, деленный на 2, определяем по формуле (67) (так как приток грунтовых вод идет с одной стороны):

$$Q = \frac{2 \cdot \alpha \cdot K \cdot H_1 \cdot L}{2 \cdot \ln \frac{R}{r}} = \frac{2 \cdot 1,63 \cdot 6 \cdot 5,5 \cdot 500}{2 \cdot \ln \frac{95}{0,2}} = 4370, \text{ м}^3/\text{сут.},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, вычисляемый по формуле (68):

$$\alpha = \frac{3,14}{2} + \frac{5,5}{95} = 1,63.$$

**Задача 18.** Определить дебит и глубину заложения одиночной горизонтальной дрена, проектируемой для понижения уровня грунтовых вод под жилым зданием, расположенной по оси дома, параллельно его длинной стороне (рис. 27). Поперечные размеры дома  $125 \times 20$  м.

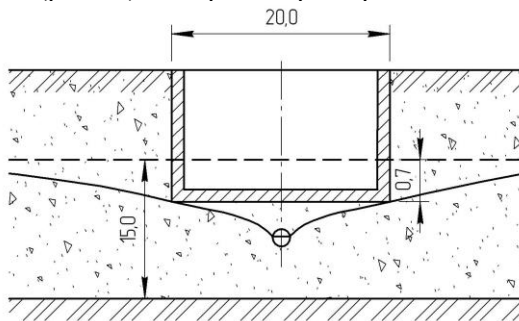


Рис. 27. Схема к расчету защитного дренажа жилого дома.

Водоносный горизонт сложен мелкозернистым глинистым песком с коэффициентом фильтрации 2,7 м/сут, мощностью 15 м, подстилаемым глинами. Пол подвала заглублен ниже уровня воды на 0,7 м. Приток воды в дрена диаметром 250 мм осуществляется с двух сторон.

**Решение.** Задаемся понижением уровня воды у дрены  $S = 3$  м. Ширину полосы действия дренажа вычисляем по формуле Кусакина (50):

$$R = 2 \cdot 3,0 \cdot \sqrt{15 \cdot 2,7} = 38, \text{ м.}$$

Дебит дренажа определяем по формуле (67):

$$Q = \frac{2 \cdot 1,65 \cdot 2,7 \cdot 3 \cdot 125}{\ln \frac{38}{0,125}} = 584,4, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, вычисляемый по формуле (68):

$$\alpha = \frac{3,14}{2} + \frac{3}{38} = 1,65.$$

Единичный приток воды в дрена с одной стороны определяем по формуле (70):

$$q = \frac{584,4}{2 \cdot 125} = 2,34, \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Ординаты кривой депрессии на расстоянии  $x = 10$  м от дрены находим по формуле (69):

$$y = \frac{2,34}{1,65 \cdot 2,7} \cdot \ln \frac{10}{0,125} = 2,30, \text{ м.}$$

Как видно из расчета, уровень грунтовых вод на расстоянии 10 м от оси здания будет залегать на уровне пола.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПОРОД

Вода в порах грунтов может передвигаться под влиянием ряда причин: силы тяжести, внешнего давления, капиллярных сил, адсорбционных сил, развивающихся на поверхности раздела твердых частиц и воды, промерзания породы, давления газов и др. При выполнении инженерно-геологических исследований практический интерес представляет передвижение воды под влиянием силы тяжести и разности напоров.

Численной характеристикой водопроницаемости грунтов является коэффициент фильтрации, представляющий собой скорость фильтрации при градиенте напора, равном единице.

Для определения коэффициента фильтрации грунтов существуют три группы методов:

полевые – при помощи опытных гидрогеологических работ (откачек, наливов и др.);

лабораторные – на приборах различной конструкции;

расчетные – по эмпирическим формулам с использованием данных гранулометрического состава и пористости грунта.

Наиболее полную характеристику водопроницаемости грунта дают полевые опытные работы. Лабораторные методы определения коэффициента фильтрации характеризуют водопроницаемость отдельных «точек» водоносного горизонта. Определение коэффициента фильтрации по данным гранулометрического состава и пористости грунта является приближенным и применяется только для песков.

