

П. В. ГОРДЕЕВ,
В. А. ШЕМЕЛИНА, О. К. ШУЛЯКОВА

РУКОВОДСТВО
К ПРАКТИЧЕСКИМ
ЗАНЯТИЯМ
ПО
ГИДРОГЕОЛОГИИ

П. В. ГОРДЕЕВ, В. А. ШЕМЕЛИНА,
О. К. ШУЛЯКОВА

РУКОВОДСТВО
К
ПРАКТИЧЕСКИМ
ЗАНЯТИЯМ
ПО
ГИДРОГЕОЛОГИИ

18850

Допущено Министерством высшего
и среднего специального
образования СССР
в качестве учебного пособия
для учащихся геологических
специальностей средних
специальных учебных заведений



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
1981



ББК 26.326

Г 68

Рецензенты: М. П. Кузьмин, зам. директора по учебной работе Московского областного геологоразведочного техникума;
Н. Я. Бондарь

Гордеев П. В., Шемелина В. А., Шулякова О. К.

Г68 Руководство к практическим занятиям по гидро-
геологии: Учеб. пособие для учащихся гидрогеоло-
гической специальности геологоразведочных техни-
кумов. — М., Высш. школа, 1981—152 с., ил.

30 к.

В книге приведены основные сведения о круговороте воды в природе, водных свойствах пород, химическом составе воды, основные положения динамики подземных вод, кратко освещены вопросы методики бурения скважин на воду и проведения опытных работ. Все вопросы рассматриваются на основе конкретных примеров.

Работа может быть полезна для проведения лабораторных и практических занятий по гидрогеологии учащимися специальности техника разведки и геология, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых.

Г 20806—415
001(01)—81 235—81 1904060000 ББК 26.326
552

Павел Васильевич Гордеев,
Валентина Александровна Шемелина,
Ольга Кондратьевна Шулякова

РУКОВОДСТВО К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ
ПО ГИДРОГЕОЛОГИИ

Редактор И. М. Шагирова. Младший редактор Л. К. Архипова. Ху-
дожник Ю. С. Шлепер. Художественный редактор Т. А. Коленкова.
Технический редактор Н. В. Яшукова. Корректор С. К. Завьялова

ИБ № 2942

Изд. № Е—385. Сдано в набор 27.04.81. Подп. в печать 06.11.81. Т-25996.
Формат 60×90/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать
высокая. Объем 9,5 усл. печ. л. 9,75 усл. кр.-отт. 9,75 уч.-изд. л. Тираж
7000 экз. Зак. 1858. Цена 30 коп.

Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Подземные воды — одно из важнейших полезных ископаемых, используемое в широких масштабах для хозяйствственно-питьевого и технического водоснабжения, орошения и обводнения пастбищ, для лечебных и теплоэнергетических целей. Потребление подземных вод и затраты на их разведку увеличиваются из года в год.

В «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы» было отмечено, что «рациональное использование такого ценнейшего природного ресурса, каким является вода, — крупнейшая экономическая проблема»¹.

Техники-гидрологи принимают непосредственное участие в проведении полевых работ, ведут документацию при бурении и опробовании скважин, занимаются обработкой лабораторных и полевых материалов.

Цель предлагаемого учебного пособия — привить учащимся практические навыки по проектированию отдельных видов работ, проведению лабораторных исследований, обработке полученных полевых материалов, по гидродинамическим расчетам.

Учебное пособие состоит из 3 частей и 15 глав. В начале каждой главы кратко рассматриваются теоретические вопросы, а затем дается разбор задач и примеров.

Главы 1, 2, 11, 12, 14, 15 написаны В. А. Шемелиной, предисловие и главы 3, 4, 5, 13 — О. К. Шуляковой, главы 6, 7, 8, 9, 10 — П. В. Гордеевым.

¹ Материалы XXV съезда КПСС. М., 1976, с. 143.

Часть 1

ОБЩАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ

ГЛАВА 1. ОБЩИЙ КРУГОВОРОТ ВОДЫ В ПРИРОДЕ

Круговорот воды в природе — непрерывный процесс циркуляции воды на земном шаре, обусловленный солнечной энергией и действием силы тяжести. Вода, испаряясь с поверхности Мирового океана в виде пара, переносится воздушными течениями над поверхностью Земли, при определенных условиях сгущается (конденсируется) и выпадает в виде гидрометеоров (дождя, снега и др.). Выпавшие осадки стекают в океан как в виде поверхностного, так и подземного стока. Благодаря круговороту воды атмосфера, гидросфера и литосфера тесно связаны между собой. Количественно круговорот воды выражается уравнением водного баланса [29], для решения которого необходимы сведения об осадках, испарении, стоке, инфильтрации и другие метеорологические данные.

В уравнении водного баланса Б. И. Куделина [29]

$$X_0 = Y_0 + Z_0 + W_0, \quad (1.1)$$

где X_0 — осадки на площади водосбора, мм; Y_0 — речной сток, мм; Z_0 — испарение за вычетом конденсации, мм; W_0 — среднемноголетняя величина питания глубоких водоносных горизонтов за счет атмосферных осадков или поступление подземных вод из глубоких горизонтов на поверхность в пределах речного бассейна, мм.

§ 1. Основные метеорологические приборы и работа с ними

Водяной пар, находящийся в атмосфере, определяет влажность воздуха, для характеристики которой используют абсолютную, относительную влажность и дефицит влажности.

Абсолютная влажность e — количество (в граммах) водяного пара в 1 м^3 воздуха, которое может быть выражено также его упругостью.

Упругость пара выражается в паскалях. Паскаль — единица давления и механического напряжения, давление, вызываемое силой 1 Н , равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 .

Относительная влажность воздуха r — отношение упругости пара e , содержащегося в воздухе, к упругости насыщенного пара при данной температуре E , выраженное в процентах:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Максимальная упругость пара при различных значениях температуры [36] имеет значения:

$t, {}^{\circ}\text{C}$	-30	-20	-10	0	10	20	30
$E, \text{ Па}$	53,3	133,3	293,3	613,3	1226,6	2333,1	4253,0

Дефицит влажности (недостаток насыщения) d выражает разность между упругостью водяных паров E , необходимых для полного насыщения воздуха при данных условиях, и фактической упругостью паров e , находящихся в воздухе в данный момент:

$$d = E - e. \quad (1.3)$$

Водяной пар при охлаждении конденсируется, превращаясь в атмосферные осадки, которые играют основную роль в питании подземных вод. При определении роли атмосферных осадков в питании подземных вод учитывают не только количество осадков, но и время, продолжительность их выпадения, вид и интенсивность. Количество выпавших атмосферных осадков определяют дождемером. Осадки, попавшие в дождемерное ведро в течение суток, переливают в дождемерный стакан, каждое деление которого соответствует 5 см^3 , или слою воды высотой $0,1 \text{ мм}$ (при сечении дождемера 500 см^2).

Влажность воздуха определяют психрометрами, гигрометрами (рис. 1) и гигрографами (рис. 2). Психрометр состоит из двух термометров с делением через $0,2^{\circ}$. Шарик одного из термометров обернут батистом, конец которого опущен в сосуд с дистиллированной водой. Вода, испаряясь с батиста, поглощает тепло окружающего воздуха, вследствие чего шарик охлаждается и «смочен».

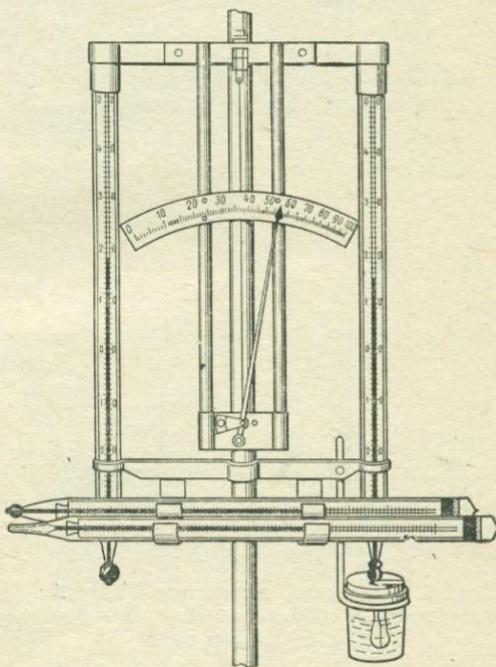


Рис. 1. Психрометр с максимальным и минимальным термометрами и гигрометром

ный» термометр показывает более низкую температуру, чем «сухой». По показаниям температур сухого и смоченного термометров с помощью таблицы (приложение к психрометру) определяют абсолютную и относительную влажность воздуха. По гигрометру определяют относительную влажность (в %). Гигрограф служит для автоматической записи изменения влажности в течение суток.

Испарение — это величина фактического испарения влаги с земной поверхности в данном районе, зависящая помимо метеорологических факторов от характера и структуры почвы, рельефа местности, степени влажности пород, характера растительного покрова, глубины залегания подземных вод. Наблюдения за испарением с поверхности почвы проводят на специально оборудованных площадках, где устанавливают испарители или лизиметры.

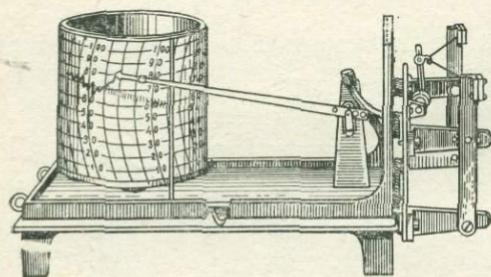


Рис. 2. Гигрограф

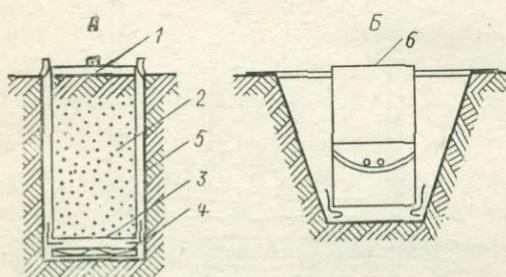


Рис. 3. Почвенный испаритель ГГИ-500: А — испаритель в собранном виде, Б — дождемер в собранном виде

дры ежедневно взвешиваются. Испарение находят по разности между количеством осадков и размером инфильтрации.

Пример 1. Температура сухого термометра психрометра $21,7^{\circ}\text{C}$, смоченного $14,7^{\circ}\text{C}$. Определим влажность воздуха.

Разность показаний термометров $21,7 - 14,7 = 7,0^{\circ}\text{C}$. Определяем влажность по психрометрической таблице, в которой в первом столбце по вертикали находим показание влажного термометра 15° ($\approx 14,7^{\circ}$), а напротив значения разности показаний термометров, равной $7,0^{\circ}$, находим в горизонтальной строке относительную влажность, равную 43% . По формуле (1.2) определяем абсолютную влажность:

$$e = \frac{43}{100\%} \times 2333,1 = 1003,2 \text{ Па},$$

где $E = 2333,1$ (см. с. 5).

Пример 2. Показания гигрометра 70% (относительная влажность), температура воздуха 20° С. Определим абсолютную влажность e , максимальную упругость пара E и дефицит влажности d .

Максимальная упругость пара E при температуре 20° С составляет 2333,1 Па, абсолютная влажность по формуле (1.2) $e = 0,7 \cdot 2333,1 = 1633,2$ Па. Дефицит влажности по формуле (1.3) $d = 2333,1 - 1633,2 = 699,9$ Па.

§ 2. Параметры поверхностного и подземного стоков

Атмосферные осадки расходуются на поверхностный сток, испарение и инфильтрацию (просачивание) в горные породы. *Поверхностный и подземный стоки*, питающие реки, составляют *общий (речной) сток*, который определяется для бассейна реки. *Бассейном реки* называется площадь на поверхности земли, с которой данная река получает водное питание. Площадь поверхностного стока определяется по топографической карте, площадь подземного стока — по карте гидроизогипс с учетом гидрогеологических условий.

1. *Модуль стока* M л/(с·км²) — количество воды, стекающее в единицу времени с 1 км² водосборной площади, — определяется по формуле

$$M = \frac{Q \cdot 10^3}{F_{\text{бас}}} , \quad (1.4)$$

где Q — средний годовой расход реки, м³/с; F — водосборная площадь бассейна, км²; 10^3 — коэффициент перевода 1 м³ в литры.

2. *Подземное питание* $Q_{\text{под}}$ (м³/с на 1 км) определяется по формуле

$$Q_{\text{под}} = \frac{Q_1 - Q_2}{L} , \quad (1.5)$$

где Q_1 — расход реки в верхнем створе, м³/с; Q_2 — расход реки в нижнем створе, м³/с; L — расстояние между створами, км.

3. *Объем годового стока* W — количество воды, стекающее с бассейна за год (м³/год):

$$W = QT , \quad (1.6)$$

где Q — средний годовой расход реки, л/с; $T = 86400 \times 365 = 31,5 \times 10^6$ — число секунд в году. Объем годового стока (м³/год) можно выразить через модуль стока:

$$W = \frac{MF}{10^3} \cdot 31,5 = MF \cdot 31,5 \cdot 10^3 . \quad (1.7)$$

4. Слой стока Y за год (мм/год) вычисляется по формуле

$$Y = \frac{W \cdot 10^3}{F \cdot 10^6} = \frac{W}{F \cdot 10^3}. \quad (1.8)$$

Между слоем и объемом стока существует зависимость

$$Y = \frac{W}{F \cdot 10^3} \text{ или } Y = 31,5 M. \quad (1.9)$$

5. Коеффициент стока η определяется отношением

$$\eta = \frac{Y}{X}, \quad (1.10)$$

где Y — высота слоя воды за какой-то период, мм; X — количество осадков за тот же период, мм. Вышеуказанные параметры можно определять как для поверхностного, так и для подземного стока. Соотношение между стоками выражается формулой

$$K_{\pi} = \frac{M_{\pi}}{M} \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

где K_{π} — модульный коэффициент, %; M_{π} — модуль подземного стока, л/(с·км²); M — модуль поверхностного стока, л(с·км²).

6. Годовая инфильтрация атмосферных осадков численно равна высоте слоя (мм) подземного стока Y_{π} и определяется по формулам:

$$Y_{\pi} = 31,5 M_{\pi}; \quad (1.12)$$

$$Y_{\pi} = \frac{Y K_{\pi}}{100}, \quad (1.13)$$

где M_{π} — модуль подземного стока, л/(с·км²); K_{π} — процентное содержание подземного стока.

7. Коеффициент подземного стока $k_{\text{под}}$ вычисляют по формуле

$$k_{\text{под}} = \frac{Y_{\pi}}{X}. \quad (1.14)$$

8. Среднемноголетний объем воды ($m^3/\text{год}$) от инфильтрации по всей площади подземного водосбора за год вычисляют по формуле

$$W = Y \cdot F_{\pi} \cdot 10^3. \quad (1.15)$$

Задача 1 (по И. К. Гавич и др., 1964). Площадь бассейна р. Дон $F=221\,600 \text{ км}^2$. Средний многолетний расход за 50 лет $Q_c=694 \text{ м}^3/\text{с}$. Осадки за год $X=510 \text{ мм}$. На левобережном притоке р. Дон расход воды в нижнем створе $Q_2=29,5 \text{ м}^3/\text{с}$, в верхнем створе на расстоянии $L=15 \text{ км}$ $Q_1=22,3 \text{ м}^3/\text{с}$. Площадь подземного питания по карте гидроизогипс $F_{\pi}=9000 \text{ км}^2$. Вычислить основные характеристики поверхностного и подземного стока р. Дон у г. Калача.

Решение: А. Поверхностный сток.

1. Модуль стока по формуле (1.4)

$$M_0 = \frac{Q_0 \cdot 10^3}{F} = \frac{694 \cdot 10^3}{221\,600} = 3,13 \text{ л/(с·км}^2).$$

2. Объем стока за год по формуле (1.6) $W = QT = 694 \cdot 31,5 \cdot 10^6 = 21\,861 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год.}$

Объем стока можем определить через модуль по формуле (1.7): $W = M \cdot F \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 3,13 \cdot 221\,600 \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 21\,849 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год.}$

Модуль стока вычислим по формуле (1.7):

$$M = \frac{W}{31,5 \cdot 10^3 F} = \frac{21\,849 \cdot 10^6}{31,5 \cdot 10^3 \cdot 221\,600} = 3,13 \text{ л/(с·км}^2).$$

3. Слой стока по формуле (1.8) равен:

$$Y = \frac{W}{F \cdot 10^3} = \frac{21\,849 \cdot 10^6}{221\,600 \cdot 10^3} = \frac{21\,849 \cdot 10}{2216} = 99 \text{ мм.}$$

Слой стока по формуле (1.9) равен:

$$Y = 31,5 M = 31,5 \cdot 3,13 = 99 \text{ мм.}$$

Вычислим модуль и объем стока через слой по формуле (1.9):

$$M = 0,0317 \cdot Y = 0,0317 \cdot 99 = 3,14 \text{ л/(с·км}^2);$$

$$W = YF \cdot 10^3 = 99 \cdot 221\,600 \cdot 10^3 = 21\,938 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год.}$$

4. Коэффициент стока вычислим по формуле (1.10):

$$\eta = \frac{99}{510} = 0,19.$$

Б. Подземный сток.

1. Подземное питание на 1 км протяжения реки по формуле (1.5)

$$Q_{\text{под}} = \frac{Q_2 - Q_1}{L} = \frac{Q_{\text{под}}}{L} = \frac{29,5 - 22,3}{15} = \frac{7,2}{15} = 0,48 \text{ м}^3/(\text{с·км}^2).$$

2. Модуль подземного стока по формуле (1.4) равен:

$$M_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}} \cdot 10^3}{F_{\text{п}}} = \frac{7,2 \cdot 10^3}{9000} = 0,80 \text{ л/(с·км}^2).$$

3. Процентное содержание подземного стока от общего годового поверхностного стока (модульный коэффициент подземного стока) вычислим по формуле (1.11):

$$K_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M} \cdot 100 = \frac{0,80 \cdot 100}{3,13} = 26\%.$$

4. Слой подземного стока, или годовую инфильтрацию (мм), вычисляем по формуле (1.12): $Y_{\text{п}} = 31,5 \cdot M_{\text{п}} = 31,5 \cdot 0,80 = 25,2 \text{ мм.}$

5. Коэффициент подземного стока $K_{\text{под}}$ определим по формуле (1.14):

$$K_{\text{под}} = \frac{Y_{\text{н}}}{X} \cdot 100 = \frac{25,2}{510} \cdot 100 = 4,9\%.$$

6. Среднее многолетнее значение инфильтрации для всей площади бассейна по формуле (1.15) равно: $W_{\text{ин}} = 25 \cdot 9000 \cdot 10^3 = 225 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$.

7. Испарение и транспирацию растениями (суммарно) за многолетний период вычисляем по уравнению (1.1): $Z_0 = X_0 - Y_0 = 510 - 99 = 411 \text{ мм}$ (при $W_0 = 0$).

ГЛАВА 2. ВЛАЖНОСТЬ И ВОДНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Влажность и водные свойства горных пород (влагоемкость, водоотдача, водопроницаемость, капиллярность) имеют большое значение при гидрогеологических исследованиях для целей мелиорации, оценки запасов подземных вод, при исследованиях под различные виды инженерных сооружений.

§ 1. Определение влажности

Количество свободной и поверхностно-связанной воды, содержащейся в породе, называется *влажностью породы*. *Влажность массы* породы W_m — это отношение массы воды в породе к массе абсолютно сухой породы; *объемная влажность* W_0 — отношение объема воды в породе к объему всей породы.

Задание 1. Определить влажность грунта ускоренным методом (по Е. Г. Чаповскому, 1975).

1. Поместить 10—15 г песка в предварительно взвешенный металлический бюкс g_0 , взвесить его (g_1) с точностью до 0,01 г.

2. Бюкс с равномерно распределенным по дну песком поставить над спиртовкой, на дне спиртовки зажечь одновременно две таблетки сухого спирта (3 г каждая).

3. Бюкс с грунтом охладить и взвесить (g_2).

4. Рассчитать влажность песка по формуле

$$W_v = \frac{g_1 - g_2}{g_2 - g_0} \cdot 100\%. \quad (2.1)$$

Необходимое оборудование и материалы: металлические бюксы, спиртовка для сухого спирта, сухой спирт, технические весы с разновесами.

§ 2. Определение влагоемкости, капиллярных свойств и водоотдачи пород

Влагоемкость — способность пород вмещать в порах и удерживать в себе то или иное количество воды. Различают влагоемкость: максимальную молекулярную W_m , капиллярную W_k и полную W_t . Породы разделяются на весьма влагоемкие (торф, глины, суглини-

ки), слабо влагоёмкие (мел, рыхлые песчаники) и невлагоёмкие (скальные породы, пески, галечники).

Максимальной молекулярной влагоемкостью породы W_m называют максимальное количество гигроскопической и пленочной воды, удерживаемое частицами грунта; *капиллярной влагоемкостью* W_k — максимальное количество воды, удерживаемое в капиллярных порах; *полной влагоемкостью* W_t — максимальное количество воды, заключенное в породе при полном насыщении ее водой.

Под *капиллярными свойствами* породы понимают высоту и скорость капиллярного поднятия в них воды. Высота капиллярного поднятия меньше в крупнозернистых породах, а скорость поднятия больше.

Водоотдачей μ породы называют количество воды, которое отдает единица объема породы при стоке из нее гравитационной воды. Она выражается в объемных процентах или долях единицы. Водоотдачу μ вычисляют по разности полной влагоемкости и максимальной молекулярной влагоемкости:

$$\mu = W_t - W_m. \quad (2.2)$$

Приближенно водоотдачу песков определяют как разность между пористостью и максимальной молекулярной влагоемкостью.

Разность между полной влагоемкостью и данной естественной влажностью, выраженную в процентах, именуют недостатком насыщения μ_n :

$$\mu_n = W_t - W_b. \quad (2.3)$$

Обе величины (μ и μ_n) широко используют в различных расчетах по формулам неустановившегося движения грунтовых вод.

Задание 2. Определить максимальную молекулярную и капиллярную влагоемкость песков методом высоких колонн (по Е. Г. Чаповскому, 1975).

В работе применяется прибор (рис. 4), состоящий из стеклянного цилиндра 1 диаметром 4—5 см и высотой 90—100 см. Сбоку он должен иметь отростки 2 диаметром 2 см, расположенные на расстоянии 10 см. В дно цилиндра впаяна небольшая трубка с сеткой 4. Трубка крепится на штативе 7.

1. Наполнить цилиндр песком, песок слегка утрамбовать.
2. Закрыть резиновыми пробками 3 боковые отверстия и промочить песок водой, подаваемой в цилиндр снизу по резиновой

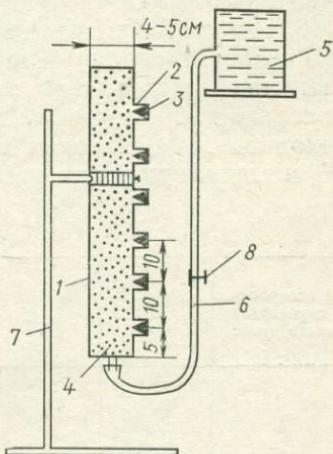


Рис. 4. Прибор для определения максимальной молекулярной и капиллярной влагоемкости

трубке 6 с зажимом 8 из напорного бака 5 до появления пленки воды на поверхности песка.

3. Снять резиновую трубку со дна прибора и дать гравитационной воде свободно стечь.

4. По прекращении стока взять шпателем по 10—15 г песка из каждого бокового отверстия в предварительно взвешенные бюксы.

5. По вышеописанному методу (см. задание 1) определить влажность проб.

6. По полученным данным составить журнал (табл. 1), в котором выделить графу — зона постоянной влажности. В этой зоне влажность наименьшая, т. е. эта влажность и есть максимальная молекулярная влагоемкость грунта W_m . Ниже ее расположена переходная зона, которая соответствует капиллярной влагоемкости W_k и характеризуется наибольшими значениями влажности грунта.

Таблица 1

№ отверстия, с которого взята проба	Влажность, %	Зона влажности	Влагоемкость, %	
			W_m	W_k
1	1,6			
2	1,7			
3	1,6	Зона постоянной влажности	1,7	
4	1,8			
5	1,7			
6	1,9			
7	6,2	Переходная зона	—	
8	14,9			
9	15,1			
10	15,6	Капиллярная влагоемкость	—	15,2

Необходимое оборудование: стеклянный цилиндр, резиновая трубка диаметром 2—3 см, длиной 0,5 м, напорный бачок, штатив, зажимы, бюксы, резиновые пробки диаметром 2 см, металлическая сетка диаметром 4—5 см, стеклянная воронка.