#### 4.1. Определение коэффициента фильтрации по результатам опытной кустовой откачки

Опытный куст состоит из центральной и двух наблюдательных скважин, расположенных в одном с ней створе (по лучу). Приступая к решению задачи, прежде всего необходимо выбрать расчетную схему к определению коэффициента фильтрации. Выбор расчетной схемы обуславливается гидравлическими свойствами водоносного горизонта (напорный, безнапорный).

Тип водоносного горизонта определяет выбор расчетной формулы для вычисления коэффициента фильтрации. Тип водоносного горизонта можно выяснить, сопоставляя глубину появления воды в скважине в процессе бурения и глубину установившегося уровня.

Если эти два показателя совпадают по величине, то подземные воды относятся к грунтовым (безнапорным) – рис. 28, а если глубина установившегося уровня меньше, чем глубина появления воды в стволе скважины, то встречные воды относятся к напорным – рис. 29.

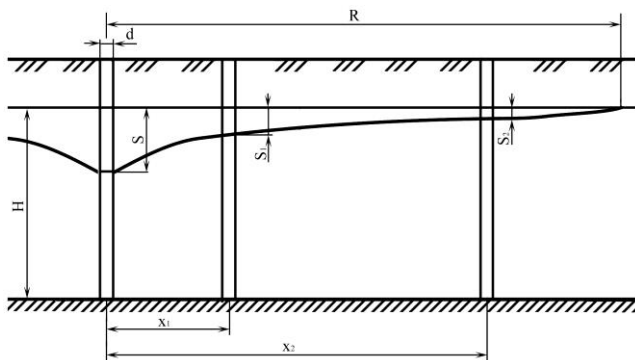


Рис. 28. Гидрогеологический разрез по лучу скважин в безнапорном водоносном горизонте.

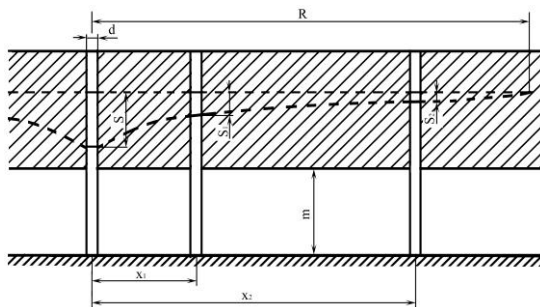


Рис. 29. Гидрогеологический разрез по лучу скважин в напорном водоносном горизонте.

«Совершенство» скважины определяется степенью вскрытия водоносного горизонта. Если скважина проходит всю толщу водоносного горизонта до водоупора, ее называют совершенной, если заканчивается в толще водоносного горизонта, не доходя до водоупора, – несовершенной. В данной задаче для любого варианта примите совершенный тип скважины по степени вскрытия водоносного горизонта.

Основные расчетные формулы для определения коэффициента фильтрации водоносных пород ( $K_{\phi}$ ) по методу кустовых откачек из совершенной скважины приводятся ниже.

**а) для безнапорных грунтовых вод**

Расчет по центральной и одной наблюдательной скважинам:

$$K_1 = \frac{0,733 \cdot Q \cdot \lg\left(\frac{x_1}{r}\right)}{(2H - S - S_1)(S - S_1)}, \text{ м/сут,} \quad (71)$$

где  $K_1$  – коэффициент фильтрации на участке центральная – первая наблюдательная скважины, м/сут;

$Q$  – дебит центральной скважины, м<sup>3</sup>/сут;

$x_1$  – расстояние от центральной до первой наблюдательной скважины, м;

$r$  – радиус центральной скважины, м;

$H$  – мощность безнапорного водоносного горизонта, м;

$S, S_1$  – понижение уровня подземных вод в центральной и первой наблюдательной скважинах, м.

Расчет по двум наблюдательным скважинам:

$$K_2 = \frac{0,733 \cdot Q \cdot \lg\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}, \text{ м/сут,} \quad (72)$$

где  $K_2$  – коэффициент фильтрации на участке первая наблюдательная – вторая наблюдательная скважины, м/сут;

$x_2$  – расстояние от центральной до второй наблюдательной скважины, м;

$S_2$  – понижение уровня подземных вод во второй наблюдательной скважине, м.

**б) для напорных вод**

Расчет по центральной и одной наблюдательной скважинам:

$$K_1 = \frac{0,366 \cdot Q \cdot \lg\left(\frac{x_1}{r}\right)}{m(S - S_1)}, \text{ м/сут.} \quad (73)$$

Расчет по двум наблюдательным скважинам:

$$K_2 = \frac{0,366 \cdot Q \cdot \lg\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}{m(S_1 - S_2)}, \text{ м/сут,} \quad (74)$$

где  $m$  – мощность напорного водоносного горизонта, м.

После определения значений  $K$  на двух участках находят его среднее значение:

$$K_{cp} = \frac{K_1 + K_2}{2}. \quad (75)$$

**Задача 19.** Вычислить средний коэффициент фильтрации водоносного горизонта по результатам опытной кустовой откачки. Отметка появления уровня воды – 125 м. Отметка установившегося уровня – 125 м. Диаметр центральной скважины – 0,152 м. Мощность водоносного горизонта – 12,5 м. При откачке воды из центральной скважины с дебитом 600 м<sup>3</sup>/сут уровень воды в ней понизился на 2,5 м. Расстояние от центральной скважины до первой – 25 м, понижение уровня воды – 0,47 м. Расстояние от центральной скважины до второй – 60 м, понижение уровня воды – 0,24 м.

**Решение.** Сравнивая отметки появления воды и установившегося уровня, определяем, что в нашем случае водоносный горизонт безнапорный (см. рис. 28).

Коэффициент фильтрации на участке центральная – первая наблюдательная скважины для безнапорного горизонта находим по формуле (71):

$$K_1 = \frac{0,733 \cdot 600 \cdot \lg\left(\frac{25}{0,076}\right)}{(2 \cdot 12,5 - 2,5 - 0,47)(2,5 - 0,47)} = 24,74, \text{ м/сут.}$$

Коэффициент фильтрации на участке первая наблюдательная – вторая наблюдательная скважины вычисляем по формуле (72):

$$K_2 = \frac{0,733 \cdot 600 \cdot \lg\left(\frac{60}{25}\right)}{(2 \cdot 12,5 - 0,47 - 0,24)(0,47 - 0,24)} = 29,95, \text{ м/сут.}$$

После определения значений  $K$  на двух участках находим его среднее значение по формуле (75):

$$K_{\text{ср}} = \frac{24,74 + 29,95}{2} = 27,35, \text{ м/сут.}$$

#### 4.2. Определение коэффициента фильтрации по результатам инфильтрации из шурфов

*Инфильтрацией* называется процесс просачивания воды в горные породы, поры и трещины которой не заполнены водой. Данный процесс отличается большой сложностью и происходит при одновременном действии гидравлического напора налитой в шурф воды и капиллярного всасывания воды в грунт. Вследствие этого нет точных методов обработки полевых данных по опытной инфильтрации воды в грунт. Каждый из получивших распространение методов – А.К.Болдырева, Е.А. Замарина, Н.С. Нестерова – имеет свои недостатки и не учитывает полностью или частично влияния капиллярных сил.

Большая или меньшая точность полученного коэффициента фильтрации при применении различных методов его определения в значительной мере зависит от характера испытываемого грунта.

Метод Н.С. Нестерова применим в песках, супесях и суглинках, однако следует иметь в виду, что он дает несколько завышенный коэффициент фильтрации.

Суть данного метода состоит в следующем. В дно опытного шурфа на глубину 5–8 см концентрично вдавливают, не нарушая плотности грунта, два стальных цилиндра высотой 20 см. Диаметр внутреннего цилиндра – 25 см, внешнего – 50 см. Общий вид установки приведен на рис. 30.

Во внутренний цилиндр и кольцевой зазор между стенками внутреннего и внешнего цилиндров наливается вода слоем 10 см и поддерживается в течение всего опыта строго на одинаковом уровне. Поддержание одинакового постоянного уровня возможно путем установки двух сосудов Мариотта емкостью 3–5 л. Опыт продолжается до стабилизации расхода воды.