Задание 3. Определить высоту капиллярного поднятия в песках непосредственным наблюдением (по Е. Г. Чаповскому, 1975).

1. В стеклянную трубку высотой 1,0 м, диаметром 3—4 см, обвязанную на одном конце марлей, насыпать сухой песок, слегка утрамбовав его. Песок загружается через воронку с резиновой трубкой во избежание пересортировки песка.

2. Конец трубки, укрепленной на штативе (рис. 5), погрузить в сосуд с водой на глубину 1—2 см и заметить время по секундомеру. Уровень в сосуде с водой должен быть постоянным.

3. Наблюдать за скоростью и высотой подъема по окраске песка (темнеет при насыщении водой).

4. Через определенные промежутки времени по шкале, нанесенной на трубке, отсчитывать среднюю высоту подъема уровня, измеряя ее от уровня воды в сосуде. Для песков отсчеты брать через 1, 2, 5 мин в течение 15 мин, затем через 30 мин, 1 ч.

5. По данным замеров построить график изменения высоты капиллярного подъема во времени (рис. 6) и определить высоту капиллярного поднятия.

Необходимое оборудование и материалы: стеклянная трубка, штатив, марля, воронка, резиновая трубка, сосуд для воды, секундомер, линейка.

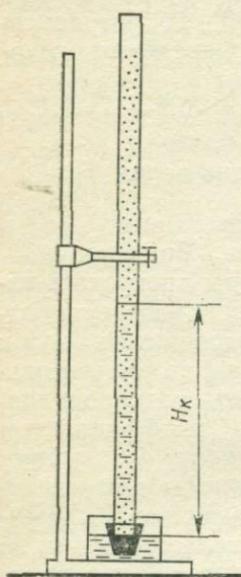


Рис. 5. Прибор для визуального изучения капиллярных свойств пород, H_k — высота капиллярного поднятия

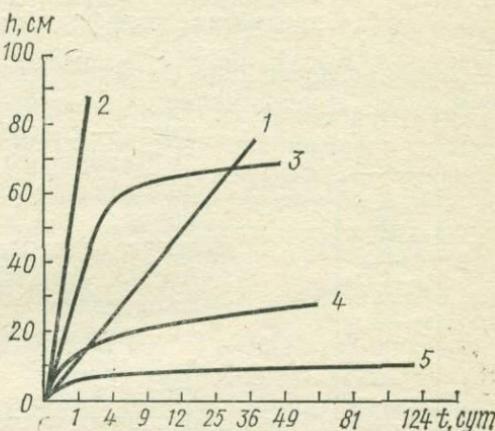


Рис. 6. Кривые капиллярного поднятия:
размер частиц (мм): 1 — меньше 0,01; 2 — от 0,01 до 0,05; 3 — от 0,05 до 0,1; 4 — от 0,25 до 0,5; 5 — от 0,5 до 1,0

Задание 4. Определить полную влагоемкость песков методом насыщения (по Е. Г. Чаповскому, 1975).

1. Сухой стаканчик (объемом 50 см^3 для песков рыхлого сложения и 250 см^3 для песков плотного сложения) наполнить исследуемым песком (с утрамбовкой или через воронку, в зависимости от того, при плотном или рыхлом сложении надо определить пористость песка). После наполнения подравнять поверхность песка линейкой вровень с краями стаканчика.

2. При помощи бюретки насытить песок в стаканчике водой до появления тонкого слоя воды на поверхности песка. Количество воды, израсходованной на насыщение песка, будет соответствовать объему его пор V_p .

3. Удалить песок из стаканчика и при помощи той же бюретки измерить объем пустого стаканчика, который соответствует объему всей породы V .

4. Рассчитать пористость по формуле

$$n = \frac{V_n}{V} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Эта пористость численно равна полной влагоемкости ($n = W_t$).

Оборудование: стеклянные стаканчики объемом 50 и 250 см³, бюретка, штатив, линейка.

Задание 5. Полная влагоемкость грунта W_t 25,5%, максимальная молекулярная влагоемкость W_m 17%. Определить водотдачу μ .

Водоотдача определяется по формуле (2.2): $\mu = 25,5 - 17 = 8,5\%$.

§ 3. Определение коэффициента фильтрации пород

Одной из важнейшей характеристик породы, связанных с наличием воды в ней, является *водопроницаемость*. Водопроницаемость — способность породы пропускать воду.

Чаще всего и наибольший интерес в гидрологии представляет передвижение воды в породах под влиянием силы тяжести и разности напоров. Численно водопроницаемость характеризуется коэффициентом фильтрации k . Коэффициент фильтрации k — скорость фильтрации воды при напорном градиенте, равном единице. Выражается k в см/с или м/сут и является одним из основных расчетных показателей при решении гидрогеологических задач по оценке движения подземных вод (подсчет запасов подземных вод, определение притока воды к различным выработкам, расчет утечек воды в районах гидротехнических сооружений и др.). Средние значения коэффициентов фильтрации (для пресной воды) [19]: очень хорошо проницаемые породы (галечники, гравий, сильно закарстованные известняки, сильно трещиноватые породы) — k 100—1000 м/сут и более; хорошо проницаемые породы (галечники, гравий с песком, крупный песок, чистый среднезернистый песок, закарстованные породы) — k 100—10 м/сут; проницаемые породы (галечник, гравий с мелким песком, глиной, средне- и мелкозернистые пески, слабозакарстованные и малотрещиноватые породы) — k 10—1 м/сут; слабопроницаемые

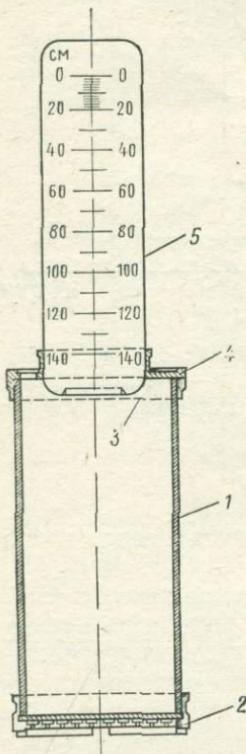


Рис. 7. Трубка СПЕЦГЕО

(тонкозернистые пески, слаботрещиноватые породы) — k 1,0—0,1 м/сут; весьма слабопроницаемые (суглинки, очень слаботрещиноватые породы) — k 0,1—0,001 м/сут.

Лабораторный метод определения коэффициента фильтрации пород — наиболее простой и дешевый, но менее точный, чем полевые опытно-фильтрационные работы. Используется он при массовых определениях коэффициента фильтрации пород при исследованиях для мелиорации, гидротехнического и гражданского строительства. Определения k песчаных пород ведутся на образцах с нарушенной структурой, глинистых — на монолитах.

Задание 6. Определить коэффициент фильтрации песков в трубке СПЕЦГЕО (по Е. Г. Чаповскому, 1975).

Трубка СПЕЦГЕО (рис. 7) состоит из основной трубы 1, нижней крышки 2 с сеткой 3, верхней крышки 4 и стеклянного мерного цилиндра 5 с делениями, равными 1 см^3 .

Заполнить трубку 1 испытуемым песком, замочить его снизу вверх. Заполнить мерный цилиндр водой, опрокинуть над трубкой и укрепить в верхней крышке так, чтобы горлышко его отстояло от поверхности грунта в трубке на $0,5$ — 1 мм. Отрегулировать посадку мерного цилиндра так, чтобы через воду поднимались только мелкие пузырьки воздуха, следующие один за другим на одинаковом расстоянии. По достижении указанного режима заметить по шкале уровень воды в мерном цилиндре, пустить секундомер и через 50 — 100 с заметить второй уровень. Подсчитать коэффициент фильтрации ($\text{см}/\text{с}$) по формуле $k = \frac{Q}{T \cdot F}$, где Q — объем воды, профильтровавшейся за время T , см^3 ; T — время фильтрации, с ; F — площадь поперечного сечения, см^2 . Повторить опыт 3—4 раза, данные наблюдений занести в таблицу (см. форму) и вычислить по ним среднее значение коэффициента фильтрации. Пользуясь температурной поправкой τ , значение k привести к температуре 10°C :

$$k_{10} = \frac{k}{\tau}, \quad (2.5)$$

$$\tau = 0,7 + 0,03t, \quad (2.6)$$

где t — температура воды во время опыта.

№ опыта	Краткое описание грунта	Время фильтрации T , с	Объем профильтровавшейся воды V , см^3	Коэффициент фильтрации k , $\text{см}/\text{с}$	Средний коэффициент фильтрации k_{cp} , $\text{см}/\text{с}$	Температура воды t , $^\circ\text{C}$

Оборудование: трубка СПЕЦГЕО; секундомер; стеклянная батарейная банка.

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с различными методами обработки, графического изображения и систематизации химических анализов подземных вод.

Изучение химического состава и физических свойств природных вод имеет большое практическое значение для развития различных отраслей народного хозяйства. Химический состав воды необходимо учитывать при использовании ее для всех видов водоснабжения (питьевого, технического, лечебного). При строительстве различных сооружений необходимо располагать данными о химическом составе воды, чтобы предпринять меры против коррозии бетона. Химический состав характеризует качество воды, используемой при орошении; по ее составу судят об интенсивности процессов засоления орошаемых массивов. Тщательно изучают химический состав подземных вод при организации добычи солей йода, брома, бора, а также при гидрохимических методах поисков полезных ископаемых. Химический состав подземных вод необходимо знать и для изучения условий происхождения и формирования подземных вод.

К физическим свойствам подземных вод относятся плотность, температура, прозрачность, цвет, запах, вкус, привкус, электропроводность и радиоактивность. Характеристика этих свойств воды и их значение при оценке воды для различных целей с достаточной полнотой приводятся во многих учебных пособиях (27, 29).

Свойства подземных вод определяются количеством и соотношением содержащихся в них различных ионов, некоторых недиссоциированных соединений, газов, органических веществ, реакцией воды (pH), жесткостью, общей минерализацией.

К главным химическим компонентам подземных вод относятся: хлор-ион Cl^- , сульфат-ион SO_4^{2-} , гидрокарбонатный HCO_3^- и карбонатный CO_3^{2-} ионы, а также ионы щелочных и щелочноземельных металлов и окислов — натрия Na^+ и калия K^+ , кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} , железа и кремния SiO_2 (в коллоидном состоянии).

Гидрогеологи, занимающиеся изучением химического состава подземных вод, должны иметь определенные навыки по обработке и систематизации данных о химическом составе воды.

§ 1. Обработка химических анализов подземных вод

Чтобы сделать необходимые выводы из полученных результатов анализа, следует систематизировать данные, позволяющие правильно судить о химическом составе воды.

В природной воде молекулы солей почти полностью диссоциированы на ионы, поэтому основной формой выражения результатов анализа воды является ионная. Содержание того или иного иона при лабораторных исследованиях выражается в граммах или миллиграммах в 1 л. Данные лабораторных анализов подземных вод в мг/л или г/л подлежат дальнейшей обработке:

1. Данные анализа пересчитываются в эквивалентную и процент-эквивалентную формы.
2. Вычисляют ошибки анализа, %.
3. Определяют все виды жесткости воды.

4. Классифицируют воду по величине общей жесткости, минерализации, активной реакции.

Пересчет анализа из ионной формы в процент-эквивалентную и вычисление ошибки анализа. Для пересчета данных анализа из ионной формы в миллиграмм-эквивалентную необходимо количество миллиграммов каждого иона в 1 л воды разделить на его эквивалентную массу (ионная масса, деленная на валентность). Для упрощения расчетов можно использовать пересчетные множители, которые представляют собой величину, обратную эквивалентной массе (табл. 2). При обработке большого числа анализов широко используют пересчетные таблицы и номограммы (см. И. Ю. Соколов. Таблицы и номограммы для расчета результатов химических анализов природных вод. М., 1974, 160 с.).

Таблица 2. Эквивалентные массы ионов и множители для пересчета миллиграмм-ионов на миллиграмм-эквиваленты

Катионы	Эквивалент-ная масса	Множитель для пересчета	Анионы	Эквивалент-ная масса	Множитель для пересчета
H ⁺	1,008	0,99206	Cl ⁻	35,457	0,02820
K ⁺	39,096	0,02558	Br ⁻	79,916	0,01251
Na ⁺	22,997	0,04348	I ⁻	126,91	0,00788
NH ₄ ⁺	18,040	0,05543	NO ₃ ⁻	62,008	0,01613
Li ⁺	6,940	0,14409	NO ₂ ⁻	46,008	0,02174
Ca ²⁺	20,040	0,04990	SO ₄ ²⁻	48,033	0,02082
Mg ²⁺	12,160	0,08224	HCO ₃ ⁻	61,018	0,01639
Fe ²⁺	27,925	0,03581	CO ₃ ²⁻	30,005	0,03333
Fe ³⁺	18,617	0,05371	PO ₄ ³⁻	31,658	0,03159
Al ³⁺	8,993	0,11124	HPO ₄ ²⁻	47,994	0,02084
Mn ²⁺	27,465	0,03641	H ₂ PO ₄ ²⁻	96,996	0,01031
			S ²⁻	16,033	0,06237
			HS ⁻	33,074	0,03024
			HSiO ₃ ⁻	77,098	0,01298
			SiO ₃ ²⁻	38,045	0,02630

Результаты определений для массовых анализов рекомендуется (43) выражать в мг/л и % · экв целыми числами, а в мг · экв/л — с точностью до второго десятичного знака.

Контроль результатов анализа воды проводится по эквивалентному содержанию ионов или по сухому остатку. Первый метод может быть применен только для полных, а второй для полных и сокращенных химических анализов.

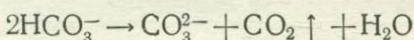
Процент погрешности анализа вычисляют по формуле

$$x = \frac{A - K}{A + K}, \quad (3.1)$$

где A и K — суммы миллиграмм-эквивалентов соответственно анионов и катионов. Ниже приводится допустимая погрешность при массовых анализах (43):

<i>Минерализация воды, мг·экв/л анионов</i>	<i>Погрешность, ± относит. %</i>
>15	2
5—15	2—5
3—5	5—10
<3	не установлена

Контроль по сухому остатку заключается в сравнении сухого остатка с суммой всех растворенных веществ в виде ионов и молекул. При подсчете необходимо брать половину количества HCO_3^- , так как при высушивании сухого остатка гидрокарбонаты переходят в карбонаты по уравнению



Для пересчета результатов анализа из миллиграмм-эквивалентов в процент-эквиваленты необходимо сумму миллиграмм-эквивалентов катионов и анионов принять порознь за 100% и вычислить процентное содержание каждого иона в отдельности (табл. 3).

Таблица 3. Пример выражения результатов анализа воды в различных формах

Ионы	мг/л	мг·экв/л	%·экв
Катионы: Na^+	240	10,4	61
K^+	6	0,15	1
Ca^{2+}	77	3,8	22
Mg^{2+}	34	2,8	16
И т о г о:	357	17,15	100
Анионы: Cl^-	265	7,5	45
SO_4^{2-}	218	4,5	27
HCO_3^-	286	4,7	28
И т о г о:	769	16,7	100

В сокращенном анализе вычисленная по разности сумма эквивалентов щелочных металлов ($\text{K}^+ + \text{Na}^+$) условно пересчитывается на натрий.

Определение жесткости воды. Под жесткостью понимается свойство воды, обусловленное присутствием в ней солей кальция и магния. Выражается жесткость в мг·экв/л. Различают пять видов жесткости: общую, устранимую (или временную); неустранимую (или постоянную), карбонатную и некарбонатную.

Общая жесткость обусловлена наличием всех солей кальция и магния и вычисляется путем суммирования мг·экв этих ионов.

Устранимая (временная) и карбонатная жесткости обусловлены одними и теми же гидрокарбонатными и карбонатными солями кальция и магния, но имеют различное значение. Устранимая жесткость — величина экспериментальная. Она показывает, на сколько уменьшается общая жесткость воды после кипячения. Карбонатная жесткость — величина расчетная, численно равная количеству мг·экв гидрокарбонатных и карбонатных ионов, содержащихся в воде. Если это количество больше, чем общая жесткость, карбонатную жесткость считают равной общей жесткости.

Неустранимая (постоянная) и некарбонатная жесткости обусловлены хлоридами, сульфатами и другими некарбонатными солями кальция и магния. Неустранимая жесткость равна разности между общей жесткостью и устранимой (временной), а некарбонатная жесткость равна разности между общей жесткостью и карбонатной.

Природные воды по общей жесткости О. А. Алекин (19) подразделяет на пять групп. Ниже дается оценка природных вод по степени жесткости:

<i>Оценка воды</i>	<i>Жесткость мг·экв</i>
Очень мягкая	до 1,5
Мягкая	1,5—3
Умеренно жесткая	3—6
Жесткая	6—9
Очень жесткая	выше 9

Пример. Вычислим все виды жесткости по данным анализа воды, приведенным в табл. 3.

1. Общая жесткость равна: $H = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] = 3,8 + 2,8 = 6,6 \text{ мг·экв.}$

Карбонатная жесткость равна 4,7 мг·экв. Некарбонатная жесткость равна $6,6 - 4,7 = 1,9 \text{ мг·экв.}$ Следовательно, по степени жесткости согласно классификации О. А. Алекина вода относится к жесткой.

Минерализация воды. Под минерализацией может подразумеваться одна из следующих величин: экспериментально определенный сухой (плотный) остаток; сумма ионов; сумма минеральных веществ; вычисленный сухой остаток. Сумма минеральных веществ — более полное выражение минерализации воды по сравнению с суммой ионов, так как она учитывает и недиссоциированные и неорганические вещества (SiO_2 , Fe_2O_3 и др.).

Единой классификации вод по степени минерализации не существует. Наиболее распространенными являются классификации А. М. Овчинникова, В. А. Приклонского и Ф. Ф. Лаптева, Н. И. Толстикова, В. И. Вернадского. Ниже приводится общая минерализация подземных вод в градациях, выделенных на основании классификации природных вод В. И. Вернадского и согласующихся с требованиями практического использования подземных вод [21]:

<i>Группа</i>	<i>Минерализация, г/л</i>
Пресные	до 1
Слабосолоноватые	1—3
Сильносолоноватые	3—10
Соленые	10—50
Слабые рассолы	50—100
Крепкие рассолы	>100

Согласно данным анализа, приведенным в табл. 3, минерализация воды составляет (по сумме ионов): $240+6+77+34+265+218+286=1126$ мг/л, или 1,1 г/л. Вода по степени минерализации относится к слабосолоноватой.

Реакция воды. Реакция воды выражается показателем pH, который представляет собой десятичный логарифм концентрации H^+ , взятый с положительным знаком: $pH = -\lg[H^+]$. По величине активной реакции pH воды классифицируются следующим образом:

<i>Наименование воды</i>	<i>pH</i>
Очень кислая	<5
Кислая	5—7
Нейтральная	7
Щелочная	7—9
Высокощелочная	>9

Агрессивность вод. Подземные воды обладают в той или иной степени свойством агрессивности по отношению к бетону, железобетону и металлам. Агрессивность обусловлена присутствием ионов водорода, свободной углекислоты, сульфатов и магния. Различают несколько видов агрессивности: выщелачивания, общекислотную, углекислую, сульфатную, магнезиальную.

Агрессивность выщелачивания определяется по величине карбонатной жесткости воды. Вода считается агрессивной по отношению к бетону при карбонатной жесткости выше 0,54—2,14 мг·экв/л в зависимости от типа цемента в составе бетона.

Агрессивность общекислотная определяется по количеству водородных ионов (по pH). Вода считается агрессивной для всех типов цементов в пластах высокой водопроводимости: а) при $pH < 7$ и карбонатной жесткости меньше 8,6 мг·экв/л; б) при $pH < 6,7$ и карбонатной жесткости больше 8,6 мг·экв/л. Для слабопроницаемых пластов вода считается агрессивной при $pH < 5$.

Агрессивность углекислая устанавливается по содержанию в воде свободной углекислоты. Вода для большинства цементов в пластах высокой водопроводимости считается агрессивной, если выражение $a[Ca^{2+}]+b$ будет больше содержания свободной углекислоты, где a и b — коэффициенты, определяемые в зависимости от величины карбонатной жесткости и количества ионов $Cl^- + SO_4^{2-}$ мг/л. Значение коэффициентов a и b для определения углекислой агрессивности приведены в табл. 4.

Агрессивность сульфатная оценивается по содержанию в воде ионов SO_4^{2-} , мг/л. В породах высокой проводимости для бетона на

портландцементе вода считается агрессивной при содержании ионов Cl^- и SO_4^{2-} мг/л:

Cl^-	SO_4^{2-}
0—3000	250—500
3001—5000	501—1000
>5000	>1000

В породах слабой водопроводимости вода считается агрессивной при содержании иона $\text{SO}_4^{2-}>1000$ мг/л, для бетонов на пущолановом, шлаковом и песчано-пущолановом портландцементе — при содержании иона $\text{SO}_4^{2-}>4000$ мг/л независимо от содержания иона Cl^- .

Агрессивность магнезиальная определяется по наличию в воде ионов Mg^{2+} . Для портландцемента, находящегося в сильнопроникаемых породах, вода считается агрессивной при содержании иона $\text{Mg}^{2+}>5000$ мг/л, для других видов цемента — при содержании иона Mg^{2+} более величин, приведенных ниже, мг/л:

SO_4^{2-}	Mg^{2+}
0—1000	>5000
1001—2000	3001—5000
2001—3000	2001—3000
3001—4000	1000—2000

Таблица 4. Значения коэффициентов a и b для определения углекислой агрессивности — среды

Карбонатная жесткость, мг·экв/л	Суммарное содержание $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$, мг/л											
	0—200		201—400		401—600		601—800		801—1000		более 1000	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1,4	0,01	16	0,01	17	0,01	17	0,00	17	0,00	17	0,00	17
1,8	0,04	17	0,04	18	0,03	17	0,02	18	0,02	18	0,02	18
2,1	0,07	19	0,06	19	0,05	18	0,04	18	0,04	18	0,04	18
2,5	0,10	21	0,08	20	0,07	19	0,06	18	0,06	18	0,05	18
2,9	0,13	23	0,11	21	0,08	19	0,08	18	0,07	18	0,07	18
3,2	0,16	25	0,14	22	0,11	20	0,10	19	0,08	18	0,08	18
3,6	0,20	27	0,17	23	0,14	21	0,12	19	0,11	18	0,10	18
4,0	0,24	29	0,20	24	0,16	22	0,15	20	0,13	19	0,12	19
4,3	0,28	32	0,24	26	0,19	23	0,17	21	0,16	20	0,14	20
4,7	0,32	34	0,28	27	0,22	24	0,20	22	0,19	21	0,17	21
5,0	0,36	36	0,32	29	0,25	26	0,23	23	0,22	22	0,19	22
5,4	0,40	38	0,36	30	0,29	27	0,26	24	0,24	23	0,22	23
5,7	0,44	41	0,40	32	0,32	28	0,29	25	0,27	24	0,25	24
6,1	0,48	43	0,44	34	0,36	30	0,33	26	0,30	25	0,28	25
6,4	0,54	46	0,47	37	0,40	32	0,36	28	0,33	27	0,31	27
6,8	0,61	48	0,51	39	0,44	33	0,40	30	0,37	29	0,34	28
7,1	0,67	51	0,55	41	0,48	35	0,44	31	0,41	30	0,38	29
7,5	0,74	53	0,60	43	0,53	37	0,48	33	0,45	31	0,41	31
7,8	0,81	55	0,65	45	0,58	38	0,53	34	0,49	33	0,44	32
8,2	0,88	58	0,70	47	0,63	40	0,58	35	0,53	34	0,48	33
8,6	0,96	60	0,76	49	0,68	42	0,63	37	0,57	36	0,52	35
9,0	1,04	63	0,81	51	0,73	44	0,67	39	0,61	38	0,56	37

Пример. Требуется определить агрессивность воды — среды по отношению к бетонной напорной конструкции, расположенной в грунте, обладающем повышенной водопроводимостью. Исходные данные помещены в табл. 5.

Таблица 5

Ионы	Содержание		Дополнительные показатели
	мг/л	мг·экв/л	
Катионы: $N^+ + K^+$ (по разн.)	1950	84,8	CO_2 свободная —119 мг/л $pH = 6,6$ Карбонатная жесткость 7,9 мг·экв
	Ca^{2+}	152	
	Mg^{2+}	198	
Анионы: Cl^- SO_4^{2-} HCO_3^-	663	18,6	
	3957	84,3	
	482	7,9	

По приведенным данным вода обладает выщелачивающей агрессивностью по отношению к бетону на любом цементе, так как карбонатная жесткость (7,9 мг·экв) превышает допустимую норму (2,4 мг·экв) и не обладает общекислотной агрессивностью, так как $pH < 6,7$, а карбонатная жесткость $< 8,6$ мг·экв.