Коэффициент фильтрации вычисляется по формуле

$$K = \frac{Q}{F \cdot J}, \text{ м/сут,} \quad (76)$$

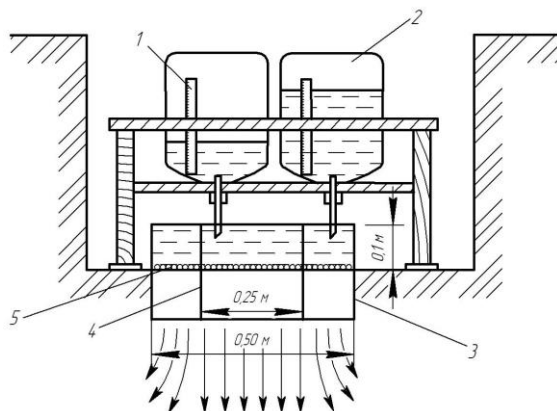


Рис. 30. Общий вид опытной установки по Н.С. Нестерову:  
 1 – мерная линейка; 2 – бутылка; 3 – внешнее кольцо;  
 4 – внутреннее кольцо; 5 – слой гравия.

где  $Q$  – установившийся расход воды,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  
 $F$  – площадь дна шурфа, ограниченная внутренним цилиндром,  $\text{м}^2$ ;  
 $J$  – градиент напора.

$$J = \frac{H_0 + h_k + h}{h}, \quad (77)$$

где  $H_0$  – высота слоя воды в кольцах,  $H_0 = 0,1$  м;  
 $h_k$  – капиллярное давление, м, принимаемое по табл. 3.  
 $h$  – глубина промачивания, м.

Т а б л и ц а 3. Значения капиллярного давления для различных пород

Порода	Капиллярное давление, м
Суглинок	0,8–1,0
Супесь	0,4–0,6
Песок мелкозернистый глинистый	0,3
Песок мелкозернистый чистый	0,2
Песок среднезернистый	0,1
Песок крупнозернистый	0,05

Глубина промачивания определяется сразу после окончания опыта. Для этого в центре шурфа пробуривается скважина глубиной 3–4 м. В 3–5 м от шурфа на эту же глубину проходит вторая скважина. Из обеих скважин отбираются образцы через каждые 30 см и определяется влажность грунта. Сопоставление значений влажности позволяет установить глубину просачивания воды в процессе опыта, считая от дна шурфа.

**Задача 20.** Определить коэффициент фильтрации суглинков по результатам опытного налива воды в шурф глубиной 0,5 м по методу Н.С. Нестерова. Грунтовые воды вскрыты скважиной на глубине 8,5 м. Установившийся фильтрационный расход равен 0,0072 м<sup>3</sup>/сут, глубина просачивания – 3,25 м. Диаметр внутреннего кольца – 0,25 м, внешнего – 0,5 м. Толщина слоя воды в кольцах – 0,1 м.

**Решение.** Площадь поперечного сечения внутреннего кольца

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,049, \text{ м}^2.$$

Градиент напора вычисляем по формуле (77). Капиллярное давление принимаем равным 0,9 м по табл. 3 для суглинка.

$$J = \frac{0,1 + 0,9 + 3,25}{3,25} = 1,31.$$

Коэффициент фильтрации определяем по формуле (76):

$$K = \frac{0,0072}{0,049 \cdot 1,31} = 0,11, \text{ м/сут.}$$

#### 4.3. Определение коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам

Опытными работами установлена зависимость коэффициента фильтрации от механического состава породы, ее пористости и фильтрующей через нее воды. Определение коэффициента фильтрации горных пород по гранулометрическому составу является самым дешевым и простым методом, дающим достаточно удовлетворительную характеристику водопроницаемости некоторых разновидностей их.

Эмпирические формулы чаще применяются при гидрогеологических изысканиях для начальных стадий проектирования, когда необходимо дать общую гидрогеологическую характеристику значительной площади со сравнительной оценкой отдельных участков.

При детальном исследовании этот способ является дополнительным к полевым методам. Его следует особенно широко применять при детальной разведке месторождений полезных ископаемых, источников водоснабжения, участков гидротехнического строительства, когда требуется определить водопроницаемость пород, залегающих на большой площади, тогда как детальное изучение его опытными откачками практически невозможно.

Приведенные ниже эмпирические формулы основаны на данных гранулометрического состава и пористости грунтов без учета структуры грунта и физико-химических процессов, происходящих в грунте при фильтрации воды через него, поэтому они могут применяться лишь для песчаных грунтов. Использование этих формул для опреде-

ления водопроницаемости связных суглинистых грунтов, так же, как для гравелистых и галечниковых пород, не может быть рекомендовано.

Для песков разного состава лучшие результаты дает формула И.И. Заурбрея. Для глинистых песков и супесей можно пользоваться формулой Крюгера. Формулы Крюгера, Замарина и Цункера чаще дают заниженные значения коэффициента фильтрации по сравнению с определенными в полевых условиях, причем это занижение бывает меньшим для глинистых песков.

**Формула Хазена** применима для песков, действующий диаметр которых колеблется в пределах от 0,1 до 3 мм и коэффициент неоднородности меньше 5.

Формула Хазена имеет следующий вид:

$$K = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot t), \text{ м/сут} \quad (78)$$

где  $d_{10}$  – действующий диаметр частиц (диаметр, меньше которого в грунте содержится 10 % частиц по массе);

$t$  – температура фильтрующейся воды;

$C$  – эмпирический коэффициент чистоты и однородности песков, вычисляемый по формуле О.К. Ланге, в зависимости от пористости:

$$C = 400 + 40 \cdot (n - 26), \quad (79)$$

где  $n$  – пористость грунта, %.

**Формула Сликтера** применима для песков с действующим диаметром от 0,01 до 5 мм.

Формула Сликтера для определения коэффициента фильтрации при температуре 0°С имеет следующий вид:

$$K = 496 \cdot M \cdot d_{10}^2, \quad (80)$$

где  $M$  – коэффициент, зависящий от пористости, определяемый по табл. 4.

Таблица 4. Зависимость коэффициента  $M$  от пористости

Пористость $n$ , %	$M$	Пористость $n$ , %	$M$
26	0,1187	37	0,3808
27	0,1350	38	0,4154
28	0,1517	39	0,4524
29	0,1684	40	0,4922
30	0,1905	41	0,5339
31	0,2122	42	0,5789
32	0,2356	43	0,6267
33	0,2601	44	0,6776
34	0,2878	45	0,7295
35	0,3163	46	0,7838
36	0,3473	47	0,8456

Для приведения найденного  $K$ , соответствующего  $0^\circ\text{C}$ , к температуре опыта, необходимо умножить это значение на величину температурной поправки Пуазейля:

$$\tau = 1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2. \quad (81)$$

**Формула Крюгера** при температуре фильтрующейся воды  $10^\circ\text{C}$  выглядит следующим образом:

$$K_{10} = 322 \cdot \frac{n}{(1-n)^2} \cdot d_q^2, \text{ м/сут}, \quad (82)$$

где  $n$  – пористость грунта в долях единицы;

$d_q$  – действующий диаметр, определяемый по формуле Крюгера;

$$d_q = \frac{100}{\sum_1^N \frac{g_i}{d_{срi}}}, \text{ см}, \quad (83)$$

где  $N$  – число фракций, полученных при анализе;

$g_i$  – доля участия фракции порядка  $i$  в составе грунта, %;

$d_{срi}$  – средний диаметр фракции, см;

$$d_{срi} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}, \text{ см}. \quad (84)$$

Частицы менее  $0,01$  мм при вычислении по формулам Крюгера, как и по формулам Замарина и Цункера, следует брать за одну фракцию, учитывая, что они обычно располагаются на поверхности песчаных зерен и входят в состав агрегатов.

**Формула Замарина** при температуре фильтрующейся воды  $10^\circ\text{C}$  имеет такой вид:

$$K_{10} = 5572 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \alpha^2 \cdot d_z^2, \text{ м/сут}, \quad (85)$$

где  $n$  – пористость песка в долях единицы;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от пористости и учитывающий роль «мертвой воды», не участвующей в фильтрации;

$$\alpha = 1,275 - 1,5 \cdot n, \quad (86)$$

$d_z$  – действующий диаметр по Замарину, мм.

Действующий диаметр

$$d_z = \frac{100}{\frac{3 \cdot g_1}{2 \cdot d_1} + \sum_2^N \left( \frac{g_i}{d_i - d_{i-1}} \cdot \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} \right)}, \text{ мм} \quad (87)$$

где  $g_1$  – доля участия фракции с размером от  $d_1$  до  $0$ ;

$g_i$  – доля участия фракции порядка  $i$  в составе грунта, %;

$N$  – число фракций, на которые разделен грунт для расчета;

$d_i$  и  $d_{i-1}$  – наибольший и наименьший диаметры зерен во фракции порядка  $i$ , мм;

$d_1$  – диаметр наименьшей фракции, мм.