Для определения углекислой агрессивности находят по табл. 4 коэффициенты a и b . Содержание ионов $Cl^- + SO_4^{2-} = 663 + 3957 = 4620$ мг/л; $a = 0,44$, $b = 32$. По нормам углекислой агрессивности допустимое содержание свободной углекислоты равно: $a \cdot Ca^{2+} + b = 0,44 \cdot (152 + 32) = 66,88$ мг/л. Следовательно, данная вода, содержащая 119 мг/л свободной углекислоты, агрессивна по отношению к бетону. Она обладает также и сульфатной агрессивностью, так как содержание иона SO_4^{2-} превышает 500 мг/л при содержании иона Cl^- до 3000 мг/л.

Магнезиальной агрессивностью вода не обладает, так как содержание иона Mg^{2+} не превышает 1000 мг/л.

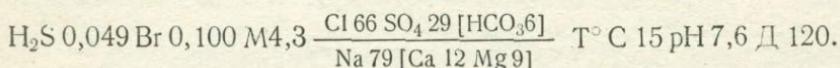
§ 2. Систематизация химических анализов подземных вод и оценка пригодности воды для целей хозяйствственно-питьевого водоснабжения

Выражение химического состава воды в виде формул. Для изображения химического состава воды наиболее часто используют формулу М. Г. Курлова, которая представляет собой псевдодробь. В числителе ее расположены анионы (%·экв) по содержанию их в воде в убывающем порядке, а в знаменателе — в таком же порядке катионы. Ионы, содержание которых не превышает 10 %·экв, в формулу не включаются. Слева от дроби указывается

(г/л) количество газов и активных элементов, минерализация воды М до первого десятичного знака, справа — температура воды (°С), реакция воды рН, дебит скважины или расход источника (м³/сут).

В формулу Курлова внесены некоторые изменения, которые дают возможность более четко представить условия формирования химического состава воды: в нее включают все анионы и катионы, содержание которых превышает 1 % · экв. Количество катионов и анионов округляется до целых чисел % · экв. По предложению Е. В. Порохова [42], ионы, содержание которых не превышает 25 % · экв, можно считать второстепенными и желательно отделять их скобками от главных.

Формула М. Г. Курлова с учетом вышеуказанных изменений имеет вид



В наименование состава воды включаются анионы и катионы, содержание которых составляет 25 % · экв и более. В наименовании состава воды рекомендуется первыми ставить анионы и катионы, находящиеся в меньшем количестве. Вода, состав которой приведен в формуле, называется: сероводородная бромистая сульфатно-хлоридная натриевая.

Систематизация химических анализов воды. Для систематизации химических анализов воды предложено большое количество классификаций, однако общепринятой единой классификации пока не существует. Ниже приведены классификации, наиболее широко используемые в гидрогеологической практике.

Классификация С. А. Щукарева — Н. Н. Славянова. Согласно этой классификации ионы делятся на *преобладающие* и *второстепенные*. К первым относят ионы, которых не менее 25 % · экв. В составе воды может быть от двух до шести преобладающих ионов. Группируя анионы с катионами, из шести преобладающих ионов можно образовать 49 различных сочетаний, поэтому С. А. Щукарев выделяет 49 классов вод (табл. 6). Название воде дается по преобладающим главным анионам (хлоридная, сульфатная, гидрокарбонатная, хлоридно-сульфатная, хлоридно-гидрокарбонатная, сульфатно-гидрокарбонатная и хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатная, и катионам (натриевая, магниевая, кальциевая, натриево-магниевая, натриево-кальциевая, магниево-кальциевая и натриево-магниево-кальциевая). Каждый класс воды характеризуется определенными свойствами. Так, к I классу относятся пресные воды гидрокарбонатного кальциевого типа.

По общей минерализации каждый класс разделен на группы: A — до 1,5 г/л; B — от 1,5 до 10 г/л и C — более 10 г/л.

Пример. Определим класс воды, химический состав которой приведен в табл. 3. Из данных таблицы видим, что в химическом составе воды преобладают ионы SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- и Na^+ , следовательно, она относится к 21-му классу, группе A (минерализация 1,1 г/л).

Таблица 6. Классификация вод С. А. Щукарева — Н. И. Славянова

Анионы	Катионы						
	Ca^{2+}	$\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$	Mg^{2+}	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}$	Na^+
HCO_3^-	1	2	3	4	5	6	7
$\text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}$	8	9	10	11	12	13	14
$\text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-$	15	16	17	18	19	20	21
$\text{HCO}_3^-, \text{Cl}^-$	22	23	24	25	26	27	28
SO_4^{2-}	29	30	31	32	33	34	35
$\text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-$	36	37	38	39	40	41	42
Cl^-	43	44	45	46	47	48	49

Классификация О. А. Алекина. В этой классификации природные воды делятся по преобладающим ионам и соотношению между ними. По преобладающему аниону воды делятся на три класса: гидрокарбонатные (и карбонатные), сульфатные и хлоридные. Каждый класс делится на три группы по преобладанию

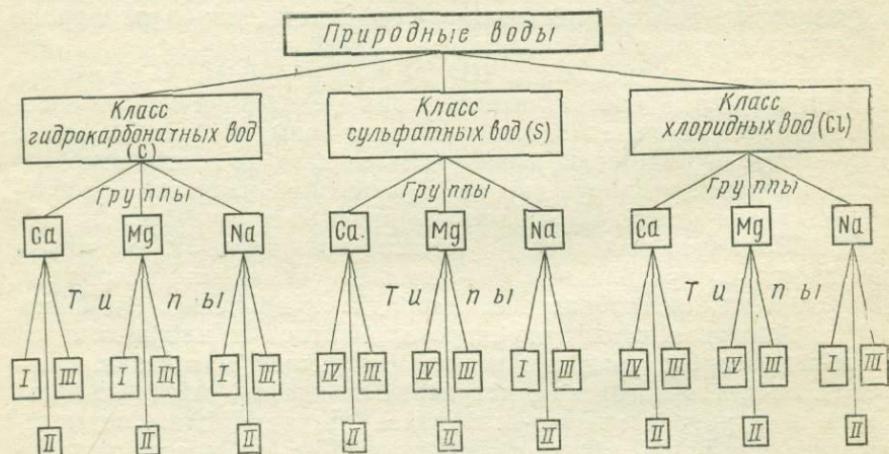


Рис. 8. Классификация природных вод по химическому составу (по О. А. Алекину, 1970)

одного из катионов — Ca^{2+} , Mg^{2+} или Na^+ . Группы подразделяются на типы по соотношению между ионами. Всего выделяется четыре типа (рис. 8):

I тип: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, воды маломинерализованные.

II тип: $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, воды умеренной минерализации.

III тип: $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или (что то же самое) $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$, воды обычно высокоминерализованные.

IV тип: $\text{HCO}_3^- = 0$, воды кислые, имеются только в сульфатном и хлоридном классах.

Для лучшей дифференциации состава вод, по предложению Е. В. Погосова [42], III тип делится на два подтипа: III a — с соотношением ионов $\text{Cl}^- < \text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ — характерен для морской воды; III b — с соотношением ионов $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ — характерен для глубинных рассолов.

Для краткого обозначения химического состава воды по классификации О. А. Алекина применяются индексы, в которых классы, группы и типы обозначаются определенными символами: класс — символом соответствующего аниона $\text{C}—\text{HCO}_3^-$, $\text{S}—\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Cl}—\text{Cl}^-$, группа — символом катиона Na , Ca , Mg , тип — римской цифрой. В индексе внизу указывается минерализация воды с точностью до 0,1 г/л, вверху — общая жесткость с точностью до целых единиц мг·экв.

По классификации О. А. Алекина, преобладающими считаются ионы с наибольшей концентрацией; за второй преобладающий ион принимается тот, содержание которого уступает первому в пределах 10 % · экв.

Пример. Определим класс, группу, тип воды и запишем результаты анализа в виде индексов:

$$\text{M}_{1,2} \frac{\text{Cl} 46 \text{ HCO}_3 43 [\text{SO}_4 11]}{\text{Na} 72 [\text{Ca} 19 \text{ Mg} 9]},$$

Общая жесткость воды 3,3 мг·экв, класс гидрокарбонатно-хлоридных вод, группа натриевая, тип I, индекс воды $\text{CCl}_{1,2}^{\text{Na}^3}$.

Оценка качества воды для питьевого и хозяйственного водоснабжения. Вода, используемая для хозяйствственно-питьевого водоснабжения, должна удовлетворять требованиям ГОСТ 2874—73 «Вода питьевая». В ГОСТе даются предельные нормы для питьевой воды: 1) бактериальных показателей, 2) общих физических и химических показателей, 3) токсических веществ.

О санитарном состоянии питьевой воды судят по трем показателям: 1) количеству колоний, которые вырастают в 1 мл неразбавленной воды после помещения ее в питательную среду; 2) коли-титру, т. е. по количеству воды в мл, в котором обнаруживается одна кишечная палочка; 3) коли-индексу, т. е. по количеству кишечных палочек в 1 л воды.

Основные требования, предъявляемые к воде, используемой для хозяйственно-питьевого водоснабжения, приведены ниже (по ГОСТ 2874—73 и Плотникову Н. А., Сычеву К. И., 1976):

Показатели

*Предельное
содержание*

1. Мутность по стандартной шкале, мг/л	не >1,5
2. Цветность по платино-кобальтовой шкале, град	не >20
3. Запах при 20° С, балл	не >2
4. Привкус при 20° С, балл	не >2
5. Активная реакция, рН	6,5—8,5
6. Сухой остаток, мг/л	до 1000
7. Общая жесткость, мг·экв/л	не >7
8. Хлориды, Cl ⁻ , мг/л	не >350
9. Сульфаты, SO ₄ ²⁻ , мг/л	не >500
10. Железо, Fe ²⁺ —Fe ³⁺ , мг/л	до 0,3
11. Марганец, Mn ²⁺ , мг/л	до 0,1
12. Медь, Cu ²⁺ , мг/л	до 1
13. Цинк, Zn ²⁺ , мг/л	до 5
14. Остаточный алюминий, Al ³⁺ , мг/л	до 0,5
15. Свинец, Pb ²⁺ , мг/л	до 0,1
16. Мышиак, As ³⁺ , 5+, мг/л	до 0,05
17. Фтор, F:	
а) для I и II климатических районов, мг/л	до 1,5
б) для III, мг/л	до 1,2
в) для IV, мг/л	до 0,7
18. Бериллий, Be ²⁺ , мг/л	до 0,0002
19. Молибден, Mo ²⁺ , мг/л	до 0,5
20. Нитраты, по N, мг/л	до 10
21. Аммиак, по N, мг/л	до 2,0
22. Полиакриламид, мг/л	до 2,0
23. Селен, Se ²⁺ , мг/л	до 0,001
24. Стронций, Sr ²⁺ , мг/л	до 2
25. Уран природный, U и уран-238, мг/л	до 1,7
26. Радий 226, Ra, БК	до 14,8
27. Стронций-90, БК	до 0,005
28. Ртуть, Hg, мг/л	до 4,44
29. Никель, Ni, мг/л	до 1,0
30. Кобальт, Co, мг/л	до 1,0
31. Кадмий, Cd, мг/л	до 0,01
32. Цианиды (в расчете на циан), мг/л	до 0,1
33. Барий, Ba ²⁺ , мг/л	до 4,0
34. Нафтеновые кислоты, мг/л	до 0,3
35. Фенолы, мг/л	до 0,001
36. Хром, Cr ⁶⁺ , мг/л	до 0,1
37. Хром, Cr ³⁺ , мг/л	до 0,5
38. Некоторые ПАВ (АБС, ДНС и др.), мг/л	до 0,5

Некоторые показатели (пункты 28—38) не вошли в ГОСТ 2874—73, но они утверждены Министерством здравоохранения СССР 28 декабря 1973 г. [40].

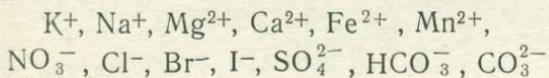
При отсутствии источника водоснабжения с пресной водой разрешается использовать воду с сухим остатком до 1500 мг/л при общей жесткости до 10 мг·экв/л. В каждом случае возможность использования таких вод для питьевого водоснабжения должно быть согласовано с органами санитарно-эпидемиологической службы.

Для производственного водоснабжения, орошения и обводнения могут быть использованы как пресные, так и солоноватые воды. Требования к качеству воды для этих целей устанавливаются водопотребляющими или проектными организациями.

§ 3. Графические методы изображения химического состава вод

Из большого разнообразия способов графического изображения химического состава воды в гидрологической практике наиболее употребительны прямоугольники солевого состава, треугольники Фере катионного и анионного составов, график-квадрат Толстыхина и комбинация двух квадратов и двух треугольников (по Е. В. Порохову, 1975).

Прямоугольники солевого состава (рис. 9) строятся для выяснения солевого состава воды и используются для изображения единичных анализов. Прямоугольник состоит из трех вертикальных граф или полос. В левой графе помещают катионы ($\% \cdot \text{экв}$), в правой — анионы. В средней полосе показывают состав и процентное содержание солей. Катионы и анионы на графике располагаются снизу вверх в последовательности, определяемой относительной реактивной силой:



Графики-треугольники Фере (рис. 10) составляются отдельно для катионов и анионов, содержание которых дается в $\% \cdot \text{экв}$. В вершинах треугольников содержание ионов составляет 100 $\% \cdot \text{экв}$. Положение анализов определяется пересечением трех линий, параллельных основанию треугольников.

График-квадрат Н. И. Толстыхина (рис. 11) представляет собой квадрат, каждая сторона которого разделена на 10 равных частей — по 10 $\% \cdot \text{экв}$. По горизонтальным сторонам квадрата наносят количество катионов ($\% \cdot \text{экв}$), по вертикальным — количество анионов. Для определения места воды в той или иной части квадрата Н. И. Толстыхин предложил пользоваться номером воды. Квадрат разделен на 100 мелких квадратиков, каждому из которых присвоен порядковый номер. Положение анализа на квадрате отмечается точкой и определяется пересечением двух осей координат.

Если точка находится в верхнем правом углу квадрата, вода, как правило, относится к гидрокарбонатному кальциевому типу; если в левом верхнем углу — к гидрокарбонатному натриевому. В левом нижнем углу сосредоточены преимущественно хлоридные натриевые воды, а в правом нижнем — сульфатные кальциевые.

График-квадрат Н. И. Толстыхина и *треугольники Фере* — удобные способы систематизации большого количества химических

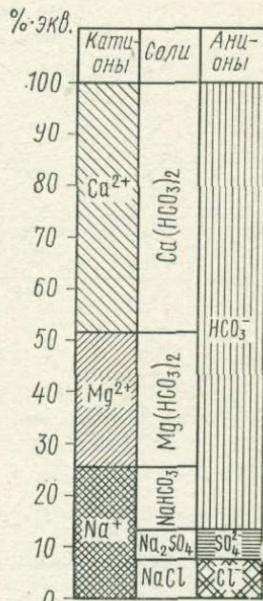


Рис. 9. График солевого состава воды

анализов вод. На рис. 9, 10, 11 показана обработка химанализа воды, приведенного в задаче 2 (см. табл. 8).

Комбинация двух треугольников и двух квадратов предложена Е. В. Посоховым для наглядного изображения результатов хими-

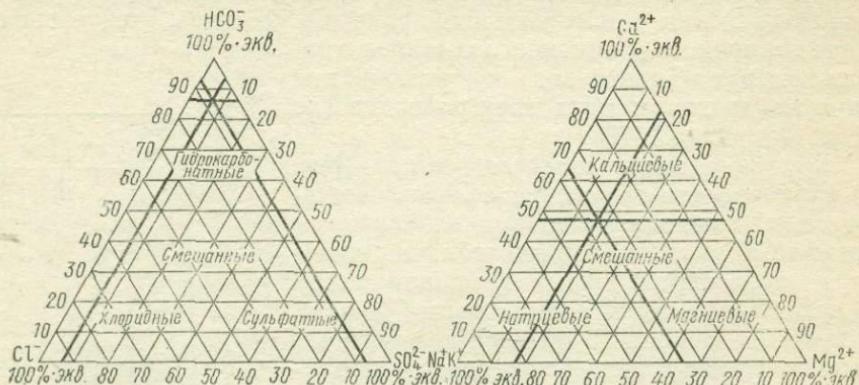


Рис. 10. Графики-треугольники Фере

ческого анализа вод применительно к классификации О. А. Алексина [42]. При помощи такого графика (рис. 12) можно изображать классы, группы и типы (за исключением четвертого, не укладывающегося в рамки классификации О. А. Алексина) вод.

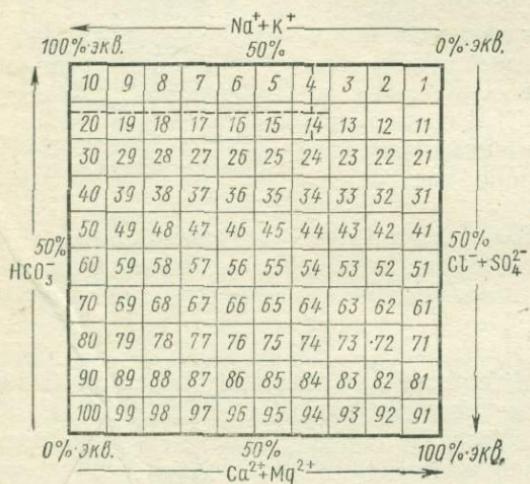


Рис. 11. График-квадрат Н. И. Толстихина

проекций укажет на принадлежность воды к определенному типу.

На нижний квадрат проектируются только точки вод, в химическом составе которых $\text{Cl}^- < \text{Na}^+$ (I и II типы). Точки вод, в которых $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$ (III тип), проектируются на верхний квадрат.

Каждый квадрат делится диагонально на два треугольника, причем в каждый треугольник квадрата попадают воды одного типа — I, II, III_a, III_b. Положение точки на квадрате показывает, в каких ассоциациях (солях) находятся ионы в природном растворе. В связи с этим квадраты разделены на отдельные четверти. На рис. 12 в верхнюю левую четверть нижнего квадрата попали воды с преобладанием HCO_3^- и Na^+ . Для отражения минерализации вод на графике имеется специальная шкала, которая видоиз-

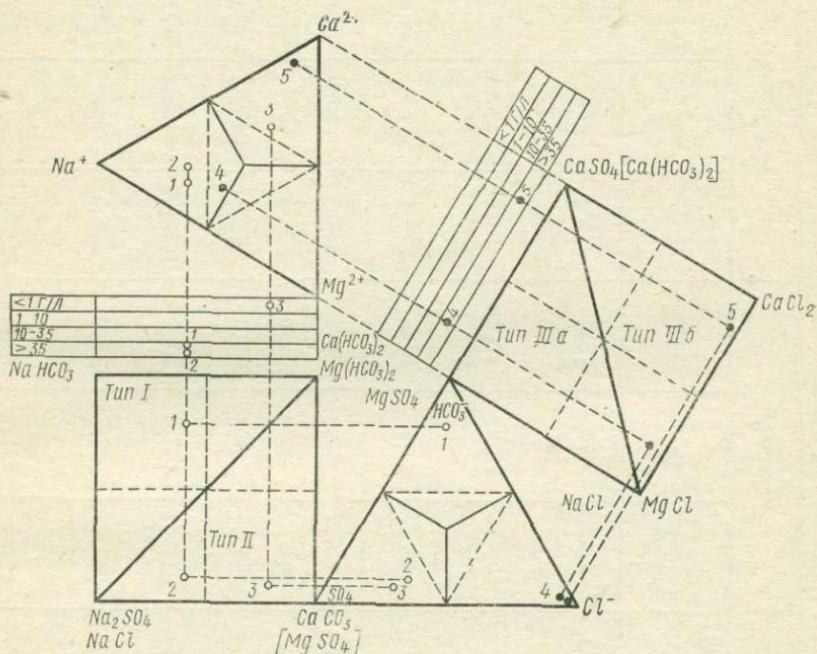


Рис. 12. График-комбинация двух треугольников с двумя квадратами

меняется в зависимости от того, воды каких градаций минерализации необходимо выделить. В качестве примера [42] на график нанесены точки следующих составов вод: 1) гидрокарбонатная натриевая I типа, 2) сульфатная натриевая II типа, 3) сульфатная кальциевая II типа, 4) хлоридная кальциево-натриевая типа III_b, 5) хлоридная кальциевая типа III_b. Шкала минерализации показывает, что минерализация вод составов 1, 2, 4 и 5 более 35 г/л, а состава 3 менее 1 г/л.

Задача 2. По данным табл. 7 обработать химический анализ подземной воды.

1. Пересчитать результаты анализа из ионной формы в г/л в миллиграмм-эквивалентную и процент-эквивалентную.

2. Определить виды жесткости (общую, карбонатную и некарбонатную).

Таблица 7. Химические анализы подземных вод

№ водонап. пункта	Физические свойства	Активная реакция, рН	Сухой остаток, г/л	Катионы, мг/л			Анионы, мг/л			Второстепенные компоненты, мг/л	Коли-титр
				Na ⁺ +K ⁺ (по разности)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
1	Мутность, 2,5 мг/л, запах 2 балла, T 18° С	7,2	0,98	244	79	15,60	113	332	360	—	250
2	Без цвета и запаха, прозрачная, T — 11° С	7,5		50,95	72,30	15,60	21,0	17,22	402,0	—	380
3	Без цвета и запаха, T 14° С	7,8	1,4	368,2	52,1	559	447,5	310,3	237,9	—	180
4	T 68° С	—	85,2	7745,5	4168	632	51592	87	220	25	—
5	T 42° С	4,6	91,6	29471	4649	12,2	55672	24,7	—	10	—
6	Без цвета, запаха, T 10° С	7,4	2,6	984,6	12	260,2	978,7	245,3	603,9	—	400
7	Без цвета, запаха, T 14° С	—	18,1	6512,5	146,3	35,8	10708,9	118,1	451,4	—	—
8	Запах 1 балл, мутность 0,8 мг/л, T 12° С	7,3	0,9	236,2	56,7	18,2	276,6	222,2	219,6	—	350
9	T 43° С	7,1	33,5	11189	721,3	328,3	19289	7,0	317,3	22	—
10	T 63° С	7,6	64,3	22061	430	18,2	40247	—	829,6	10	—

3. Вычислить минерализацию воды, оценить степень минерализации воды.

4. Оценить воду по рН.

5. Выразить химический состав воды формулой М. Г. Курлова.

6. Определить класс и группу воды, дать наименование воды по классификации С. А. Щукарева.

7. Выразить состав воды через индекс О. А. Алекина.

8. Обработать графически результаты химического состава воды по способу прямоугольника солевого состава, треугольников, квадрата Н. И. Толстыхина.

9. Оценить пригодность воды для питья.

Пример выполнения задачи 2 по анализу 2 табл. 7.

1. Для пересчета результатов анализа из ионной формы (мг/л) в мг·экв воспользуемся табл. 3. Данные по пересчету заносим в табл. 8.

Таблица 8

Ионы	Пересчетный множитель	Содержание		
		мг/л	мг·экв/л	% мг·экв
Катионы: Na^+ + K^+ (по разности)	0,04348	50,95	2,6	35
Ca^{2+}	0,04990	72,30	3,6	48
Mg^{2+}	0,08224	15,60	1,3	17
Итого:			7,5	100
Aнионы: Cl^-	0,02820	21,0	0,6	8
SO_4^{2-}	0,02082	17,22	0,35	5
HCO_3^-	0,01639	402,0	6,55	87
Итого:			7,5	100

2. Общая жесткость равна сумме мг·экв/л ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , т. е. $3,6 + 1,3 = 4,9$ мг·экв/л. Карбонатная жесткость также равна 4,9 мг·экв/л, так как содержание иона HCO_3^- превышает общую жесткость. Некарбонатная жесткость равна нулю. По общей жесткости (см. с. 19) вода относится к умеренно жесткой.

3. Минерализация воды согласно данным анализа равна сумме ионов: $50,95 + 72,30 + 15,60 + 21,0 + 17,22 + 402,0 = 579,07$ мг/л. По степени минерализации (см. с. 20) вода относится к пресной.