Формула Замарина имеет преимущество по сравнению с другими формулами в том, что более правильно учитывает вероятность распределения частиц песка и роль отдельных их групп.

**Формула Цункера** при температуре фильтрующейся воды имеет следующий вид:

$$K = c \cdot \left( \frac{n}{1-n} \right)^2 \cdot \frac{1}{U^2} \cdot (1 + 0,034 \cdot t), \text{ м/сут}, \quad (88)$$

где  $c$  – коэффициент формы зерен, принимаемый по табл. 5;

$n$  – пористость грунта в долях единицы;

$t$  – температура фильтрующейся воды, °С;

$U$  – удельная поверхность, т. е. отношение суммарной поверхности частиц данного грунта к суммарной поверхности грунта, сложенного частицами диаметром 1 мм;

$$U = \frac{3 \cdot g_1}{2 \cdot d_1} + \sum_2^N g_i \cdot \frac{\left( \frac{1}{d_{i-1}} - \frac{1}{d_i} \right)}{\ln d_i - \ln d_{i-1}}. \quad (89)$$

Таблица 5. Значения коэффициента  $c$

Характер песка	$c$
Равномерно зернистый песок с окатанными гладкими зернами	1160
Равномерно зернистый песок с угловатыми слабо окатанными зернами	680
Неравномерно зернистый песок с окатанными зернами	580
Неравномерно зернистый песок с угловатыми шероховатыми зернами	340

Преимущество формулы Цункера состоит в том, что она учитывает коэффициентом форму зерен и степень однородности песка.

**Формула Зауэрбрея** при температуре фильтрующейся воды 10°С имеет такой вид:

$$K_{10} = \beta \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2, \text{ м/сут}, \quad (90)$$

где  $\beta$  – эмпирический коэффициент, зависящий от однородности и крупности частиц песка и равный от 1150 до 3010 (обычно 2880–3010);

$d_{17}$  – диаметр, меньше которого в грунте содержится 17% частиц по массе, мм.

Формула Зауэрбрея применима для определения коэффициента фильтрации мелко-, средне- и крупнозернистых, чистых и глинистых песков.

**Задача 21.** Определить коэффициент фильтрации песчаного грунта, если пористость его равна 0,34, действующий диаметр – 0,05 мм. Температура фильтрующейся воды равна 17°C.

**Решение.** Коэффициент фильтрации вычисляем по формулам Хазена (78) и Сликтера (80).

Эмпирический коэффициент чистоты и однородности песков, рассчитываемый по формуле О.К. Ланге (79), в зависимости от пористости

$$C = 400 + 40 \cdot (34 - 26) = 720.$$

Коэффициент фильтрации, найденный по формуле Хазена,

$$K_{17} = 720 \cdot 0,05^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot 17) = 2,18, \text{ м/сут.}$$

Для вычисления коэффициента фильтрации по формуле Сликтера определяем по табл. 4 коэффициент М. Для пористости грунта, равной 0,34, коэффициент М = 0,2878.

Коэффициент фильтрации, найденный по формуле Сликтера, при температуре 0°C

$$K_0 = 496 \cdot 0,2878 \cdot 0,05^2 = 0,36, \text{ м/сут.}$$

Для приведения найденного К, соответствующего 0°C, к температуре 17°C, необходимо умножить это значение на величину температурной поправки Пуазейля (81):

$$\tau = 1 + 0,0337 \cdot 17 + 0,000221 \cdot 17^2 = 1,64.$$

Коэффициент фильтрации при температуре 17°C

$$K_{17} = 0,36 \cdot 1,64 = 0,60, \text{ м/сут.}$$

#### **4.4. Определение коэффициента фильтрации по результатам лабораторных испытаний грунтов**

Лабораторные методы можно разделить на методы определения коэффициента фильтрации при переменном (трубка Каменского) и постоянном напоре (прибор КФ-01).

##### **4.4.1. Определение коэффициента фильтрации при переменном напоре с помощью трубки Каменского**

Прибор предназначен для определения приближенных значений коэффициента фильтрации песчаных пород нарушенного сложения. Схема установки приведена на рис. 31.

Испытания проводят в следующей последовательности. Устанавливают трубку в батарейный стакан и загружают испытываемым грунтом на высоту 10 см.

Наполнение трубки песком производят слоями по 2–3 см и сопровождают легкой трамбовкой и насыщением водой, для чего в батарей-

ный стакан подливают воду в таком количестве, чтобы ее уровень был выше уровня песка в трубке на 1–2,5 см, и ожидают момента появления в трубке слоя воды 3–5 мм.

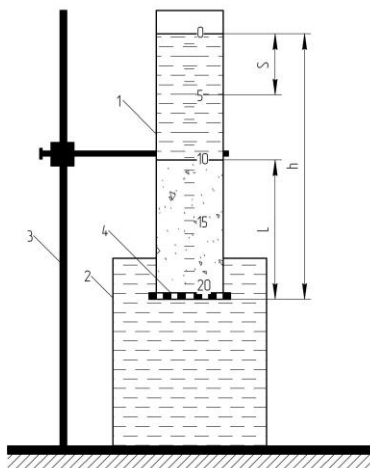


Рис. 31. Трубка Каменского:

1 – стеклянная трубка; 2 – сосуд для воды; 3 – штатив; 4 – сетка.

В трубку сверху наливают воду до уровня на 1–2 см выше черты 0. Далее вынимают трубку из батарейного стакана и закрепляют ее на штативе. Отмечают время понижения уровня воды в трубке от деления 0 до делений 3, 5, 8 см. В конце опыта измеряют температуру воды.

Коэффициент фильтрации определяют по формуле

$$K = \frac{864 \cdot L}{T} \cdot \varphi\left(\frac{S}{h}\right), \text{ м/сут.} \quad (91)$$

где  $L$  – длина пути фильтрации (толщина слоя песка), см;

$T$  – время понижения уровня воды в трубке от деления 0 до делений 3, 5, 8 см, с;

$S$  – величина понижения уровня воды в трубке за время  $T$ , см;

$h$  – первоначальный напор, см;

$\varphi\left(\frac{S}{h}\right)$  – функция, зависящая от отношения  $S/h$ ;

$$\varphi\left(\frac{S}{h}\right) = -\ln\left(1 - \frac{S}{h}\right). \quad (92)$$

Полученное в процессе опыта значение коэффициента фильтрации приводится к температуре 10°C путем умножения на температурную поправку

$$\tau = 0,7 + 0,03 \cdot t. \quad (93)$$

#### 4.4.2. Определение коэффициента фильтрации при постоянном напоре с помощью прибора КФ-01

Прибор предназначен для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов с нарушенной и ненарушенной структурой при постоянном градиенте напора. Схема прибора приведена на рис. 32.

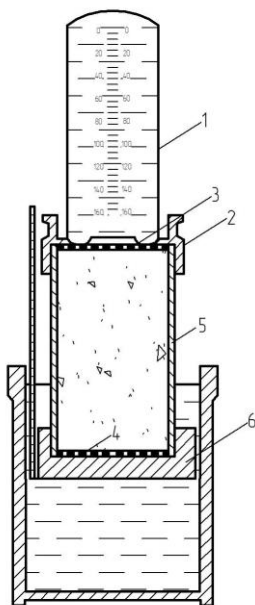


Рис. 32. Прибор КФ-01:  
1 – стеклянный мерный баллон; 2 – верхняя муфта;  
3 – верхняя сетка; 4 – нижняя сетка; 5 – металлический цилиндр; 6 – нижняя муфта.

Испытания проводят в следующей последовательности. Устанавливают трубку в батарейный стакан и загружают испытываемым грунтом на высоту металлического цилиндра. Заполнение песком производят аналогично опыту с трубкой Каменского. Если требуется определить коэффициент фильтрации в образце с ненарушенной структурой, то трубку вдавливают в грунт. После заполнения цилиндра грунтом на

него помещают сетку и надевают верхнюю муфту. Заполняют мерный баллон водой, предварительно измерив ее температуру, зажимают его отверстие большим пальцем и, быстро опрокинув, вставляют в верхнюю муфту так, чтобы горлышко баллона соприкасалось с латунной сеткой.

В таком виде мерный баллон автоматически поддерживает над грунтом постоянный уровень воды – 1–2 мм. Отмечают по шкале уровень воды в мерном баллоне и засекают время (для среднезернистых песков – не менее 50–100 с, для глинистых – 250–500 с).