4. По $\text{pH}=7,5$ вода относится к щелочной.

5. Формула М. Г. Курлова имеет вид

$$\text{M } 0,57 \frac{\text{HCO}_3 \text{ 87 } [\text{Cl } 8 \text{ SO}_4 \text{ 51}]}{\text{Ca } 48 \text{ Na } 35 \text{ [Mg } 17]} \text{ T}^\circ\text{C } 11 \text{ pH } 7,5.$$

6. По классификации С. А. Щукарева вода относится к четвертому классу (см. табл. 6) и именуется гидрокарбонатной натриево-кальциевой.

7. По классификации О. А. Алекина класс воды — гидрокарбонатный, группа кальциевая, тип I. Индекс воды $C_{10,6}^{Ca_5}$.

8. Графическая обработка результатов анализа показана на прямоугольнике солевого состава (см. рис. 9), на двух треугольниках Фере (см. рис. 10) и квадрате Н. И. Толстыхина (см. рис. 11).

9. Вода по общей жесткости, минерализации, содержанию ионов и коли-титру вполне пригодна для питья, так как все показатели находятся в пределах ГОСТ 2874—73.

ГЛАВА 4. ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

Грунтовые воды — подземные воды первого от поверхности постоянно существующего водоносного горизонта, залегающего на первом выдержанном водоупорном пласте. Грунтовые воды характеризуются следующими особенностями:

1. Область питания обычно совпадает с областью распространения.

2. Основные источники питания — атмосферные поверхностные и конденсационные воды, а иногда и нижележащие напорные.

3. В большинстве случаев эти воды безнапорные, т. е. поверхность грунтовых вод, сообщающаяся с атмосферой, испытывает только атмосферное давление; она носит название *свободной поверхности*.

4. Грунтовые воды гидравлически связаны с поверхностными водотоками и водоемами — реками, озерами, заболоченными понижениями.

5. Режим грунтовых вод испытывает непосредственное влияние гидрометеорологических факторов и характеризуется сезонными колебаниями уровня, дебита и химического состава.

При изучении грунтовых вод для водоснабжения, мелиорации, строительства различных сооружений и других целей большое внимание уделяется изучению поверхности грунтовых вод. Форма поверхности грунтовых вод определяется водопроницаемостью пород, условиями питания водоносного горизонта, конфигурацией берегов рек, к которым стекают грунтовые воды, понижением водоупора, мощностью водоносного пласта и т. д. О форме их поверхности можно судить по карте гидроизогипс. *Гидроизогипсами* называют линии, соединяющие точки с одинаковыми отметками уровней грунтовых вод.

По карте гидроизогипс решаются важные практические задачи: проектирование водоснабжения на базе грунтовых вод, разработка осушительных мероприятий, выбор площадок под промышленные или гражданские сооружения и др.

§ 1. Построение карт гидроизогипс и глубин залегания грунтовых вод

Для построения карты гидроизогипс в ряде водопунктов на площади распространения водоносного горизонта устанавливают

путем непосредственного измерения губины залегания поверхности грунтовых вод. В качестве водопунктов могут быть использованы скважины, шурфы, колодцы, источники и водомерные посты на реках. Уровни замеряют специальными приборами (см. гл. 12).

Так как уровень грунтовых вод постоянно изменяется под влиянием различных природных и искусственных факторов, то карту гидроизогипс можно составлять только по результатам одновременных или близких по времени (один-два дня) замеров. Если по скважинам участка проводились длительные наблюдения за уровнем грунтовых вод, можно составить несколько карт гидроизогипс по сезонам года (в межень, паводок и др.).

Карты гидроизогипс составляют в масштабах от 1:10 000 до 1:200 000 в зависимости от характера и стадии гидрогеологических исследований. Сечение гидроизогипс выбирают в зависимости от принятого масштаба карты, густоты пунктов наблюдений за уровнем грунтовых вод, уклона их поверхности. Обычно берут сечения 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 и 5,0 м. Полученные при замерах глубины залегания уровня грунтовых вод пересчитывают на абсолютные или относительные (реже) отметки по формуле

$$H_{\text{в}} = H_3 - h, \quad (4.1)$$

где $H_{\text{в}}$ — абсолютная отметка уровня воды в данном пункте; H_3 — абсолютная отметка поверхности земли в том же пункте; h — глубина залегания воды. Вычисленные отметки уровня грунтовых вод наносят на топографическую основу и методом интерполяции строят гидроизогипсы. Наиболее удобно интерполировать отметки по способу треугольников: все точки, по которым производились замеры, соединяют линиями, образующими треугольники. При интерполяции этим методом должны соблюдаться следующие правила:

1. Линии, образующие треугольники, необходимо проводить так, чтобы длинная сторона треугольника была перпендикулярна к направлению падения потока.

2. Не интерполировать точки, расположенные по разные стороны поверхностных водотоков и водоемов. При наличии таких водотоков необходимо определять отметки урезов рек по водомерным постам и использовать их при интерполяции как точки выхода грунтовых вод на урезе реки (предварительно должен быть проанализирован характер дренирования грунтовых вод).

3. Не следует проводить интерполяцию между группами скважин, расположенных далеко друг от друга. Лучше провести интерполяцию для каждой группы скважин отдельно, иначе можно исказить действительную форму поверхности грунтового потока.

При интерполяции удобно пользоваться палеткой на кальке в виде масштабной сетки, состоящей из системы параллельных линий, проведенных на расстоянии 1—2 мм (иногда 2—5 мм). С помощью масштабной сетки пропорционально делят отрезки, соединяющие точки, отметки уровня которых подлежат интерполяции. После интерполяции соединяют точки с одинаковыми отметками;

эти кривые и будут гидроизогипсами. Порядок интерполяции при помощи масштабной сетки и наведения треугольников показан на рис. 13, 14.

Кроме карт гидроизогипс для целей

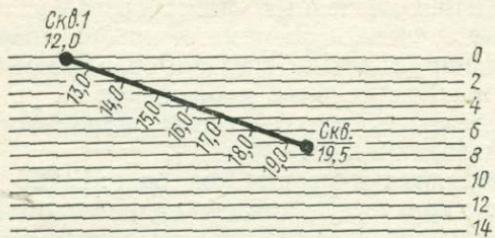


Рис. 13. Схема интерполяции при помощи масштабной сетки

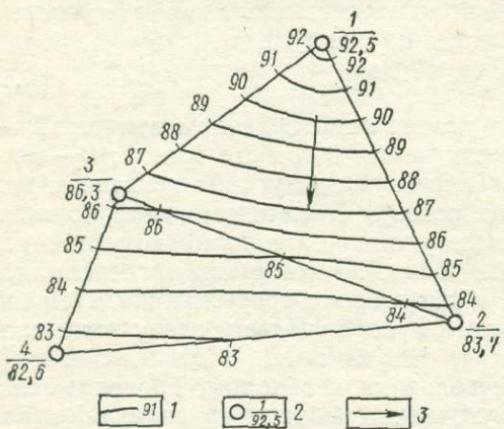


Рис. 14. Схема интерполяции методом треугольников:

1 — гидроизогипса и ее отметка, 2 — скважина, ее номер и абсолютная отметка уровня, 3 — направление движения грунтовых вод

вод. Чаще всего для решения различных практических задач на одной и той же топографической основе составляют карту гидроизогипс и глубин залегания поверхности грунтовых вод и карту изолиний кровли подстилающего водоупора.

§ 2. Анализ карт гидроизогипс

Анализ карт гидроизогипс позволяет составить краткую гидрогеологическую характеристику участка. По карте гидроизогипс можно определять: 1) направление движения грунтовых вод на заданном участке; 2) глубину залегания грунтовых вод в любой

проектирования и строительства могут составляться карты глубин залегания поверхности грунтовых вод. В зависимости от требуемой точности глубину залегания уровня грунтовых вод показывают гидроизобатами через определенные интервалы глубин — 2—5, 5—10, чаще через 0,5 м (до глубины 10 м), которые соответствуют некоторым общим требованиям различных отраслей народного хозяйства (заключение фундаментов, мелиорация земель и др.).

Изобатами называются линии, соединяющие точки с одинаковыми глубинами залегания грунтовых вод. Для получения сведений, необходимых для построения гидроизобат, обычно бурят большое число специальных скважин, равномерно расположенных по всей территории. Карты изобат, так же как и гидроизогипс, строят методом интерполяции глубин залегания уровня грунтовых

точке или на любом участке; 3) уклон грунтового потока; 4) характер взаимосвязи грунтовых вод с поверхностными; 5) условия питания и разгрузки грунтовых вод.

Направление движения грунтовых вод берут по нормали к двум смежным гидроизогипсам. Движение воды направлено от более высоких отметок уровня к более низким (рис. 14).

Глубину залегания грунтовых вод в любом заданном пункте определяют по разности отметок горизонтали поверхности и гидроизогипсы. Уклон потока подземных вод для любого участка вычисляют делением сечения карты гидроизогипс на кратчайшее расстояние между двумя гидроизогипсами, взятое в масштабе карты.

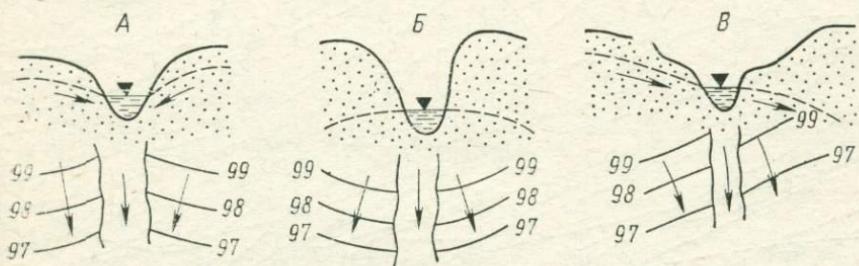


Рис. 15. Схема связи грунтовых вод с поверхностными: А — река дренирует грунтовые воды, Б — река питает грунтовые воды, В — река питает и дренирует грунтовые воды

Связь грунтовых вод с поверхностными устанавливают по характеру сопряжения гидроизогипс с рекой. В природе наблюдаются два основных случая: первый — грунтовые воды питают поверхностные (рис. 15, А), второй — поверхностные воды питают грунтовые (рис. 15, Б). Кроме того, реки могут одновременно питать и дренировать грунтовые воды (рис. 15, В).

По соотношению и характеру изменения гидроизогипс можно получить представление о потоке. Участки замкнутых гидроизогипс с высокими отметками указывают на положение водоразделов грунтовых вод, где условия питания наиболее благоприятны. Зоны с нулевой глубиной до воды указывают на участки выхода подземных вод на поверхность земли.

Если на пути движения потока сильно водопроницаемые породы сменяются слабо водопроницаемыми, гидроизогипсы сгущаются, так как поверхность грунтовых вод приобретает больший уклон. При поступлении грунтовых вод из слабо водопроницаемого в сильно водопроницаемый пласт гидроизогипсы располагаются реже. Сгущение гидроизогипс может указывать также на уменьшение мощности водоносного пласта и на дренирующее влияние рек и озер.

Задача 3. Построить карту гидроизогипс на топографической основе заданного масштаба (рис. 16), используя данные табл. 9.

Необходимо: 1. Определить направление движения грунтовых вод, показать его стрелкой на карте.

2. На характерных участках определить гидравлический уклон потока.

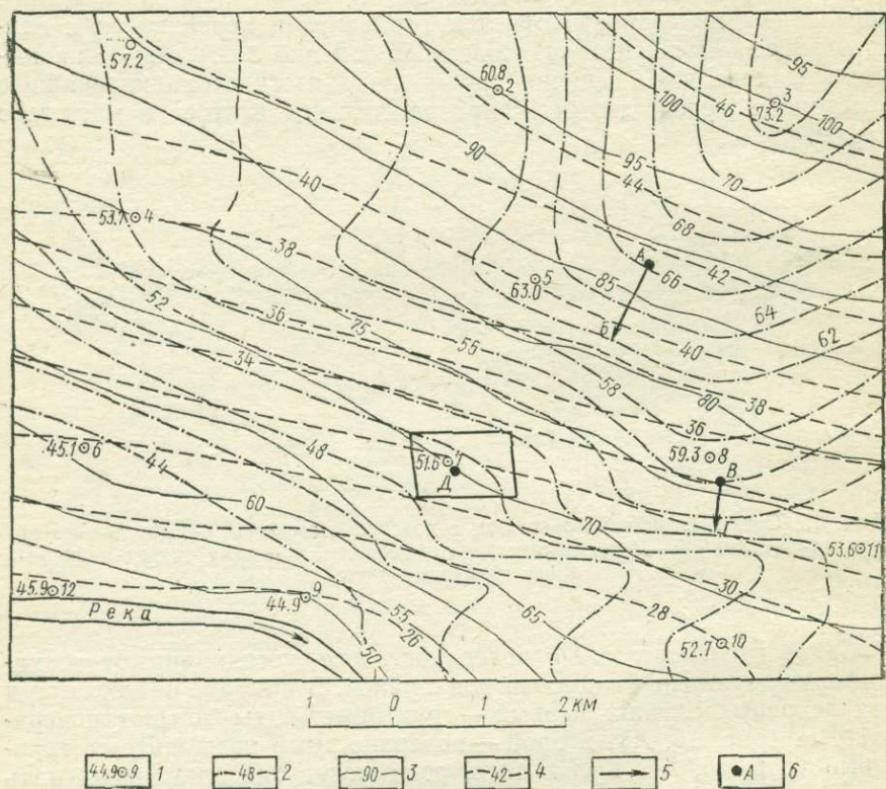


Рис. 16. Карта гидроизогипс:

1 — скважина (справа номер, слева — абсолютная отметка уровня), 2 — гидроизогипсы, 3 — горизонтали поверхности, 4 — изогипсы водоупора, 5 — направление движения грунтовых вод, 6 — произвольно взятые точки для определения уклона и глубины до воды

3. Охарактеризовать условия питания и разгрузки грунтовых вод.

4. Охарактеризовать характер связи между грунтовыми и поверхностными водами реки.

5. Определить на участке проектируемого поселка (в центре — точка Д) глубину залегания и мощность грунтовых вод.

6. Рекомендовать места расположения скважин или колодцев для водоснабжения поселка.

Решение. 1. Для построения карты вычислим абсолютную отметку уровня воды по каждому водопункту и результаты занесем в графу 5 табл. 9.

Таблица 9

№ водопункта	Дано			Определить	
	абсолютная отметка устья, м	уровень воды, м	абсолютная отметка устья, м	абсолютная отметка уровня, м	мощность водоносного горизонта, м
1	84,5	27,5	41,7	57,0	15,3
2	95,0	34,2	44,3	60,8	16,5
3	100,0	26,8	46,5	73,2	26,7
4	75,0	21,3	38	53,7	15,7
5	83,0	20,0	40	63,0	23,0
6	61,5	15,4	29,9	45,1	15,2
7	70,0	18,4	32	51,6	19,60
8	77,0	17,7	34,8	59,3	24,50
9	50,0	5,1	25,9	44,9	19,0
10	67,5	14,8	28,1	52,70	24,60
11	74,0	20,4	33,0	53,60	20,60
12	48,0	2,1	25,7	45,9	20,1

2. Вычислим мощность водоносного горизонта в каждом водопункте, результаты занесем в графу 6 табл. 9.

3. На топографической основе около каждого водопункта пропишем справа абсолютные отметки уровня воды.

4. Интерполируем абсолютные отметки уровня (сечение гидроизогипс 2 м) и проводим гидроизогипсы.

5. Проанализировав построение гидроизогипс, устанавливаем, что движение потока грунтовых вод происходит с северо-востока на юго-запад.

6. Гидравлический уклон потока определяем на участках *A—B* и *B—Г*. Он равен разности отметок уровня воды в этих точках, деленной на расстояние между этими точками. Уклон на участке *A—B* $I = \frac{66 - 62}{1000} = 0,004$,

$$\text{на участке } B—\Gamma I = \frac{56 - 52}{500} = 0,008.$$

По карте гидроизогипс устанавливаем:

1. Водоносный горизонт получает питание по всей площади распространения, областью разгрузки является река.

2. Грунтовые воды питают поверхностные воды реки.

3. Глубина залегания уровня воды в центре поселка 18,4 м, мощность грунтовых вод 19,6 м.

4. Колодцы или скважины для водоснабжения поселка рациональнее расположить в северо-западной части поселка, так как в этом случае водозабор будет находиться выше по потоку грунтовых вод относительно поселка, что исключает загрязнение грунтовых вод с поверхности.

ГЛАВА 5. АРТЕЗИАНСКИЕ ВОДЫ

Подземные воды, залегающие между двумя водоупорами и обладающие напором, называются артезианскими. Они заполняют водоносный пласт на всю его мощность. При вскрытии таких водоносных пластов буровыми скважинами уровень воды в них поднимается выше кровли водоносного пласта. Этот уровень называется напорным или пьезометрическим. Иногда уровень воды в скважинах, вскрывших водоносный пласт, поднимается выше поверхности земли, и вода из них изливается на поверхность.

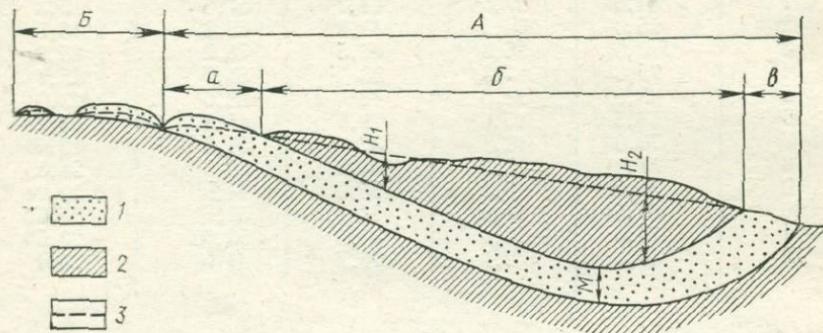


Рис. 17. Схема артезианского бассейна (по А. М. Овчинникову):

A — пределы распространения артезианских вод, а — область питания (и частично — стока), б — область напора, в — область разгрузки, Б — пределы распространения грунтовых вод, H_1 — напорный уровень выше поверхности земли, H_2 — напорный уровень ниже поверхности земли, М — мощность артезианского горизонта, 1 — водоносный пласт, 2 — водоупорные породы, 3 — уровень воды

Артезианские воды приурочены к мульдообразным структурам, обширным впадинам и прогибам. Значительные по площади структуры, в которых один, два или несколько напорных горизонтов и комплексов, называют артезианскими бассейнами. В каждом артезианском бассейне выделяют: а) область питания, б) область напора и в) область разгрузки (рис. 17).

Область питания — площадь выхода водопроницаемых горных пород, участвующих в строении артезианского бассейна, на дневную поверхность. Располагается эта область на высоких отметках. Подземные воды области питания не обладают напором, имеют непосредственную связь с атмосферой, часто дренируются местной гидрографической сетью.

Область напора — площадь развития артезианского бассейна, в пределах которой пьезометрический уровень располагается выше кровли водоносного пласта. Расстояние по вертикали от кровли водоносного горизонта до пьезометрического уровня называется напором. В зависимости от отметок поверхности земли по отношению к пьезометрической линии в отдельных пунктах напор может быть положительным, если уровень воды выше поверхности земли, или отрицательным, если уровень воды ниже поверхности земли.

Область разгрузки — область выхода напорных вод на поверхность в виде восходящих источников. Разгрузка артезианских вод может происходить по долинам рек и оврагов, по зонам разломов, в аллювиальные отложения, в русла рек или переливом из одного бассейна в другой.

В разрезе артезианского бассейна обычно несколько напорных водоносных горизонтов и комплексов, каждый из которых при отсутствии гидравлической связи характеризуется своей пьезометрической поверхностью, определяемой уровнями воды в областях питания и разгрузки данного водоносного горизонта или комплекса.

Кроме артезианских бассейнов напорные воды встречаются в так называемых артезианских склонах — асимметричных бассейнах с моноклинально залегающими или выклинивающимися водоносными горизонтами (рис. 18). В артезианском склоне области питания и разгрузки находятся рядом, на границе областей питания могут выходить как восходящие, так и нисходящие источники.

Распределение пьезометрических уровней на площади распространения артезианских вод определяется соотношением их отметок в области питания и разгрузки. Пьезометрическая поверхность не является реальной поверхностью воды, пьезометрический уровень устанавливается только в скважинах, вскрывших артезианский водоносный пласт. На тех участках, где отсутствуют скважины, пьезометрический уровень можно установить по картам гидроизоповез.

Гидроизоповезами (пьезоизогипсами) называются линии, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными отметками пьезометрического уровня. Совокупность таких линий образует карту гидроизоповез.

§ 1. Построение карт гидроизоповез

Для построения карт гидроизоповез необходимо располагать данными о глубине залегания пьезометрического уровня в скважинах, колодцах и других горных выработках, необходимо иметь абсолютные отметки их устьев. Кроме водопунктов, расположенных в зоне напора артезианских вод, необходимо использовать отметки источников, урезов рек, озер, болот, расположенных в областях питания и разгрузки артезианских вод и имеющих гидрав-

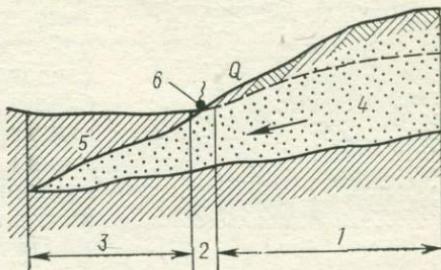


Рис. 18. Схема артезианского склона:
1 — область питания артезианского склона,
2 — область разгрузки, 3 — область напора,
4 — водоносная порода, 5 — водоупорная порода, 6 — источники нисходящие и восходящие

лическую связь с подземными водами. По имеющимся водопунктам вычисляются абсолютные (реже относительные) отметки пьезометрического уровня, затем интерполируют по способу, изложенному в гл. 4.

Карты гидроизопьез строятся в различных масштабах, чаще всего с использованием

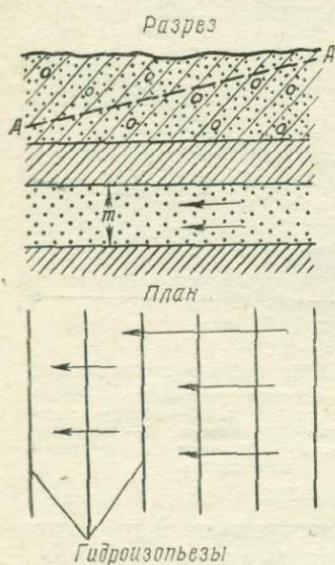


Рис. 19. Пьезометрическая поверхность АА неоднородного по водопроводимости напорного водоносного горизонта постоянной мощности и положение гидроизопьез; т — мощность водоносного горизонта

точки, расположенные на разных склонах речных долин и оврагов. Карты гидроизопьез должны сопровождаться гидрогеологическими разрезами, построенными по данным бурения скважин. На разрезах показывают стратиграфические границы, литологический состав пород, отметки пьезометрического уровня, высоту напора и другие данные.

§ 2. Анализ карты гидроизопьез

Карта гидроизопьез отражает форму пьезометрической поверхности артезианских вод, поэтому по такой карте можно определить важные гидрогеологические показатели водоносного пласта и охарактеризовать основные особенности его строения.

Форма пьезометрической поверхности во многом определяется водопроницаемостью пород и мощностью водоносного пласта. Тео-

ретически в однородных по водопроницаемости пластах постоянной мощности пьезометрическая поверхность должна иметь вид плоскости (в сечении — прямая линия), а гидроизопьезы — вид прямых, расположенных друг от друга на одинаковом расстоянии (рис. 19). В действительности вследствие фильтрации воды через кровлю и подошву пласта и проявления упругих сил в воде и в водоносной породе пьезометрическая поверхность имеет изогнутый вид.