Коэффициент фильтрации при температуре опыта вычисляют по формуле

$$K = \frac{W \cdot 864}{T \cdot F \cdot J}, \text{ м/сут,} \quad (94)$$

где  $W$  – объем воды, профильтровавшейся за время  $T$ , см<sup>3</sup>;

$T$  – время фильтрации, с;

$F$  – площадь поперечного сечения трубки,  $F = 25 \text{ см}^2$ ;

$J$  – градиент напора.

Для приведения значения коэффициента фильтрации к температуре 10°С используют формулу (93).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скабалланович, И.А. Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод / И.А. Скабалланович. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн. делу, 1960. 408 с.
2. Климентов, П.П. Сборник задач по динамике подземных вод / П.П. Климентов. М.: Гос. изд-во геол. лит., 1961. 128 с.
3. Гармонов, И.В. Основные задачи по динамике подземных вод / И.В. Гармонов, А.В. Лебедев. М.: Гос. изд-во геол. лит., 1952. 244 с.
4. Справочник гидрогеолога / М.Е. Альтовский [и др.]; под общ. ред. М.Е. Альтовского. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 616 с.
5. Гавич, И.К. Сборник задач по общей гидрогеологии / И.К. Гавич, А.А. Лучшева, С.М. Семенова–Ерофеева. М.: Недра, 1985. 413 с.
6. Толстой, М.П. Геология и гидрогеология / М.П. Толстой, В.А. Малыгин. М.: Недра, 1988. 318 с.
7. Кирюхин, В.А. Общая гидрогеология / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, А.Н. Павлов. Л.: Недра, 1988. 328 с.
8. Михайлов, Л.Е. Гидрогеология / Л.Е. Михайлов. Л.: Гидрометиздат, 1985. 315 с.
9. Шварцев, С.Л. Общая гидрогеология: учебник для вузов / С.Л. Шварцев. М.: Недра, 1996. 425 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Движение воды в водоносных пластах.....	4
1.1. Расход плоского безнапорного потока при горизонтальном водоупоре.....	5
1.2. Расход плоского безнапорного потока при наклонном водоупоре.....	8
1.3. Расход плоского напорного потока в пласте постоянной мощности.....	10
1.4. Расход плоского напорного потока в пласте переменной мощности.....	11
1.5. Движение подземных вод в слоистых пластах.....	13
2. Приток воды к вертикальным водосборам.....	15
2.1. Дебит совершенной скважины в безнапорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения.....	16
2.2. Дебит совершенной скважины в напорном однородном водоносном слое при установившемся режиме движения.....	18
2.3. Расчет водопонижающих скважин.....	21
2.4. Расчет притока воды в котлован.....	25
2.5. Расчет притока воды в шахтный колодец.....	27
3. Приток воды к горизонтальным водосборам.....	29
3.1. Расчет притока воды в совершенную дренажную канаву.....	29
3.2. Расчет притока воды в несовершенную дренажную канаву.....	31
4. Определение коэффициента фильтрации пород.....	34
4.1. Определение коэффициента фильтрации по результатам опытной кустовой откачки.....	35
4.2. Определение коэффициента фильтрации по результатам инфильтрации из шурфов.....	38
4.3. Определение коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам.....	40
4.4. Определение коэффициента фильтрации по результатам лабораторных испытаний грунтов.....	44
4.4.1. Определение коэффициента фильтрации при переменном напоре с помощью трубки Каменского.....	44
4.4.2. Определение коэффициента фильтрации при постоянном напоре с помощью прибора КФ-01.....	46
Литература.....	47

Учебно-методическое издание

**Алексей Александрович Боровиков  
Наталья Васильевна Васильева**

**ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Методические указания для решения задач  
по дисциплинам «Инженерная геология  
и гидрогеология» и «Геология и буровое дело»

Редактор-корректор Е.В. Ковалева  
Техн. редактор Н.К. Шапунова

ЛИ № 348 от 16.06.2009. Подписано в печать 15.04.2011.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага для множительных аппаратов.

Печать ризографическая. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,63.

Тираж 100 экз. Заказ . Цена 3650 руб.

---

Редакционно-издательский отдел БГСХА  
213407, г. Горки Могилевской обл., ул. Студенческая, 2  
Отпечатано в отделе издания учебно-методической литературы,  
ризографии и художественно-оформительской деятельности БГСХА  
г. Горки, ул. Мичурина, 5