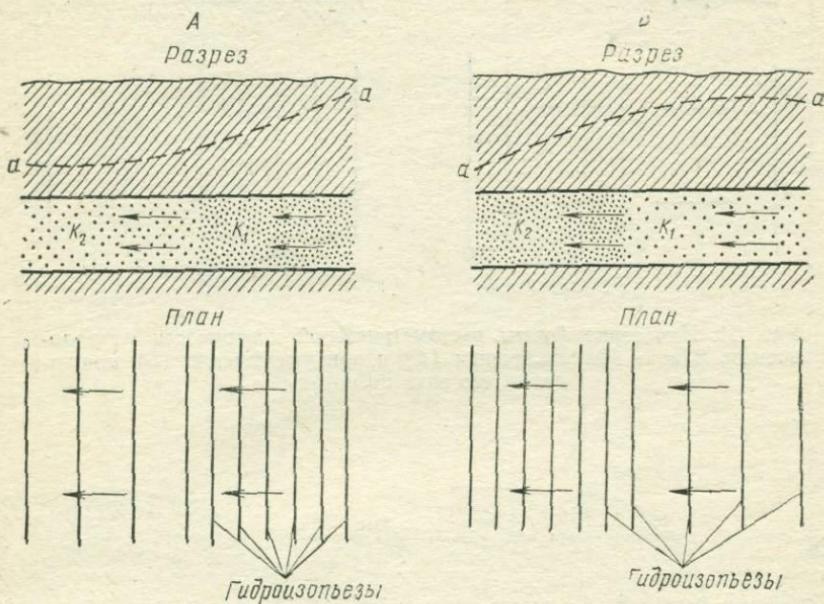


Рис. 20. Изменение формы пьезометрической поверхности *aa* водоносного пласта при увеличении (*A*) и при уменьшении (*B*) водопроницаемости пород. K_1 , K_2 — коэффициенты водопроницаемости водовмещающих пород

По сгущению и разрежению гидроизопьез судят об изменении мощности водоносного горизонта или водопроницаемости пород. Если водопроницаемость пород увеличивается вниз по потоку, пьезометрическая поверхность выполняется — гидроизопьезы разреживаются (рис. 20, *A*; $K_2 > K_1$). При уменьшении водопроницаемости пьезометрическая поверхность становится круче, а гидроизопьезы сгущаются (рис. 20, *B*; $K_2 < K_1$). Если мощность *m* водоносного пласта увеличивается по потоку, пьезометрическая крияя выполняется (рис. 21, *A*), а при уменьшении мощности она становится круче (рис. 21, *B*).

По карте гидроизопьез можно судить о связи напорных вод с поверхностными водотоками и водоемами. Если русло реки врезано в водоносный горизонт, связь осуществляется непосредственно: напорные воды стекают в реку (рис. 22). Гидроизопьезы вблизи

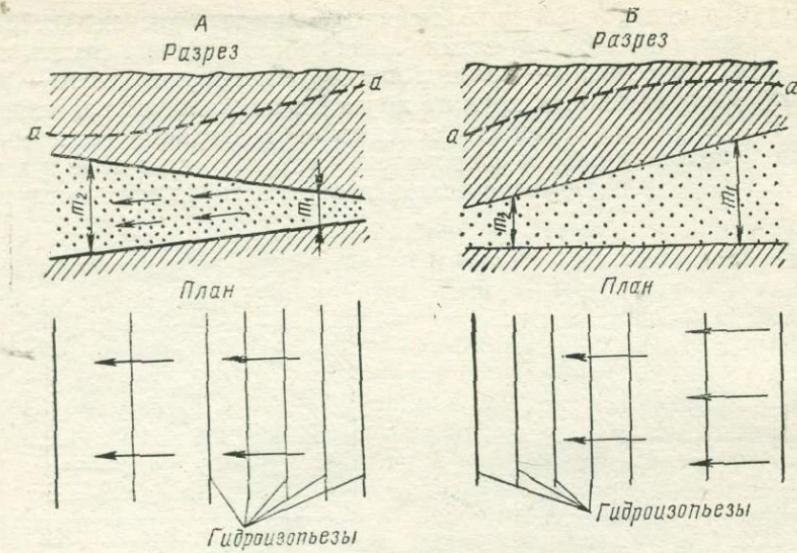


Рис. 21. Изменение формы пьезометрической поверхности *aa* водоносного пласта при увеличении (А) и при уменьшении (Б) мощности *m* его вниз по потоку

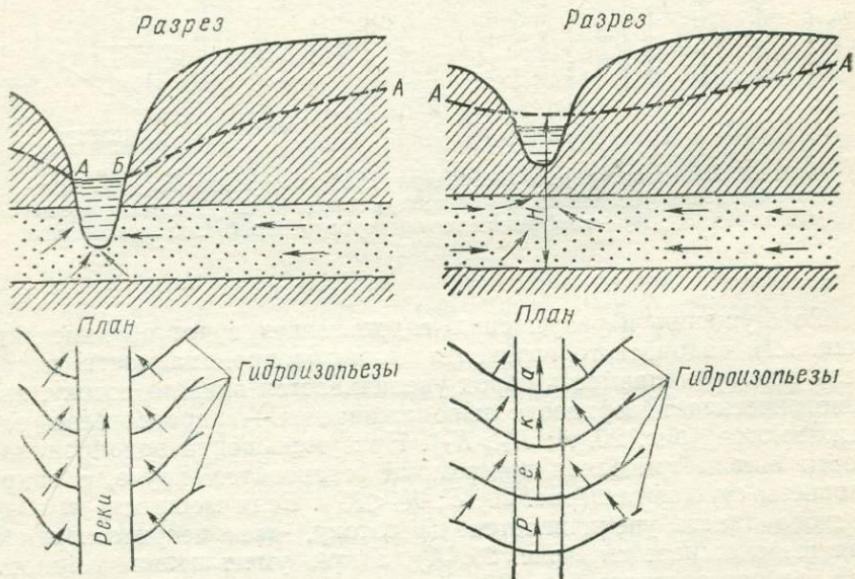


Рис. 22. Питание реки напорными водами при врезе русла реки в водоносный пласт; *AA* — пьезометрическая поверхность

Рис. 23. Питание реки напорными водами через водопроницаемую кровлю; *AA* — пьезометрическая поверхность

реки изменяют свою форму, «упираясь» в реку, в пьезометрической поверхности образуется понижение — депрессия. При затрудненной гидравлической связи напорного водоносного пласта пьезометрическая поверхность вблизи реки имеет слабо изогнутый вид. Отметки гидроизопьез значительно выше отметок уровня воды в реке и пересекают ее (рис. 23).

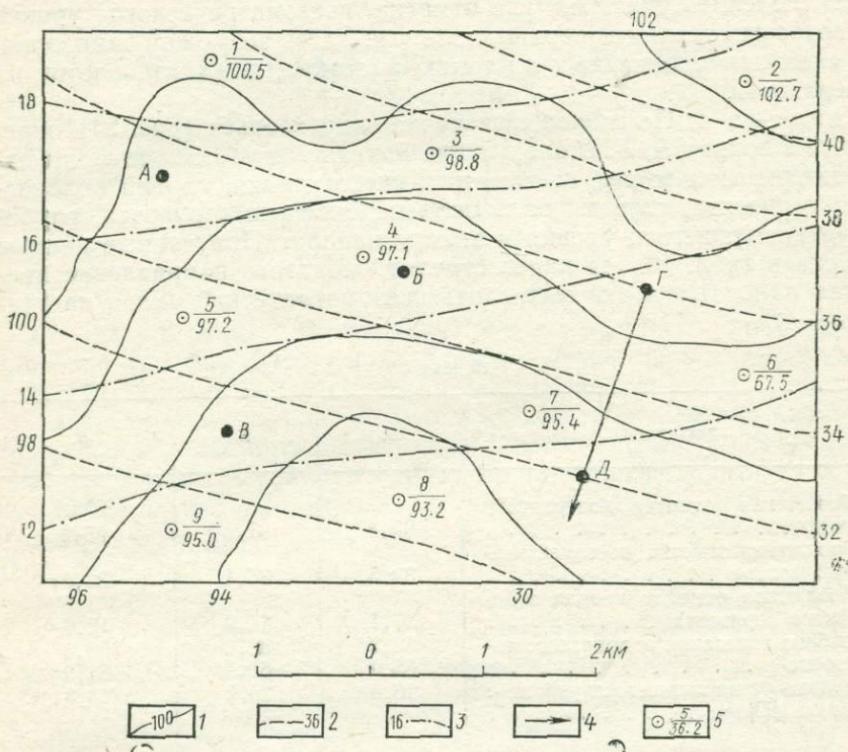


Рис. 24. Карта гидроизопьез (пример):

1 — горизонтали поверхности, 2 — гидроизопьезы, 3 — изогипсы кровли водоносного горизонта, 4 — направление движения артезианских вод, 5 — скважина (в числителе номер скважины, в знаменателе отметка пьезометрического уровня)

По карте гидроизопьез можно также решить и другие вопросы:

1. Определить направление движения напорных вод на заданном участке проведением нормали к двум смежным гидроизопьезам; поток направлен в сторону меньшей из них.
2. Вычислить уклон пьезометрической поверхности на заданном участке, разделив разницу напоров смежных гидроизопьез в двух точках, взятых по направлению движения потока, на расстояние между ними в масштабе карты.
3. Выяснить глубину до воды или отметку уровня воды в любой заданной точке. Глубина до установившегося уровня при вскры-

тии артезианского потока скважиной равна разности между отметками поверхности земли и пьезометрического уровня.

4. Определить для любой точки высоту напора воды над кровлей водоносного пласта, равную разности отметок пьезометрического уровня и кровли водоносного пласта.

5. Вычислить мощность водоносного пласта по разности отметок его кровли и подошвы.

6. Выделить участки, где отметки пьезометрического уровня превышают отметки поверхности земли. Здесь возможен самоизлив. Из скважин, пройденных на таких участках, вода изливается на поверхность.

Задача 4. По имеющейся карте гидроизопьез (рис. 24) определить в точках *A*, *B*, *V* следующие показатели: абсолютные отметки поверхности земли, пьезометрического уровня, кровли водоносного горизонта, глубину залегания водоносного горизонта, глубину установившегося уровня и высоту напора. Полученные данные занести в табл. 10. На карте стрелкой показать направление движения напорных вод и вычислить пьезометрический уклон на участке *Г—Д*.

Таблица 10

Показатели, м	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>V</i>
1. Абсолютная отметка поверхности земли	99,4	97,0	95,2
2. Абсолютная отметка пьезометрического уровня	33,5	35,1	31,2
3. Абсолютная отметка кровли водоносного горизонта	17,1	14,9	12,9
4. Глубина залегания водоносного горизонта	82,3	82,1	82,3
5. Глубина установившегося уровня	65,9	61,9	64,0
6. Высота напора	16,4	20,2	18,3

Движение подземных вод направлено с северо-востока на юго-запад. Пьезометрический уклон на участке *Г—Д* $I = \frac{36 - 32}{1750} = 0,0023$.

Часть 2

ДИНАМИКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Законы фильтрации подземных вод. На основе опытов по фильтрации воды через песок, засыпанный в трубы, французский гидравлик А. Дарси в 1856 г. установил зависимость

$$Q = kF \frac{\Delta H}{L}, \quad (6.1)$$

где Q — расход воды через трубку; k — коэффициент пропорциональности (коэффициент фильтрации); F — площадь поперечного сечения трубы; ΔH — потеря напора при фильтрации воды, отнесенная к длине пути фильтрации L . Обозначим отношение падения напора ΔH к длине пути фильтрации L через напорный градиент I . Разделим обе части уравнения (6.1) на площадь поперечного сечения трубы F и, использовав понятие «скорость фильтрации» $\frac{Q}{F} = v$, получим формулу

$$v = kI. \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) указывает на линейную зависимость скорости фильтрации v от напорного градиента I . По закону Дарси скорость фильтрации прямо пропорциональна напорному градиенту в первой степени. Закон Дарси справедлив для ламинарного движения, которое широко распространено в природных условиях. Поэтому этот закон часто называют основным законом движения подземных вод.

При турбулентном режиме течения наблюдается отклонение от линейного закона. Турбулентное движение подчиняется закономерности А. А. Краснопольского:

$$v = k_k \sqrt{I}, \quad (6.3)$$

где k_k — коэффициент фильтрации по Краснопольскому. Из формулы (6.3) следует, что при турбулентном движении скорость фильтрации прямо пропорциональна напорному градиенту в степени $1/2$.

Смешанное ламинарно-турбулентное движение чаще всего выражается уравнением Прони:

$$I = av + bv^2, \quad (6.4)$$

где a и b — параметры, зависящие от свойств пористой среды и фильтрующейся жидкости (определяются экспериментально).

Формулам (6.2; 6.3; 6.4) подчиняется движение гравитационных вод при различных режимах течения. Движение рыхлосвязанных вод в глинистых породах (вязкопластичный режим течения) характеризуется уравнением

$$v = k(I - I_0), \quad (6.5)$$

где I_0 — начальный напорный градиент. Фильтрация рыхлосвязанных вод начинается только после того, как напорный градиент превысит начальную величину I_0 .

Скорость фильтрации и действительная скорость движения подземных вод. Расходы фильтрационного потока определяются по формуле

$$Q = Fv. \quad (6.6)$$

В этой формуле площадь поперечного сечения F и скорость фильтрации v — фиктивные, так как вода движется не через все поперечное сечение водоносного пласта, а только через поры

Рис. 25. Схема прибора для изучения верхнего предела применимости закона Дарси

(или трещины) водовмещающих пород. Выразим тот же расход через действительную скорость i и реальную площадь, через которую движется вода. Последняя может быть представлена как произведение площади поперечного сечения потока F на пористость водовмещающих пород n (пористость дается в долях единицы). Тогда формула расхода примет вид

$$Q = Fni. \quad (6.7)$$

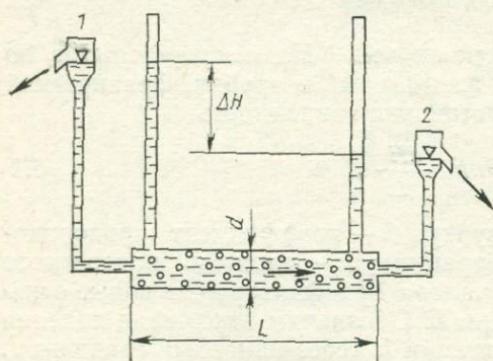
Приравнивая правые части уравнения (6.6) и (6.7) и сокращая на F , получим

$$v = ni. \quad (6.8)$$

Уравнение (6.8) показывает, что скорость фильтрации v равна действительной скорости i , умноженной на пористость n . Так как пористость всегда меньше единицы, то скорость фильтрации всегда меньше действительной скорости.

Задание 7. Определить верхний предел применимости закона Дарси.

Верхний предел применимости закона Дарси определяется на приборе, схема которого показана на рис. 25. Прибор — трубка диаметром 3 см (площадь поперечного сечения трубы $F = 7 \text{ см}^2$), заполненная гравием, пористость n которого равна 30%. К концам



трубки присоединены два передвижных водослива 1 и 2, с помощью которых создается разность напоров в трубке. Разность напоров ΔH определяется по разности уровней в пьезометрах, находящихся друг от друга на расстоянии $L = 70$ см.

С помощью водосливов 1 и 2 создадим разность напоров в пьезометрах ΔH от 2,5 до 87,5 см. Для каждой разности напоров, пользуясь водосливом 2, определяем расход по формуле

$$Q = \frac{V_b}{t}, \quad (6.9)$$

где V_b — объем воды (см^3), вытекший из водослива 2 за время t (с). По приведенным ниже данным [53] определяем напорный градиент I , скорость фильтрации v и отношение I/v :

Разность напоров ΔH , см . . .	2,5	7,0	35,0	52,5	70,0	87,5
--	-----	-----	------	------	------	------

Величина расхода $Q = \frac{V_b}{t}$, $\text{см}^3/\text{с}$	0,07	0,19	0,92	1,32	1,76	2,1
---	------	------	------	------	------	-----

Напорный градиент $I = \frac{\Delta H}{L}$	0,036	0,1	0,5	0,75	1,0	1,25
--	-------	-----	-----	------	-----	------

Скорость фильтрации $v = \frac{Q}{F}$, $\text{см}/\text{с}$	0,01	0,027	0,131	0,19	0,25	0,30
--	------	-------	-------	------	------	------

I/v	3,6	3,7	3,8	3,95	4,0	4,17
-----------------	-----	-----	-----	------	-----	------

Требуется определить: критическую скорость фильтрации v_{kp} , при которой происходит нарушение закона Дарси; действительную скорость v , соответствующую критической скорости фильтрации;

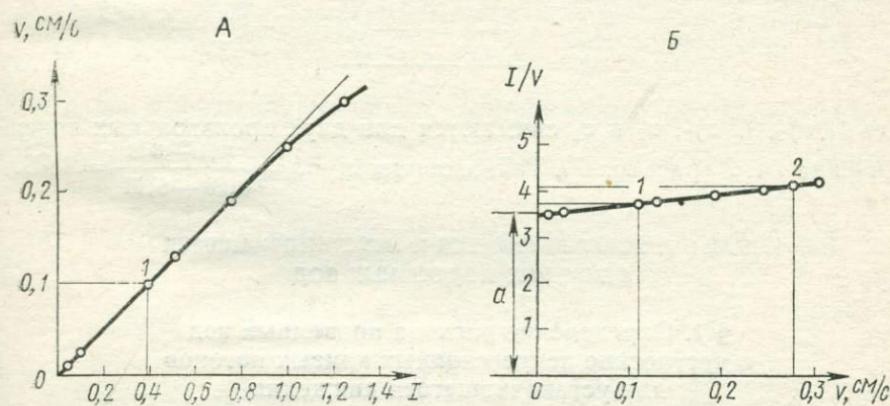


Рис. 26. Графики зависимости: А — $v=f(I)$; Б — $I/v=f(v)$

коэффициент фильтрации k ; параметры a и b из уравнения Прони (6.4).

Для определения критической скорости v_{kp} по данным опыта строится график $v=f(I)$. На графике (рис. 26, А) по оси ординат

откладывают скорость фильтрации v , по оси абсцисс — напорные градиенты. Критическая скорость определяется по графику в точке заметного отклонения графика от прямой линии. В данном случае $v_{kp}=0,2$ см/с = 173 м/сут. Следовательно, опыт необходимовести до тех пор, пока прямая на графике $v=f(I)$ не перейдет в кривую.

Действительная скорость u , соответствующая v_{kp} , определяется из формулы (6.8):

$$u = \frac{v}{n} = \frac{173}{0,3} = 577 \text{ м/сут.}$$

Чтобы определить коэффициент фильтрации k , нужно взять любую точку на графике $v=f(I)$, где она представляет прямую. Из точки I на графике проводят перпендикулярные линии на оси ординат и абсцисс. Эти линии при пересечении с осями дадут значения v_1 и I_1 (рис. 26, А). Пользуясь законом Дарси (6.2), вычисляют коэффициент фильтрации:

$$k = \frac{v_1}{I_1} = \frac{0,10}{0,38} = 0,26 \text{ см/с} = 225 \text{ м/сут.}$$

Параметры a и b устанавливаются по графику $\frac{I}{v} = f(v)$.

Для построения графика по оси ординат откладывают отношение I/V , а по оси абсцисс — скорость фильтрации. Построенный график (рис. 26, Б) — прямая, которая на оси I/v отсекает отрезок, равный a . В данном случае $a=3,6$. Параметр b определяется из выражения

$$b = \frac{\left(\frac{I}{v}\right)_2 - \left(\frac{I}{v}\right)_1}{v_2 - v_1}, \quad (6.10)$$

где $(I/v)_2$, $(I/v)_1$, v_2 и v_1 снимаются для двух произвольных точек графика 1 и 2 (рис. 26, Б). Таким образом, $b = \frac{4,1 - 3,8}{0,28 - 0,11} = 1,76$.

ГЛАВА 7. УСТАНОВИВШЕЕСЯ И НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 1. Определение расхода подземных вод и построение депрессионных кривых потоков для установившегося движения в однородных и неоднородных пластах

Разнообразные условия залегания подземных вод, литологическая неоднородность водовмещающих толщ вызывают необходимость схематизации природных условий и приведения их к типовым расчетным схемам. Ниже дается определение расхода подземных вод и построение депрессионных кривых для наиболее распространенных в природе случаев.

Движение грунтовых вод в однородном пласте при горизонтальном залегании водоупора. Единичный расход потока (расход, приходящийся на единицу ширины потока) определяется по формуле Ж. Дюпюи:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}}, \quad (7.1)$$

где k — коэффициент фильтрации водовмещающих пород. Остальные буквенные обозначения см. на рис. 27, А. Расход потока шири-

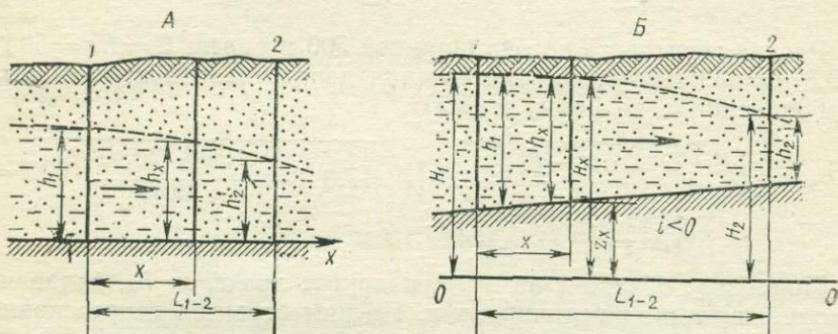


Рис. 27. Схема грунтового потока: А — при горизонтальном залегании водоупора; Б — при наклонном залегании водоупора:

h_1 , h_2 , h_x — мощности водоносного горизонта соответственно в верхнем, нижнем и промежуточном сечениях, x — расстояние между верхним и промежуточным сечениями; L_{1-2} — расстояние между сечениями 1 и 2; H_1 , H_2 , H_x — высоты напоров соответственно в верхнем, нижнем и промежуточном сечениях; z_x — превышение водоупора над плоскостью сравнения (0—0) в промежуточном сечении; i — уклон водоупора

ной B равен произведению ширины потока на единичный расход:

$$Q = Bq = Bk \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}}. \quad (7.2)$$

Для построения депрессионной кривой пользуются формулой

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L_{1-2}}x}, \quad (7.3)$$

где h_x — мощность потока в сечении, отстоящем от верхнего по потоку сечения на расстоянии x (рис. 27, А). Чтобы построить депрессионную кривую, задаются значениями x и по формуле (7.3) определяют h_x . Откладывая по оси абсцисс x , а по оси ординат соответствующие значения h_x , строят точки, соединив которые получим депрессионную кривую.

Задача 5. Грунтовые воды содержатся в разнозернистых песках. Отметка уровня воды в скв. 1 (верхней по потоку) 130,40 м, в скв. 2 — 122,60 м. Расстояние между скважинами 2000 м. Водоупорный слой горизонтальный, отметка его поверхности 112,60 м.

Коэффициент фильтрации водоносного пласта равен 16,2 м/сут (рис. 27, А). Определить единичный расход и расход грунтового потока шириной 500 м; построить кривую депрессии, вычислив мощности водоносного горизонта через каждые 200 м.

Решение. По разности отметок уровней воды в скважинах и водоупора находим мощности h_1 и h_2 : $h_1 = 130,40 - 112,60 = 17,80$ м; $h_2 = 122,60 - 112,60 = 10,00$ м.

Единичный расход определим по формуле (7.1):

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} = 16,2 \frac{17,80^2 - 10,00^2}{2 \cdot 2000} = 0,878 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Расход грунтового потока шириной 500 м равен: $Q = Bq = 500 \times 0,878 = 439 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Для построения депрессионной кривой находим значения h_x по формуле (7.3):

$$h_{200} = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L_{1-2}} \cdot x} = \sqrt{17,80^2 - \frac{17,80^2 - 10,00^2}{2000} \cdot 200} = \\ = 17,18 \text{ м.}$$

Подобным образом, вычисляем другие значения h_x , задаваясь соответствующими величинами x . По ним строится депрессионная кривая. Полученные расчетные данные приведены ниже (в м):

	скв. 1									
x	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	
h_x	17,80	17,18	16,54	15,87	15,17	14,44	13,67	12,85	11,97	
	скв. 2									
x	1800	2000								
h_x	11,03	10,0								

Движение грунтовых вод в однородном пласте при наклонном залегании водоупора (рис. 27, Б). Для данного случая единичный расход q , расход Q потока шириной B и высота напора в любом промежуточном сечении H_x для построения депрессионной кривой определяются по приближенным формулам Г. Н. Каменского:

$$q = k \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}, \quad (7.4)$$

$$Q = Bq = Bk \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}, \quad (7.5)$$

$$(h_1 + h_2) \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} = (h_1 + H_x - z_x) \frac{H_1 - H_x}{x}. \quad (7.6)$$

Буквенные обозначения в формулах см. на рис. 27, Б. В формулу (7.6) входят две неизвестные величины — z_x и H_x . Для построения депрессионной кривой вначале задаются значениями x . Затем для заданных значений x вычисляют z_x по формулам определения сечения трапеции:

а) при прямом уклоне водоупора ($i > 0$)

$$z_x = z_1 - \frac{z_1 - z_2}{L_{1-2}} \cdot x, \quad (7.7)$$

б) при обратном уклоне водоупора ($i < 0$)

$$z_x = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{L_{1-2}} \cdot x, \quad (7.8)$$

где z_1 и z_2 — превышение водоупора над плоскостью сравнения соответственно в первом и втором сечениях (z_1 и z_2 вычисляют как разность между напором и мощностью потока в соответствующих

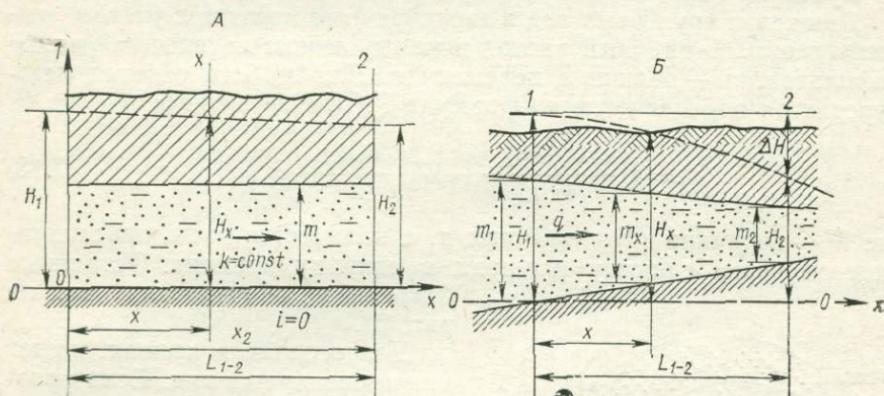


Рис. 28. Схема напорного потока: А — в пласте постоянной мощности, Б — в пласте переменной мощности:

m — мощность водоносного горизонта; m_1 , m_2 , m_x — мощности водоносного горизонта соответственно в верхнем, нижнем и промежуточном сечениях; другие буквенные обозначения такие же, как на рис. 27

сечениях). Вычислив z_x для заданных сечений, по формуле (7.6) определяют напоры H_x . Зная значения x и соответствующие им величины напоров H_x , строят кривые депрессии так же, как и для случая с горизонтальным водоупором.

Движение артезианских вод в однородных пластиах постоянной и переменной мощности. Единичный расход q и пьезометрической напор в любом промежуточном сечении H_x для потока артезианских вод постоянной мощности m определяются по формулам Г. Н. Каменского:

$$q = km \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}, \quad (7.9)$$

$$H_x = H_1 - \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \cdot x. \quad (7.10)$$

Буквенные обозначения формул см. на рис. 28, А.

Получив единичный расход по формуле (7.9), при необходимости вычисляют расход потока Q , задаваясь шириной потока B . Из

формулы (7.10) следует, что пьезометрический уровень в данном случае — прямая линия.

В условиях пласта переменной мощности напорного потока единичный расход q и ордината пьезометрической кривой H_x могут быть определены по приближенным формулам Г. Н. Каменского:

$$q = k \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}, \quad (7.11)$$

$$H_x = H_1 - \frac{m_1 + m_x}{m_1 + m_2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \cdot x. \quad (7.12)$$

Буквенные обозначения формул (7.11) и (7.12) см. на рис. 28, Б.

Движение грунтовых вод в междуречном массиве с учетом инфильтрации. Единичный расход в междуречном массиве с учетом инфильтрации — величина переменная. Для любого сечения междуречья он определяется по формуле Г. Н. Каменского:

$$q_x = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} - W \left(\frac{L_{1-2}}{2} - x \right), \quad (7.13)$$

где W — величина инфильтрации, т. е. количество воды, просачивающееся через единицу площади в единицу времени. Остальные буквенные обозначения см. на рис. 29.

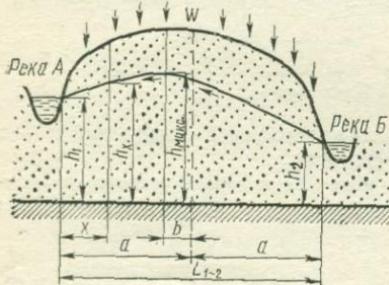


Рис. 29. Схема движения грунтовых вод в междуречном массиве при наличии инфильтрации:

h_1, h_2 — мощности водоносного горизонта соответственно у урезов рек A и B ; h_x — мощность водоносного горизонта в промежуточном сечении, отстоящем от уреза реки A на расстоянии x ; h_{\max} — максимальная мощность водоносного горизонта в междуречном массиве; b — величина смещения водораздела грунтовых вод, $Q = L_{1-2}/2$

Депрессионная кривая может иметь различный вид. Если уровни воды в реках, ограничивающих междуречье, одинаковы, то депрессионная кривая выпуклая (эллипс), наивысшая точка ее (точка водораздела грунтовых вод) находится посередине междуречья. В таком случае от водораздела поток направлен в разные стороны к рекам междуречья. Если уровни воды в реках разные, то водораздел грунтовых вод смещается в сторону реки с большей абсолютной отметкой уровня. Величина смещения водораздела грунтовых вод b определяется по формуле

$$b = \frac{k}{W} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}}. \quad (7.14)$$

Обозначения те же, что и в формуле (7.13).

При увеличении разности уровней воды в реках междуречья и уменьшении интенсивности инфильтрации смещение водораздела грунтовых вод в пределе станет равным половине расстояния меж-

ду урезами рек. В этом случае водораздел грунтовых вод отсутствует и поток будет направлен от одной реки к другой.

Для построения депрессионной кривой можно воспользоваться уравнением Г. Н. Каменского по определению ординаты кривой депрессии в любом сечении междуречья:

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L_{1-2}} x + \frac{W}{k} (L_{1-2} - x) x}. \quad (7.15)$$

Задаваясь значениями x , вычисляют соответствующие для них значения h_x . По полученным данным строят депрессионную кривую.

В уравнение (7.15) входят инфильтрация W и коэффициент фильтрации k . Величину инфильтрации трудно определить опытным путем. Трудно бывает также определить и усредненное значение коэффициента фильтрации для всего междуречного массива. Эти трудности можно избежать, если на междуречье пробурить 3 скважины. Имея данные по трем скважинам, отношение W/k определяют по формуле

$$\frac{W}{k} = \left[\frac{h_3^2 - h_1^2}{(L_{1-2} - x) x} + \frac{h_1^2 - h_2^2}{(L_{1-2} - x) L_{1-2}} \right], \quad (7.16)$$

где h_1, h_2, h_3 — мощности водоносного горизонта в крайних (h_1 и h_2) и промежуточной h_3 скважинах; x — расстояние между первой и промежуточной скважинами. Если коэффициент фильтрации известен, тогда определяется только размер инфильтрации:

$$W = k \left[\frac{h_3^2 - h_1^2}{(L_{1-2} - x) x} + \frac{h_1^2 - h_2^2}{(L_{1-2} - x) L_{1-2}} \right]. \quad (7.17)$$

Приведенные выше формулы даны для случаев с горизонтальным залеганием водоупора на междуречном массиве. Если водоупор наклонный, то для практических расчетов его принимают горизонтальным, расположенным на отметке, равной среднему сечению междуречья.

Задача 6. На междуречном массиве пройдены три скважины, две из них у урезов рек *А* и *Б*, третья — в 1 км от уреза реки *А* (рис. 29). Скважины вскрыли водоносные пески с коэффициентом фильтрации 12,3 м/сут. Мощность водоносных песков в скв. 1 — 11,82 м, в скв. 2 — 7,33 и в скв. 3 — 13,27 м. Водоупорное ложе горизонтальное. Ширина междуречья 5,2 км.

Требуется определить: 1) размер инфильтрации и смещения водораздела грунтовых вод; 2) максимальную мощность грунтовых вод и мощность потока в сечении, отстоящем в 3,7 км от уреза реки *А*.

Решение. При наличии трех скважин на междуречном массиве можно определить инфильтрацию по формуле (7.17):

$$W = k \left[\frac{h_3^2 - h_1^2}{(L_{1-2} - x) x} + \frac{h_1^2 - h_2^2}{(L_{1-2} - x) L_{1-2}} \right] = 12,3 \left[\frac{13,27^2 - 11,82^2}{(5200 - 1000) 1000} + \frac{11,82^2 - 7,33^2}{(5200 - 1000) 5200} \right] = 0,000155 \text{ м/сут.}$$

Величина смещения водораздела грунтовых вод вычисляется по формуле (7.14):

$$b = \frac{k}{W} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} = \frac{12,3}{0,000155} \cdot \frac{11,82^2 - 7,33^2}{2 \cdot 5200} = 656 \text{ м.}$$

Зная b , можно определить расстояние от сечения с максимальной мощностью до уреза реки A . Это расстояние равно:

$$\frac{L_{1-2}}{2} - b = a - b = 2600 - 656 = 1944 \text{ м.}$$

После этого определим максимальную мощность грунтовых вод в междуречье по формуле (7.15). Подставляя в формулу (7.15) цифровые данные ($x = 1944$ м), получим

$$h_{\max} = \sqrt{11,82^2 - \frac{11,82^2 - 7,33^2}{5200} \cdot 1944 + \frac{0,000155}{12,3} (5200 - 1944) 1944} = 13,69 \text{ м.}$$

Аналогичным образом определяют мощность потока в сечении, отстоящем от уреза реки A на 3,7 км:

$$h_x = \sqrt{11,82^2 - \frac{11,82^2 - 7,33^2}{5200} \cdot 3700 + \frac{0,000155}{12,3} (5200 - 3700) 3700} = 12,18 \text{ м.}$$

Движение подземных вод в пластах с постепенным изменением водопроницаемости в горизонтальном направлении. Расход напорного потока в пласте постоянной мощности при постепенном изменении водопроницаемости определяется по формуле

$$q = m \frac{\frac{k_2 - k_1}{\ln k_2 - \ln k_1}}{\cdot} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} . \quad (7.18)$$

Для грунтовых вод формула аналогична и имеет следующий вид:

$$q = \frac{\frac{k_2 - k_1}{\ln k_2 - \ln k_1}}{\cdot} \cdot \frac{\frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}}}{\cdot} . \quad (7.19)$$

Уравнения ординаты кривой пьезометрического уровня для артезианских вод и депрессионной кривой для грунтовых вод получают сопоставлением расходов на участках $1-2$ и $1-x$:

1) для артезианских вод:

$$H_x = H_1 - \frac{\frac{k_2 - k_1}{k_x - k_1}}{\cdot} \cdot \frac{\frac{\ln k_x - \ln k_1}{\ln k_2 - \ln k_1}}{\cdot} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \cdot x, \quad (7.20)$$

2) для грунтовых вод:

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{k_2 - k_1}{k_x - k_1} \cdot \frac{\ln k_x - \ln k_1}{\ln k_2 - \ln k_1} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{L_{1-2}}} x, \quad (7.21)$$

где k_x — промежуточное значение коэффициента фильтрации в сечении, расположенном на расстоянии x от сечения 1. Остальные буквенные обозначения см. на рис. 30. Величина k_x определяется по уравнению, которое выражает закономерность линейного изменения коэффициента фильтрации. Это уравнение записывается следующим образом:

$$k_x = k_1 + \frac{k_2 - k_1}{L_{1-2}} \cdot x. \quad (7.22)$$

Движение подземных вод в пластах с резкой сменой водопроницаемости в горизонтальном направлении. Резкая смена водопрони-

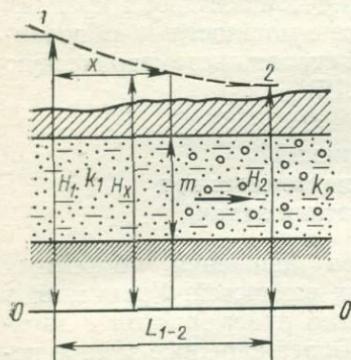


Рис. 30. Движение артезианских вод в пласте с постепенным изменением водопроницаемости в горизонтальном направлении:

K_1, K_2 — коэффициенты фильтрации водовмещающих пород соответственно в сечениях 1 и 2, отстоящих друг от друга на расстоянии L_{1-2} , m — мощность водоносного горизонта, H_1, H_2, H_x — высоты напоров соответственно в сечениях 1, 2 и промежуточном

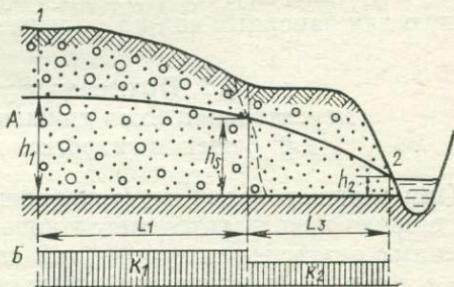


Рис. 31. Движение грунтовых вод при резкой смене водопроницаемости пород по направлению потока: А — разрез, Б — эпюра водопроницаемости:

h_1, h_2, h_3 — мощности водоносного горизонта соответственно в сечениях 1, 2 и промежуточном, L_1 — расстояние между первым и промежуточным сечениями, L_2 — расстояние между сечениями промежуточным и 2; k_1, k_2 — коэффициенты фильтрации водовмещающих пород соответственно верхнего и нижнего по потоку слоев

цаемости в горизонтальном направлении наблюдается в грунтовых водах при сочленении речных террас, на участках сбросов, оползневых склонах и др. Нередко изменение водопроницаемости наблюдается и в артезианских водах.

Единичный расход для грунтовых вод определяется уравнением

$$q = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right)}, \quad (7.23)$$

где все буквенные обозначения показаны на рис. 31. Для артезианских вод уравнение единичного расхода имеет аналогичный вид:

$$q = \frac{H_1 - H_2}{\frac{L_1}{T_1} + \frac{L_2}{T_2}}, \quad (7.24)$$

где H_1 и H_2 — напоры в крайних сечениях (в верхнем и нижнем по потоку); L_1 и L_2 — протяженность слоев различной водопроницаемости; T_1 и T_2 — коэффициенты водопроницаемости ($T = km$) первого и второго слоев.

Депрессионную кривую для грунтовых вод строят, определив мощность потока h_x по сечениям с помощью формулы (7.3); вначале находят h_x для первого участка потока с мощностями в крайних сечениях h_1 и h_s , затем для второго участка с мощностями на границах h_s и h_2 (рис. 31). Аналогичным путем строят пьезометрическую кривую для напорных вод по формуле (7.12).

§ 2. Применение уравнений неустановившегося движения подземных вод для решения гидрогеологических задач

При решении задач неустановившегося движения подземных вод широко используется метод конечных разностей. Уравнения в конечных разностях получены для плоского одномерного и двухмерного в плане потоков грунтовых вод. Более сложные задачи неустановившегося движения подземных вод решаются методами моделирования. Ниже даются уравнения в конечных разностях для плоского одномерного потока грунтовых вод и приводятся примеры определения водоотдачи и инфильтрации. Уравнение в конечных разностях для плоского одномерного потока имеет вид (рис. 32)

$$\mu \frac{H_{2,s+1} - H_{2,s}}{\Delta t} = \frac{1}{l_{1-2} + l_{2-3}} \left[k_{1-2} \left(h_{1,s} + h_{2,s} \right) \frac{H_{1,s} - H_{2,s}}{l_{1-2}} - k_{2-3} \left(h_{2,s} + h_{3,s} \right) \frac{H_{2,s} + H_{3,s}}{l_{2-3}} \right] + W, \quad (7.25)$$

где $H_{1,s}$, $H_{2,s}$, $H_{3,s}$ — напоры в начальный момент времени s соответственно в сечениях 1, 2 и 3; $H_{2,s+1}$ — напор в среднем сечении 2 в конечный момент времени $s+1$; $h_{1,s}$, $h_{2,s}$, $h_{3,s}$ — мощности водоносного пласта в начальный момент времени s соответственно в сечениях 1, 2 и 3; l_{1-2} и l_{2-3} — расстояния соответственно между сечениями 1 — 2 и 2 — 3; Δt — промежуток времени между начальным моментом времени s и конечным моментом времени $s+1$; W — ин-

фильтрация (положительная величина) или испарение (отрицательная величина); k_{1-2} и k_{2-3} — коэффициенты фильтрации водоемещающих пород соответственно между сечениями 1—2 и 2—3; μ — водоотдача (при понижении уровня) или недостаток насыщения (при повышении уровня) водовмещающих пород в зоне колебания уровня грунтовых вод.

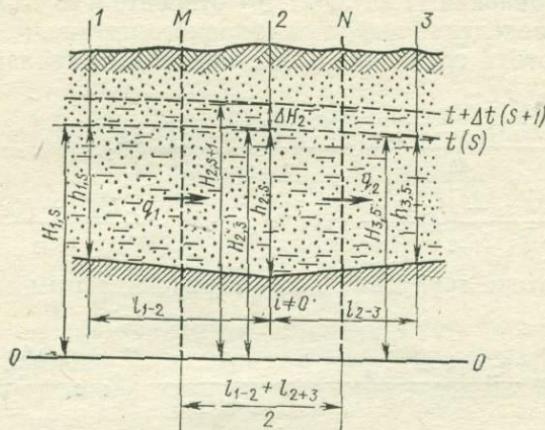


Рис. 32. Схема к уравнению неустановившейся фильтрации грунтовых вод в конечных разностях

При горизонтальном залегании водоупора уравнение примет вид

$$\mu \frac{h_{2,s+1} - h_{2,s}}{\Delta t} = \frac{1}{l_{1-2} + l_{2-3}} \left[k_{1-2} \frac{h_{1,s}^2 - h_{2,s}^2}{l_{1-2}} - k_{2-3} \frac{h_{2,s}^2 - h_{3,s}^2}{l_{2-3}} \right] + W. \quad (7.26)$$

С помощью уравнений (7.25) и (7.26) можно определить водоотдачу или недостаток насыщения μ . Для этого выбирают период наблюдений, когда инфильтрация атмосферных осадков отсутствует ($W=0$), и решают уравнения относительно μ . При наклонном залегании водоупора уравнение имеет вид

$$\mu = \frac{\Delta t}{(l_{1-2} + l_{2-3})(H_{2,s+1} - H_{2,s})} \left[k_{1-2}(h_{1,s} + h_{2,s}) \frac{H_{1,s} - H_{2,s}}{l_{1-2}} - k_{2-3}(h_{2,s} + h_{3,s}) \frac{H_{2,s} - H_{3,s}}{l_{2-3}} \right]. \quad (7.27)$$

Если водоупорное ложе горизонтальное, получаем аналогичное уравнение:

$$\mu = \frac{\Delta t}{(l_{1-2} + l_{2-3})(h_{2,s+1} - h_{2,s})} \left[k_{1-2} \frac{h_{1,s}^2 - h_{2,s}^2}{l_{1-2}} - k_{2-3} \frac{h_{2,s}^2 - h_{3,s}^2}{l_{2-3}} \right]; \quad (7.28)$$

Решая уравнения (7.25) и (7.26) относительно W , получим формулы для определения инфильтрационного питания:

а) для потока грунтовых вод с наклонным залеганием водоупора:

$$W = \mu \frac{H_{2,s+1} - H_{2,s}}{\Delta t} - \frac{1}{l_{1-2} + l_{2-3}} \left[k_{1-2}(h_{1,s} + h_{2,s}) \times \right. \\ \left. \times \frac{H_{1,s} - H_{2,s}}{l_{1-2}} - k_{2-3}(h_{2,s} + h_{3,s}) \frac{H_{2,s} - H_{3,s}}{l_{2-3}} \right]; \quad (7.29)$$

б) для потока грунтовых вод с горизонтальным залеганием водоупора:

$$W = \mu \frac{h_{2,s+1} - h_{2,s}}{\Delta t} - \frac{1}{l_{1-2} + l_{2-3}} \left[k_{1-2} \frac{h_{1,s}^2 - h_{2,s}^2}{l_{1-2}} - \right. \\ \left. - k_{2-3} \frac{h_{2,s}^2 - h_{3,s}^2}{l_{2-3}} \right]. \quad (7.30)$$

Задача 7. В котловине затухшей дефляции пройдены три скважины по потоку грунтовых вод. Грунтовые воды приурочены к мелкозернистым пескам хвалынского и хазарского ярусов с коэффициентом фильтрации 0,46 м/сут. Пески подстилаются горизонтальным слоем глин бакинского яруса. Расстояние между скважинами 1 и 2 — 184 м, между 2 и 3 — 110 м. По всем трем скважинам велись наблюдения за колебаниями уровня грунтовых вод. Результаты наблюдений за отдельные периоды (зимний, весенний и летне-осенний) приведены в табл. 11.

Таблица 11

Дата наблюдений	Промежуток времени, сут	Мощности водоносного пласта по скважинам		
		1	2	3
7/I		20,48	20,22	20,21
22/II	46	20,49	20,26	20,23
13/IV		20,52	20,32	20,30
1/V		20,69	20,44	20,40
19/VII	17			
16/IX	58	20,40	20,13	20,09
		20,37	20,12	20,07

Требуется определить: величину водоотдачи μ и питание грунтовых вод за счет инфильтрации W .

Решение. По результатам наблюдений за зимний период (с 7/I по 22/II) определим водоотдачу. Инфильтрация в этот период может быть принята равной нулю. Водоотдачу определим по формуле (7.28). Так как в данной задаче коэффициент фильтрации — величина постоянная ($k_{1-2} = k_{2-3} = k$), то после вынесения его за квадратные скобки уравнение (7.28) примет вид

$$\mu = \frac{k\Delta t}{(l_{1-2} + l_{2-3})(h_{2,s+1} - h_{2,s})} \cdot \left[\frac{h_{1,s}^2 - h_{2,s}^2}{l_{1-2}} - \frac{h_{2,s}^2 - h_{3,s}^2}{l_{2-3}} \right].$$

Подставляя в уравнение цифровые данные, получим

$$\mu = \frac{0,46 \cdot 46}{(184 + 110) \cdot (20,26 - 20,22)} \cdot \left[\frac{20,48^2 - 20,22^2}{184} - \frac{20,22^2 - 20,21^2}{110} \right] = 0,10.$$

Инфильтрацию W определим для весеннего и летне-осеннеого периодов по формуле (7.30). Вынесем (как и в предыдущем случае) за квадратные скобки коэффициент фильтрации. Тогда уравнение (7.30) примет вид

$$W = \mu \frac{h_{2,s+1} + h_{2,s}}{\Delta t} - \frac{k}{l_{1-2} + l_{2-3}} \cdot \left[\frac{h_{1,s}^2 - h_{2,s}^2}{l_{1-2}} - \frac{h_{2,s}^2 - h_{3,s}^2}{l_{2-3}} \right].$$

Подставив цифровые значения в уравнение, получим:

а) для весеннего периода

$$W = 0,10 \cdot \frac{20,44 - 20,32}{17} - \frac{0,46}{184 + 110} \cdot \left[\frac{20,52^2 - 20,32^2}{184} - \frac{20,32^2 - 20,30^2}{110} \right] = 0,00065 \text{ м/сут} = 0,65 \text{ мм/сут};$$

б) для летне-осеннеого периода

$$W = 0,10 \cdot \frac{20,12 - 20,13}{58} - \frac{0,46}{184 + 110} \cdot \left[\frac{20,40^2 - 20,13^2}{184} - \frac{20,13^2 - 20,09^2}{110} \right] = -0,00009 \text{ м/сут} = -0,09 \text{ мм/сут}.$$

Из полученных значений W следует, что в весенний период грунтовые воды питаются за счет инфильтрации, а в летне-осенний период происходит испарение с поверхности грунтовых вод.

**ГЛАВА 8. ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
В РАЙОНАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
И ВОДОХРАНИЛИЩ**

§ 1. Прогноз подпора грунтовых вод

Подпор грунтовых вод представляет собой повышение их уровня под влиянием различных факторов, главным образом искусственных.

Развитие подпора характеризуется непрерывным повышением уровня грунтовых вод на территории, примыкающей к водохранилищу. Если скорость повышения уровня воды уменьшается во вре-

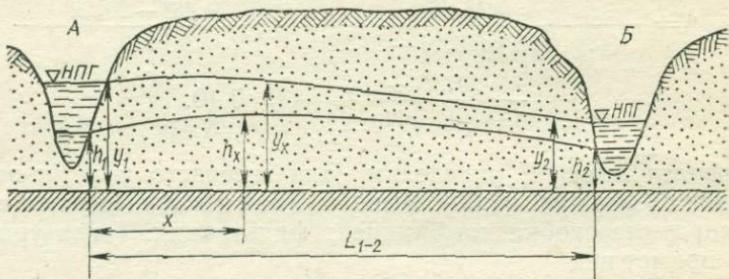


Рис. 33. Схема подпора грунтовых вод в междуречном массиве:
 h_1 , h_2 , h_x — мощности водоносного горизонта до подпора, y_1 , y_2 , y_x — мощности водоносного горизонта после подпора

мени, такой подпор называется *неустановившимся*. Его пределом служит так называемое стационарное положение депрессионной кривой, которое наблюдается при прекращении практически подъема уровня. Такой подпор называется *стационарным* или *установившимся*.

Расчеты подпора грунтовых вод проводят по поперечникам, ориентированным перпендикулярно к берегу водохранилища, от сечения к сечению, т. е. каждое предыдущее сечение служит исходным для последующего. Ниже приведены наиболее простые случаи расчета подпора грунтовых вод.

Стационарный подпор грунтовых вод в однородном пласте при горизонтальном залегании водоупора. Рассмотрим междуречный массив (рис. 33), где подпор происходит в реках А и Б. Мощность водоносного горизонта в любом промежуточном сечении x после подпора с учетом инфильтрации определяется по формуле

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L_{1-2} - x}{L_{1-2}} + (y_2^2 - h_2^2) \frac{x}{L_{1-2}}} \quad (8.1)$$

Все буквенные обозначения формулы (8.1) см. на рис. 33. При наличии подпора только в одной реке, например реке А, формула упрощается:

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L_{1-2} - x}{L_{1-2}}}. \quad (8.2)$$

Если область питания водоносного горизонта очень велика по сравнению с зоной подпора, то, по предложению Н. Н. Биндермана, можно допустить, что при $L_{1-2} > 10 x$ величина $\frac{L_{1-2} - x}{L_{1-2}}$ примерно равна единице. Тогда формула (8.2) примет вид

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + y_1^2 - h_1^2}. \quad (8.3)$$

Задача 8. На междуречье скважины 3 и 4 вскрыли грунтовые воды. Мощность водоносной толщи в скважине 3 — 26,53 м, в скважине 4 — 24,32 м. У урезов рек *А* и *Б* мощность грунтовых вод соответственно равна 25,75 и 20,60 м. Водоупорное ложе горизонтальное (рис. 34). От уреза реки *А* скважина 3 находится в 500 м, скважина 4 — в 1500 м. Расстояние между урезами рек *А* и *Б* равно 3000 м. В связи со строительством плотины на реке *А* уровень в ней поднимется на 5,00 м.

Определить, на сколько поднимется уровень грунтовых вод в скважинах 3 и 4 после строительства плотины.

Решение. Определим мощности водоносного горизонта после подпора в скважинах 3 и 4 (y_3 и y_4). По условиям задачи подпор будет только в одной реке, поэтому воспользуемся формулой (8.2):

$$\begin{aligned} y_3 &= \sqrt{h_3^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L_{1-2} - x_3}{L_{1-2}}} = \\ &= \sqrt{26,53^2 + (30,75^2 - 25,75^2) \cdot \frac{3000 - 500}{3000}} = 30,65 \text{ м;} \\ y_4 &= \sqrt{h_4^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L_{1-2} - x_4}{L_{1-2}}} = \\ &= \sqrt{24,32^2 + (30,75^2 - 25,75^2) \cdot \frac{3000 - 1500}{3000}} = 27,07 \text{ м.} \end{aligned}$$

Зная мощности водоносного горизонта в скважинах после подпора, легко вычислить подпор в этих скважинах (z_3 и z_4). Он равен разности мощностей водоносного горизонта после и до подпора в соответствующих скважинах:

$$z_3 = y_3 - h_3 = 30,63 - 26,53 = 4,10 \text{ м;}$$

$$z_4 = y_4 - h_4 = 27,07 - 24,32 = 2,75 \text{ м.}$$

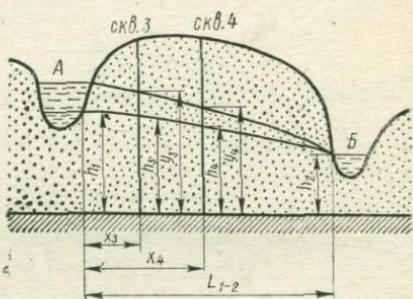


Рис. 34. Расчетная схема к задаче 8

Стационарный подпор грунтовых вод в однородном пласте при наклонном залегании водоупора. По Г. Н. Каменскому, подпор z_2 в сечении, расположенном на расстоянии L_{1-2} от реки, определяется по формуле

$$(h_1 + h_2)(H_1 - H_2) = [(h_1 + z_1) + (h_2 + z_2)][(H_1 + z_1) - (H_2 + z_2)]. \quad (8.4)$$

Все буквенные обозначения формулы (8.4) см. на рис. 35.

Задача 9. По створу, расположенному перпендикулярно к реке, пройдены скважины 2 и 3 на расстоянии соответственно 60 и 100 м от уреза реки (рис. 36). Скважины вскрыли водоносный горизонт с наклонным залеганием водоупора. Уровень воды в сква-

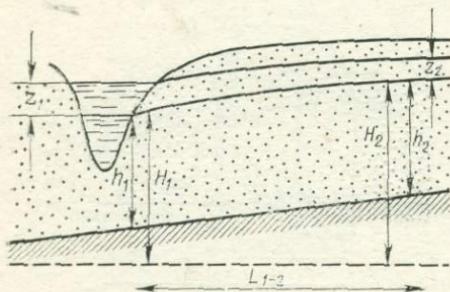


Рис. 35. Схема подпора грунтовых вод в однородном пласте при наклонном залегании водоупора:

h_1, h_2 — мощности водоносного горизонта соответственно у уреза реки и в сечении, отстоящем от уреза реки на расстоянии L_{1-2} ;
 H_1, H_2 — высоты напоров у уреза реки и в выбранном сечении, z_1, z_2 — величины подпора в реке и в выбранном сечении

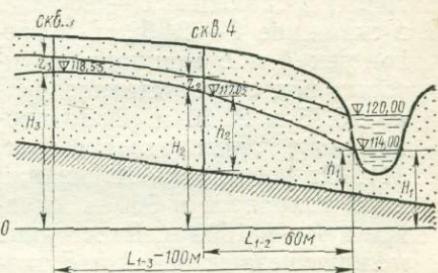


Рис. 36. Схема к расчету подпора грунтовых вод при наклонном залегании водоупора (к задаче 9)

жине 2 установился на отметке 117,05 м, в скважине 3 — на отметке 118,55 м. Мощности водоносного горизонта в них соответственно равны 14,25 и 13,55 м. У уреза реки мощность водоносного горизонта 8,50 м. Уровень воды в реке до подпора имел отметку 114,00 м, после подпора — 120,00 м.

Определить подпор и отметки уровня после подпора в скважинах 2 и 3.

Решение. Возьмем за первое сечение урез реки, за второе — скважину 2 и подставим в формулу (8.4) цифровые значения:

$$(8,50 + 14,25) \cdot (114,0 - 117,05) = [(8,50 + 6,00) + (14,25 + z_2)] \times \\ \times [(114,0 + 6,00) - (117,05 + z_2)].$$

Получаем квадратное уравнение: $z_2^2 + 25,80 z_2 - 154,20 = 0$. Решив его, устанавливаем подпор в скважине 2: $z_2 = 5,01$ м. Отметка уровня воды в скважине 2 равна: $H_2 + z_2 = 117,05 + 5,01 = 122,06$ м. Для определения подпора в скважине 3 за первое се-

чение принимается скважина 2, за второе — скважина 3. Тогда формула (8.4) примет вид

$$(h_2 + z_3)(H_2 - H_3) = [(h_2 + z_2) + (h_3 + z_3)] [(H_2 + z_2) - (H_3 + z_3)].$$

Подставляя цифровые значения в формулу, находим

$$(14,25 + 13,55) \cdot (117,06 - 118,55) = [(14,25 + 5,01) + (13,55 + z_3)] \times \\ \times [(117,05 + 5,01) - (118,55 + z_3)].$$

Получаем квадратное уравнение $z_3^2 + 29,30 z_3 - 156,86 = 0$. Решив его, находим, что $z_3 = 4,62$ м. Отметка уровня воды в скважине 3 после подпора $H_3 + z_3 = 118,55 + 4,62 = 123,17$ м.

§ 2. Фильтрационные расходы воды под плотиной и в обход ее плечевых примыканий, потери воды на фильтрацию из водохранилищ и каналов

Вода из водохранилищ фильтруется в нижний бьеф единым потоком. Однако для упрощения расчетов поток делят на две части: под основанием плотины и в обход ее плечевых примыканий. Ниже рассмотрены аналитические решения по определению фильтрационных расходов для наиболее простых случаев. В сложных гидрогеологических условиях фильтрационные задачи решаются с помощью электрического или гидравлического моделирования.

Фильтрация под плотиной при однородном строении основания. Фильтрационный расход под основанием плотины с плоским флютбетом в однородном пласте и при горизонтальном водоупоре определяется по формуле Н. Н. Павловского:

$$q = kHq_r, \quad (8.5)$$

где q — фильтрационный расход, приходящийся на единицу длины плотины; k — коэффициент фильтрации водоносных пород под плотиной; H — действующий напор (рис. 37), разность между напора-

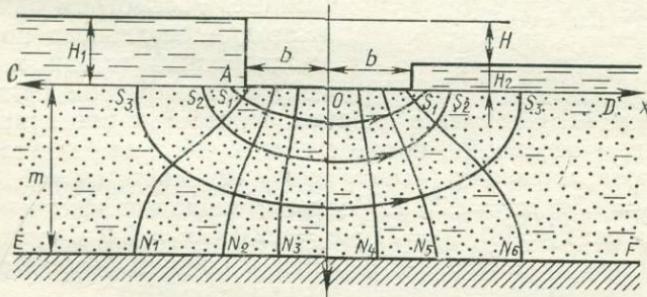


Рис. 37. Схема к расчету фильтрации под плотиной с плоским флютбетом при однородном строении основания:

S_1, S_2, S_3 — линии тока; N_1, N_2, \dots, N_6 — линии равных напоров; b — половина ширины флютбета; m — мощность фильтрующей толщи

ми в верхнем и нижнем бьефах — $H = H_1 - H_2$; q_r — приведенный фильтрационный расход, т. е. расход при $k=1$ и $H=1$ определяется по графику рис. 38.

Зная длину плотины B , легко определить общий расход под плотиной по формуле

$$Q = B \cdot q_r. \quad (8.6)$$

Задача 10. В основании плотины с плоским флютбетом шириной 36 м и длиной 150 м залегают мелководнистые пески с коэффициентом фильтрации 3,4 м/сут. Мощность песков 9,45 м. Подстилаются пески слоем горизонтально залегающих глин. Напоры в верхнем и нижнем бьефах соответственно равны 13,0 и 3,0 м.

Требуется определить единичный расход и общий расход потока под плотиной.

Решение. Единичный расход под плотиной определяем по формуле (8.5): $q = kHq_r$.

Действующий напор — разность напоров в верхнем и нижнем бьефах, т. е. $H = H_1 - H_2 = 13,0 - 3,0 = 10,0$ м. При $\frac{b}{m} = \frac{18}{9,45} = 1,9$ приведенный расход q_r , определенный по графику рис. 38, равен

0,22. Подставляя полученные цифровые значения в формулу (8.5), найдем единичный расход: $q = 3,4 \cdot 10,0 \cdot 0,22 = 7,48 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Общий расход под плотиной может быть определен по формуле (8.6): $Q = Bq = 150 \cdot 7,48 = 1122 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Фильтрация под плотиной при многослойном основании. Для такого случая нет точных аналитических решений. Существующие способы расчета весьма приближенные. Рассмотрим один из них (метод виртуального приведения неоднородной толщи к однородной) на конкретном примере.

Задача 11. Плотина с плоским флютбетом проектируется на многослойном основании, которое состоит из четырех водопроницаемых слоев, имеющих (сверху вниз) мощность $m_1 = 2,15$; $m_2 = 1,25$; $m_3 = 4,30$; $m_4 = 1,75$ м. Соответственно коэффициенты фильтрации равны: $k_1 = 1,0$; $k_2 = 1,5$; $k_3 = 12,0$ и $k_4 = 8,0$ м/сут. Размеры плотины и высота напоров в верхнем и нижнем бьефах такие же, как и в задаче 10.

Определить единичный расход под основанием плотины.

Решение. Четырехслойная толща приводится к схеме двухслойного строения. Для этого в качестве основных выбираются первый и третий слой (с минимальным и максимальным коэффициентами фильтрации). Двухслойная толща будет характеризоваться коэф-

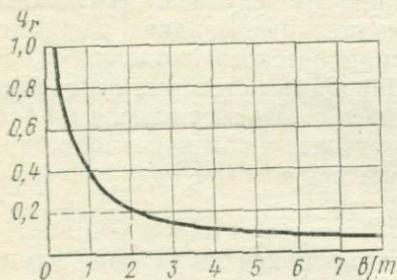


Рис. 38. График для определения приведенного фильтрационного расхода

фициентами фильтрации верхнего слоя $k_1 = k_2 = 1,0$ м/сут и нижнего слоя $k_{II} = k_3 = 12,0$ м/сут. Мощности верхнего и нижнего слоев будут соответственно равны:

$$m_1 = m_2 + \frac{k_2}{k_1} \quad m_2 = 2,15 + \frac{1,5}{1,0} \cdot 1,25 = 4,02 \text{ м};$$

$$m_{II} = m_3 + \frac{k_4}{k_3} \quad m_4 = 4,30 + \frac{8,0}{12,0} \cdot 1,75 = 5,47 \text{ м.}$$

При двухслойном строении основания единичный расход под плотиной определяется по формуле Г. Н. Каменского:

$$q = \frac{H}{\frac{2b}{k_{II}m_{II}} + 2\sqrt{\frac{m_1}{k_1k_{II}m_{II}}}}, \quad (8.7)$$

где H — высота напора, м; b — половина ширины флютбета, м; k_1 , k_{II} , m_1 , m_{II} — коэффициенты фильтрации (м/сут) и мощности верхнего I и нижнего II слоев, м. Подставив в формулу цифровые значения, получим

$$q = \frac{10}{\frac{36}{12 \cdot 5,47} + 2\sqrt{\frac{4,02}{1,0 \cdot 12,0 \cdot 5,47}}} = 9,52 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Аналогичным способом многослойное основание под плотиной можно привести к условно однородной толще по коэффициенту фильтрации одного из слоев [46].

Фильтрация в обход плечевых примыканий плотины. Для простых гидрогеологических условий обходную фильтрацию можно рассчитать по формуле Н. Н. Веригина, преобразованной Н. Н. Биндеманом:

$$Q = 0,366 k H (h_1 + H_1) \lg \frac{B_1}{r_0}, \quad (8.8)$$

где Q — фильтрационный расход на обходную фильтрацию; k — коэффициент фильтрации; B_1 — ширина зоны обходной фильтрации (рис. 39); r_0 — радиус полуокружности, длина которой равна периметру обтекаемого контура берегового примыкания плотины ($r_0 = \frac{l}{\pi}$), где l — периметр плечевого примыкания плотины).

Остальные буквенные обозначения см. на рис. 39.

Задача 12. Плотина одним плечом примыкает к берегу, сложенному плотными глинами, другим — к берегу, сложенному крупнозернистыми песками с коэффициентом фильтрации 35 м/сут. Пески на расстоянии 250 м от уреза водохранилища сменяются плотными глинами. Расстояние от уровня воды в верхнем бьефе до водоупора 15 м, а от уровня в нижнем бьефе до водоупора 8 м (рис. 39). Периметр плечевого примыкания плотины 34,5 м.

Требуется определить расход на обходную фильтрацию.

Решение. Исходя из гидрогеологических условий, устанавливаем, что обходная фильтрация будет иметь место только по одному из берегов. Ее расход определяем по формуле (8.8). Однако сначала необходимо вычислить все величины, входящие в формулу (8.8).

Высота напора на плотину $H = H_1 - h_1 = 15 - 8 = 7$ м (рис. 39). Ширина зоны обходной фильтрации B_1 обусловлена распространением крупнозернистых песков, т. е. $B_1 = 250$ м. Радиус $r_0 = \frac{l}{\pi} = \frac{34,5}{3,14} = 11,0$ м. Подставив в формулу (8.8) числовые значения, получим

$$Q = 0,366 \cdot 35 \cdot 7 (8 + 15) \lg \frac{250}{11} = 2797 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Фильтрация воды из водохранилищ. По предложению Н. Н. Биндемана, необходимо различать понятия «фильтрационный расход» и «фильтрационные потери».

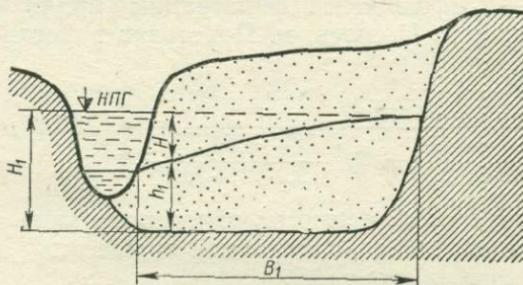


Рис. 39. Схема к расчету фильтрации в обход плеч плотины:

H_1 — превышение горизонта водохранилища над водоупором; h_1 — превышение горизонта воды в нижнем бьефе над водоупором, H — напор на плотине

Фильтрационным расходом из водохранилища называется объем воды, фильтрующейся из водохранилища в единицу времени. *Фильтрационными потерями* следует называть разность между размером грунтового питания реки до и после устройства водохранилища. Фильтрационный расход и фильтрационные потери могут быть временными (в период насыщения берегов и дна водохранилища) и постоянными (при стабилизации депрессионной кривой).

При гидрогеологических расчетах должен учитываться не фильтрационный расход, а фильтрационные потери, так как только они представляют интерес для водохозяйственных расчетов водохранилища. В большинстве случаев временные фильтрационные потери несущественные в общем водном балансе водохранилища, поэтому определяют только постоянные фильтрационные потери, которые могут быть определены по формуле

$$q_p = q_1 - q_2 = \frac{k}{2L_{1-2}} (y_1^2 - h_1^2), \quad (8.9)$$

где q_n — фильтрационные потери из водохранилища на единицу длины берега; q_1 — расход грунтового потока до подпора на единицу длины берега; q_2 — то же, но при подпоре; k — коэффициент фильтрации; h_1 — мощность водоносного пласта у уреза реки до подпора; y_1 — мощность водоносного пласта у уреза водохранилища после подпора; L_{1-2} — расстояние между урезами рек между речьем. Величины q_1 и q_2 положительные, если грунтовый поток направлен к реке (водохранилищу), и отрицательные, если поток направлен в противоположную сторону. Формула (8.9) справедлива для всех типичных схем при горизонтальном залегании водоупора.

Задача 13 (по П. П. Климентову и В. М. Кононову, 1973). Определить величину постоянных фильтрационных потерь из водохранилища, проектируемого на реке А при подъеме в нем уровня до отметки 95,0 м, а также отметку горизонта, при которой фильтрация воды из водохранилища прекратится, и размер отвечающих этому положению фильтрационных потерь. Коэффициент фильтрации в пределах междуречья равен 50 м/сут. Горизонтальный водоупор залегает на нулевой отметке. Остальные данные см. на рис. 40.

Решение. Имея данные о положении уровня в трех сечениях, определяем вначале размер инфильтрационного питания по формуле (7.17):

$$W = k \left[\frac{h_3^2 + h_1^2}{(L_{1-2} - x)x} + \frac{h_1^2 - h_2^2}{(L_{1-2} - x)L_{1-2}} \right] = \\ = 50 \cdot \left[\frac{79,01^2 - 75,27^2}{(33\,000 - 5000)5000} + \frac{75,27^2 - 73,00^2}{(33\,000 - 5000)33\,000} \right] = 0,00022 \text{ м/сут.}$$

Затем вычисляем фильтрационные потери при подъеме уровня до отметки 95,0 по формуле (8.9):

$$q_n = k \cdot \frac{y_1^2 - h_1^2}{2L_{1-2}} = 50 \cdot \frac{95^2 - 75,27^2}{2 \cdot 33\,000} = 2,54 \text{ м}^3/\text{сут}$$

на 1 м длины берега водохранилища.

Напишем формулу расхода через сечение у уреза реки А после подпора q_A . Ее можно получить из формулы (7.13), приравняв зна-

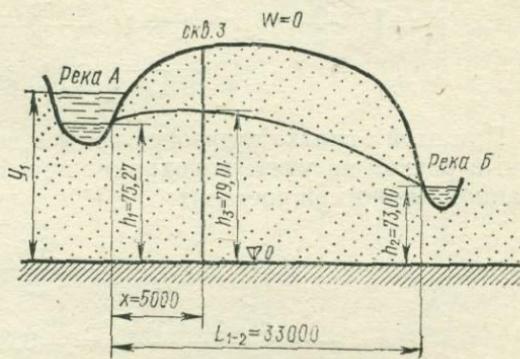


Рис. 40. Схема к расчету фильтрационных потерь из водохранилища (к задаче 13)

чение x нулю и заменив h_1 на y_1 . Тогда формула (7.13) примет вид

$$q_A = k \frac{y_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} - \frac{WL_{1-2}}{2}.$$

Горизонт, при котором на урезе водохранилища фильтрационный расход будет равен нулю, можно найти, приравняв расход в сечении у уреза водохранилища нулю и решив его относительно y_1 :

$$y_1 = \sqrt{\frac{W}{k} L_{1-2}^2 + h_2^2} = \sqrt{\frac{0,000\ 22}{50} \cdot 33\ 000^2 + 73,0^2} = \\ = \sqrt{10\ 120,6} = 100,60 \text{ м.}$$

При этой отметке горизонта воды в водохранилище фильтрационный расход на урезе водохранилища будет равен нулю, а фильтрационные потери составят:

$$q_n = q_1 - q_2 = q_1 - 0 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} - \frac{WL}{2} = 50 \cdot \frac{75,27^2 - 73,00^2}{2 \cdot 33\ 000} - \\ - \frac{0,000\ 22 \cdot 33\ 000}{2} = -3,38 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Таким образом, фильтрационные потери — отрицательная величина, т. е. водохранилище не теряет, а получает то количество воды, которое река получала до подпора за счет грунтового питания.

Фильтрация воды из каналов. При анализе фильтрации воды из каналов выделяют стадию свободной фильтрации, когда вследствие просачивания воды из канала происходит промачивание пород зоны аэрации, и стадию подпертой фильтрации, когда движение воды из канала происходит в условиях взаимодействия с естественным грунтовым потоком, который как бы подпирает фильтрующийся поток и уменьшает его расход и распространение.

Рассмотрим свободную фильтрацию при установившемся режиме и отсутствии грунтовых вод и дренажных понижений. Канал проложен в мощной однородной толще (рис. 41). Фильтрационный расход из канала на 1 м его длины может быть определен по формуле В. В. Ведерникова:

$$q = k(B_0 + Ah_0), \quad (8.10)$$

где k — коэффициент фильтрации; B_0 — ширина канала трапецидального сечения по урезу воды; h_0 — глубина воды в канале; A — коэффициент, определяемый по графику (рис. 42).

Задача 14 (по А. И. Силину-Бекчурину, 1965). Определить фильтрационный расход из канала на 1 м его длины по данным: ширина канала по урезу воды $B_0 = 12$ м, глубина воды в канале $h_0 = 2$ м; коэффициент заложения откосов $m = \operatorname{ctg} \varphi = 1,5$; коэффициент фильтрации породы $k = 0,5 \text{ м}/\text{сут.}$

Решение. Находим отношение $\frac{B_0}{h_0} = \frac{12}{2} = 6$. По графику на рис. 42 определим величину $A = 2,5$ м. Зная отношение $\frac{B_0}{h_0}$ и A , по формуле (8.10) вычислим фильтрационный расход:

$$q = k(B_0 + Ah_0) = 0,5(12 + 2,5 \cdot 2) = 8,5 \text{ м/сут.}$$

Фильтрация воды из каналов в случае подпретой фильтрации в зависимости от конкретных гидрогеологических условий рассчитывается с помощью тех же формул, которые применяются для водохранилищ.

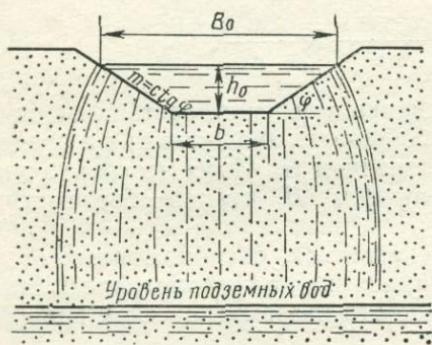


Рис. 41. Схема фильтрации из канала при глубоком залегании уровня грунтовых вод

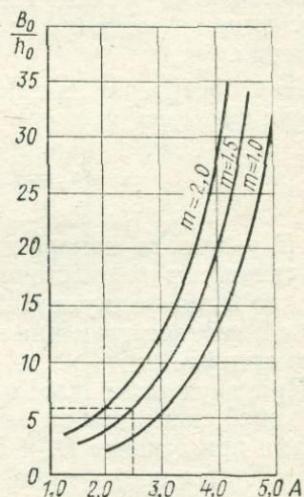


Рис. 42. График для определения значения коэффициента A : $[A=f(B_0/H_0, m)]$

ГЛАВА 9. ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ВОДОЗАБОРНЫМ И ДРЕНАЖНЫМ СООРУЖЕНИЯМ

Водозаборы — инженерные сооружения по захвату подземных вод для водоснабжения, орошения и других целей. Осушение той или иной территории осуществляется искусственным понижением уровня грунтовых вод при помощи дренажных сооружений.

Водозaborные и дренажные сооружения подразделяются на вертикальные (скважины, шахтные колодцы, шурфы), горизонтальные (каптажные галереи, кяризы, горизонтальные скважины, дренажные канавы) и комбинированные (сочетание вертикальных сооружений с горизонтальными). Примером последних может быть лучевой водозабор — сочетание шахтного колодца с горизонтальными скважинами. В гидрогеологической практике наибольшее распространение получили скважины, колодцы и горизонтальные дрены открытого и закрытого типов.

§ 1. Расчеты одиночных водозаборов

Установившееся движение подземных вод к совершенным грунтовым и артезианским скважинам. Артезианская скважина (рис. 43). Приток воды к совершенной артезианской скважине (дебит Q) определяем по формуле Ж. Дюпюи:

$$Q = \frac{2\pi k m (H_e - h_c)}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{2,73 km S_c}{\lg \frac{R}{r_c}}, \quad (9.1)$$

где m — мощность водоносного горизонта; H_e — напор в скважине до откачки; h_c — столб воды в скважине во время откачки; R — радиус влияния откачки; r_c — радиус скважины; S_c — величина понижения.

Для построения пьезометрической кривой может быть использована формула

$$H_r = H_e - \frac{0,366}{km} \lg \frac{R}{r}, \quad (9.2)$$

где H_r — высота напора при откачке в сечении, отстоящем от центра скважины на расстоянии r . Задаваясь значениями r в пределах от r_c до R , по формуле (9.2) определяем H_r . Имея несколько значений r и соответствующие им величины H_r , строим пьезометрическую кривую.

При двух наблюдательных скважинах, расположенных от действующей скважины на расстоянии r_1 и r_2 , с пьезометрическими напорами при откачке H_1 и H_2 ордината пьезометрической кривой H_r определяется по формуле

$$H_r = \frac{H_2 - H_1}{\lg \frac{r_2}{r_1}} \lg \frac{r}{r_1} + H_1. \quad (9.3)$$

Формула (9.3) обеспечивает более надежное построение пьезометрической кривой, чем (9.2), так как исключает использование в расчетах радиуса влияния R , определение которого весьма приближенное.

Грунтовая скважина. Формула дебита совершенной грунтовой скважины, как и артезианской, дана Ж. Дюпюи и имеет вид

$$Q = \frac{\pi k (H_e^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R}{r_c}} = 1,366 k \frac{(2H_e - S_c) S_c}{\lg \frac{R}{r_c}}. \quad (9.4)$$

Буквенные обозначения формулы (9.4) см. на рис. 44. Этую формулу можно использовать и для построения депрессионной кривой. Задаваясь вместо r_c и h_c различными значениями расстояния r (расстояния от центра скважины до сечения, где определяется

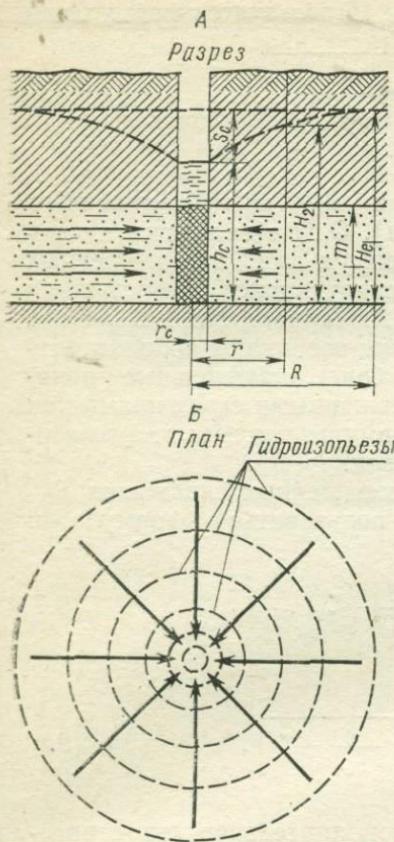


Рис. 43. Схема движения воды к артезианской скважине: А — разрез, Б — план

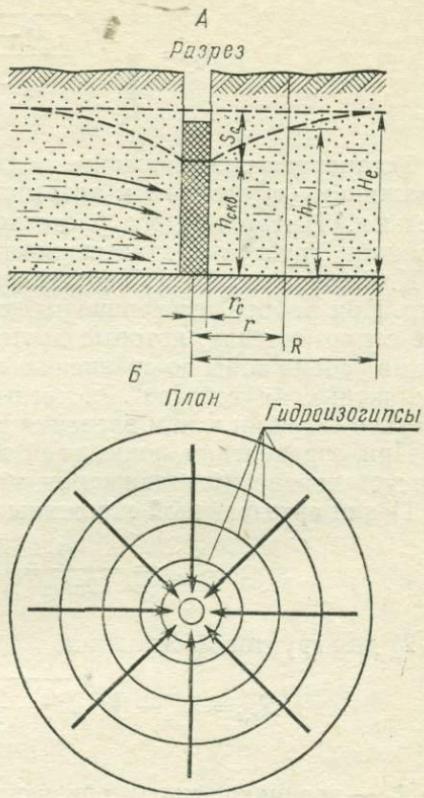


Рис. 44. Схема движения воды к грунтовой скважине: А — разрез, Б — план:

$h_{скв}$ — столб воды в скважине во время откачки; S_c — понижение уровня в скважине, H_e — мощность водоносного горизонта до откачки, h_r — мощность водопониженного горизонта во время откачки в сечении, отстоящем от центра скважины на расстоянии r ; r_c — радиус скважины, R — радиус влияния откачки

мощность водоносного горизонта при откачке h_r), решаем уравнение (9.4) относительно h_r и получаем

$$h_r = \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}} = \sqrt{H_e^2 - \frac{0,732 Q}{k} \lg \frac{R}{r}}. \quad (9.5)$$

Более точно депрессионную кривую можно построить при двух наблюдательных скважинах, расположенных в пределах депрессионной воронки на расстояниях r_1 и r_2 от действующей и имеющих

соответственно мощности потока h_1 и h_2 . Используется формула

$$h_r = \sqrt{\frac{h_2^2 - h_1^2}{\lg \frac{r_2}{r_1}}} \lg \frac{r}{r_1} + h_1^2. \quad (9.6)$$

Установившееся движение подземных вод к несовершенным скважинам (грунтовым и артезианским). Определение понижения. Имеется много расчетных формул для несовершенных скважин (грунтовых и артезианских), базирующихся на решениях Н. К. Гиринского, В. Д. Бабушкина, И. А. Чарного, Н. Н. Веригина и др. При работе несовершенных скважин возникают дополнительные сопротивления, которые вызывают более значительные понижения уровня воды по сравнению с совершенными скважинами при одинаковых их дебитах. Расчетные формулы учитывают несовершенство скважин путем введения поправок.

При определении понижений в несовершенных скважинах $S_{n.c}$ при установившемся движении можно пользоваться формулами:

1) для артезианской скважины

$$S_{n.c} = \frac{Q}{2\pi k m} \left(\ln \frac{R}{r_c} + \zeta_1 \right), \quad (9.7)$$

2) для грунтовой скважины

$$S_{n.c} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{r_c} + \zeta_1 \right)}, \quad (9.8)$$

где ζ_1 — величина, характеризующая дополнительное сопротивление, которая определяется в зависимости от параметров l_0/m и $\frac{m}{r_c}$ по графикам (рис. 45 и 46). Другие буквенные обозначения см. на рисунках. На рис. 45 представлены графики определения ζ_1 для условий, когда водоприемная часть (фильтр) находится в верхней части водоносного пласта, а на рис. 46 — для условий расположения фильтра в средней части пласта.

Задача 15 (по П. П. Климентову и В. М. Кононову, 1973). Дебит несовершенной грунтовой скважины диаметром 305 мм, заложенной в водоносных песках с коэффициентом фильтрации 10 м/сут, $Q = 397,9 \text{ м}^3/\text{сут}$. В верхней части водоносного пласта мощностью 14 м установлен фильтр длиной 8 м. Радиус влияния 300 м. Определить понижение уровня.

Решение. Вначале определим понижение уровня без учета несовершенства скважины. Воспользуемся формулой (9.8) без ζ_1 :

$$\begin{aligned} S_c &= H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r_c}} = 14 - \sqrt{14^2 - \frac{397,9}{3,14 \cdot 10} \cdot \ln \frac{300}{0,152}} = \\ &= 4,0 \text{ м.} \end{aligned}$$

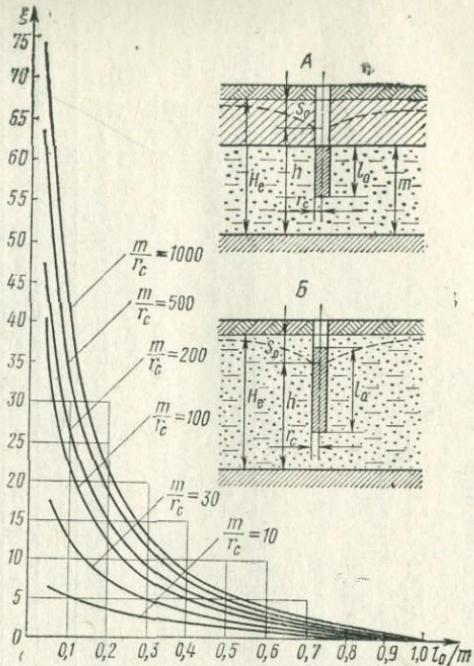


Рис. 45. Графики дополнительного сопротивления ξ при несовершенстве скважин (фильтр примыкает к водоупору): А — артезианская скважина, Б — грунтовая скважина:

m — мощность водоносного горизонта;
 r_c — радиус скважины; l_0 — рабочая часть фильтра

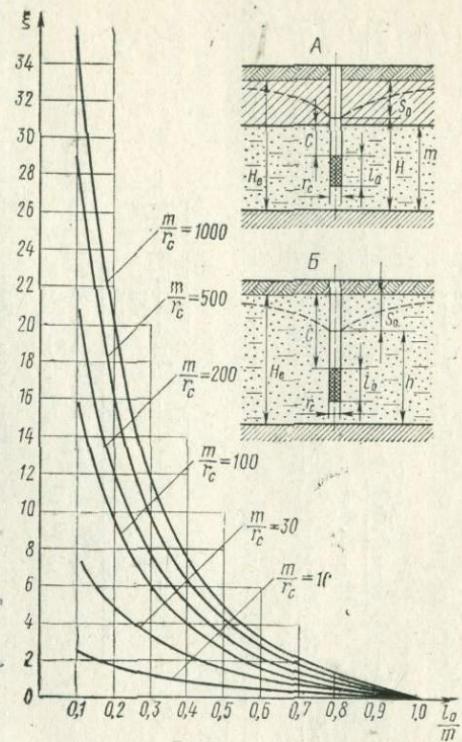


Рис. 46. Графики дополнительного сопротивления ξ при несовершенстве скважин (фильтр в средней части пласта): А — артезианская скважина, Б — грунтовая скважина

При работе скважины осушается верхняя часть водоносного горизонта. В результате уменьшаются длина рабочей части фильтра и мощность водоносного горизонта. Приняв за средние значения длины фильтра $l_0 = \frac{S_c}{2}$ и мощности водоносного горизонта $H_e = \frac{S_c}{2}$, по графику на рис. 45 найдем ζ_1 при

$$\frac{l_0}{m} = \frac{l_0 - 0,5 S_c}{H_e - 0,5 S_c} = \frac{8 - 0,5 \cdot 4}{14 - 0,5 \cdot 4} = 0,50 \quad \text{и} \quad \frac{m}{r_c} = \frac{H_e - 0,5 S_c}{r_c} =$$

$$= \frac{14 - 0,5 \cdot 4}{0,152} = 79. \text{ Примем } \frac{m}{r_c} \approx 100, \text{ получим } \zeta_1 = 3,0.$$

Определив ζ_1 , вычислим понижение уровня несовершенной скважины по формуле (9.8):

$$S_{h.c} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{r_c} + \zeta_1 \right)} =$$

$$= 14 - \sqrt{14^2 - \frac{397,9}{3,14 \cdot 10} \left(\ln \frac{300}{0,152} + 3,0 \right)} = 6,13 \text{ м.}$$

Из приведенных расчетов следует, что несовершенство скважины приводит к увеличению понижения уровня на 2,13 м.

Расчеты дебита скважин. Дебиты несовершенных скважин, по Н. Н. Веригину, можно рассчитать путем введения поправки в формулы для совершенных скважин. С поправкой расчетные формулы принимают вид:

1) для артезианской скважины

$$Q = 2,73 k \frac{m S_c}{\lg \frac{R}{r_c} + 0,217 \zeta_c}; \quad (9.9)$$

2) для грунтовой скважины

$$Q = 1,366 k \frac{(2H_e - S_c) S_c}{\lg \frac{R}{r_c} + 0,217 \zeta_c}. \quad (9.10)$$

Поправка на несовершенство скважин ζ_c дана в табл. 12.

Таблица 12. Определение поправки на несовершенство скважин ζ_c

l_0/m	m/r_c									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Поправка ζ_c зависит от отношений $\frac{l_0}{m}$ и $\frac{m}{r_c}$ (l_0 — длина рабочей части фильтра; m — мощность водоносного горизонта; r_c — радиус скважины). Например $\frac{l_0}{m} = 0,7$; $\frac{m}{r_c} = 200$. Поправку ζ_c находим на пересечении соответствующих вертикальной и горизонтальной граф $\zeta_c = 3,24$.

Задача 16. Несовершенная скважина диаметром 305 мм вскрыла напорные воды. Мощность водоносного горизонта 15,3 м, высота напора над кровлей 8,8 м, коэффициент фильтрации водоемещающих песков 11,5 м/сут. Фильтр длиной 4,5 м примыкает к кровле водоносного горизонта. Радиус влияния достигает 300 м.

Определить дебит скважины при понижении уровня на 6 м.

Решение. Определим дебит скважины по формуле Н. Н. Веригина (9.9):

$$Q = 2,73 k \frac{m S_c}{\lg \frac{R}{r_c} + 0,217 \zeta_c}.$$

Для определения поправки на несовершенство скважины ζ_c найдем отношения $\frac{l_0}{m}$ и $\frac{m}{r_c}$. $\frac{l_0}{m} = \frac{4,5}{15,3} = 0,3$; $\frac{m}{r_c} = \frac{15,3}{0,152} = 101$.

По табл. 12 определяем $\zeta_c = 14,5$.

Подставив цифровые значения в формулу (9.9), найдем

$$S = 2,73 \cdot 11,5 \cdot \frac{15,3 \cdot 6}{\lg \frac{300}{0,152} + 0,217 \cdot 14,5} = 447 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Неустановившееся движение подземных вод к совершенным и несовершенным скважинам (грунтовым и артезианским) в неограниченном пласте. Совершенные скважины. При неустановившемся движении подземных вод в зоне влияния действующих скважин (грунтовых и артезианских) происходит непрерывное изменение во времени уровней, скоростей движения и расходов подземных вод. Обычно при расчетах принимают расход скважин постоянным во времени, а напор переменным по площади и во времени: $H = f(r, t)$.

Для получения расчетных формул при неограниченном пласте используют решения, применяемые в теории теплопроводности для характеристики температурного режима при мгновенном действии линейного теплового источника постоянной интенсивности. После соответствующих преобразований формулы приобретают вид:

1) для артезианской скважины

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left[-E_i \left(-\frac{r^2}{4\pi t} \right) \right], \quad (9.11)$$

2) для грунтовой скважины

$$S = H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} \left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \right]}, \quad (9.12)$$

где $-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$ и $-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$ — интегральные показательные функции (r — расстояние от рассматриваемой точки до центра возмущающей скважины; κ — коэффициент пьезопроводности; a — коэффициент уровнепроводности; t — время от начала работы скважины).

Приведенные формулы — основные в теории неустановившейся фильтрации. Они позволяют определять понижение S в любой точке области фильтрации.

При гидрогеологических расчетах обычно интегральные показательные функции с известной степенью точности заменяют логарифмическими функциями. Тогда формулы принимают вид:

1) для артезианской совершенной скважины

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25 \kappa t}{r^2} = \frac{0,183 Q}{km} \lg \frac{2,25 \kappa t}{r^2}; \quad (9.13)$$

2) для грунтовой совершенной скважины

$$\begin{aligned} S &= H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{2,25 \kappa t}{r^2}} = \\ &= H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{0,336 Q}{k} \lg \frac{2,25 \kappa t}{r^2}}. \end{aligned} \quad (9.14)$$

Погрешность определения понижения уровня по приближенным формулам (9.13) и (9.14) при $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ не более 5,7%, а при $\frac{r^2}{4at} < 0,01$ не превышает 0,25%.

Приближенные формулы широко используются в гидрогеологической практике, особенно при определении гидрогеологических параметров и оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

Несовершенные скважины. Несовершенство грунтовых и артезианских скважин при неустановившемся движении учитывается также введением поправок в решения для совершенных скважин. Для скважин, работающих в неограниченном пласте, формулы имеют вид:

1) для артезианской несовершенной скважины

$$S_{n.c} = \frac{Q}{4\pi km} \left[\ln \frac{2,25 \kappa t}{r_c^2} + \zeta_1 \right], \quad (9.15)$$

2) для грунтовой несовершенной скважины

$$S_{n.c} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} \left[\ln \frac{2,25 \kappa t}{r_c^2} + 2\zeta_1 \right]}. \quad (9.16)$$

Поправка на несовершенство скважин ζ_1 в зависимости от положения фильтра и параметров l_0/m , m/r_c определяется по тем же графикам, которые используются при установившейся фильтрации (см. рис. 45 и 46).

§ 2. Обоснование расчетных схем и расчеты взаимодействующих водозаборов и дренажных сооружений

Гидрогеологические расчеты выполняются на основе расчетной схемы, учитывающей конкретные природные условия и особенности работы проектируемых сооружений. При схематизации природных условий и обосновании расчетных схем следует иметь в виду, что в области фильтрации подземных вод распределение основных гидродинамических элементов потока определяется начальными и граничными условиями на ее границах. Поэтому точность гидрогеологических расчетов зависит от того, насколько обоснованно будут схематизированы и учтены в расчетной схеме краевые условия и характерные признаки области фильтрации. Ниже рассмотрены некоторые методы расчета взаимодействующих водозаборных и дренажных сооружений применительно к оценке эксплуатационных запасов подземных вод и проектированию дренажных сооружений.

Расчеты ограниченного количества взаимодействующих скважин. При ограниченном количестве взаимодействующих скважин в условиях как установившегося, так и неустановившегося движения общее понижение уровня в той или иной точке области фильтрации определяется на основе учета понижений уровня от действия каждой отдельной скважины. Обычно расчетная величина понижения $S_{\text{расч}}$ определяется непосредственно в одной из скважин пласта, находящейся в наиболее неблагоприятных условиях, т. е. в скважине, где расчетное понижение наибольшее из взаимодействующих скважин. Расчетные формулы имеют вид:

1) для артезианской скважины

$$S_{\text{расч}} = \frac{Q_c}{4\pi k m} (f_c + 2\zeta) + \sum_{i=1}^n \nabla \frac{Q_i}{4\pi k m} f_i, \quad (9.17)$$

2) для грунтовой скважины

$$S_{\text{расч}} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \left[\frac{Q_c}{2\pi k} (f_c + 2\zeta) + \sum_{i=1}^n \nabla \frac{Q_i}{2\pi k} f_i \right]}, \quad (9.18)$$

где Q_c и f_c — дебит и гидравлическое сопротивление скважины, в которой определяется понижение; ζ — дополнительное сопротивление для несовершенной скважины (если скважина совершенная, $\zeta = 0$); $\sum_{i=1}^n \nabla$ — сумма срезок всех остальных скважин (значок ∇ оз-

начает, что из суммы исключается скважина, в которой определяется расчетное понижение).

Структура формул (9.17) и (9.18) остается неизменной. Она не зависит от расчетной схемы, но в качестве f_i используются гидравлические сопротивления. Так, для условий неограниченного пласта формулы имеют вид:

1) для артезианской скважины

$$S_{\text{расч}} = \frac{Q_c}{4\pi k m} \left(\ln \frac{2,25 \kappa t}{r_c^2} + 2\zeta \right) + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi k m} \ln \frac{2,25 \kappa t}{r_{c-i}^2}, \quad (9.19)$$

2) для грунтовой скважины

$$S_{\text{расч}} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \left[\frac{Q_c}{2\pi k} \left(\ln \frac{2,25 a t}{r_c^2} + 2\zeta \right) + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_{c-i}^2} \right]}, \quad (9.20)$$

где κ и a — коэффициенты пьезопроводности и уровнепроводности; t — период эксплуатации скважин; r_c — радиус скважины, в которой определяется понижение; r_{c-i} — расстояние между скважиной, где определяется понижение, и одной из взаимодействующих с ней скважин, дебит которой Q_i .

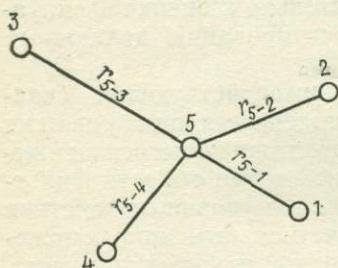


Рис. 47. Схема расчета взаимодействующих скважин (к задаче 17)

ходных данных: мощность горизонта $H_e = 30$ м; коэффициент фильтрации водовмещающих пород $k = 15$ м/сут; дебиты скважин при эксплуатации $Q_1 = 1000$, $Q_2 = Q_3 = Q_4 = 800$ и $Q_5 = 500$ м³/сут; расстояния от скважины 5 до взаимодействующих с нею скважин $r_{5-1} = 100$; $r_{5-2} = 100$; $r_{5-3} = 300$ и $r_{5-4} = 150$ м. Водоотдача пород $\mu = 0,15$.

Решение. Расчетное понижение для скважины 5 определим по формуле (9.20). Для пяти взаимодействующих скважин она имеет вид

$$S_{\text{расч.5}} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \left(\frac{Q_5}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_c^2} + \frac{Q_1}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_{5-1}^2} + \frac{Q_2}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_{5-2}^2} + \frac{Q_3}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_{5-3}^2} + \frac{Q_4}{2\pi k} \ln \frac{2,25 a t}{r_{5-4}^2} \right)}.$$

Коэффициент уровнепроводности определим, пользуясь формулой (при $h_{cp} = H_e$)

$$a = \frac{kh_{cp}}{\mu} = \frac{15 \cdot 30}{0,15} = 3000 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Подставляя в уравнение исходные данные, получим искомую величину $S_{\text{расч.5}}$:

$$\begin{aligned} S_{\text{расч.5}} = 30 - & \sqrt{30^2 - \left(\frac{500}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^7}{0,22} + \frac{1000}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^7}{1002} + \right. \right.} \\ & \left. \left. + \frac{800}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^7}{1002} + \frac{800}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^7}{3002} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{800}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^7}{1502} \right) = 7,8 \text{ м.} \right. \end{aligned}$$

Расчет взаимодействующих скважин по методу обобщенных систем. Для расчета взаимодействующих скважин широко используется метод обобщенных систем. По этому методу большое количество скважин заменяется одним укрупненным сооружением (линейный и кольцевой ряды — галереями, площадное расположение — большим колодцем), влияние которого учитывается обобщенно как на участке, где расположены сооружения, так и в пределах всей области фильтрации.

Понижение уровня подземных вод, вызываемое действием обобщенных систем, меньше понижения уровня в самих скважинах, поскольку при этом не учитываются зоны деформации потока вблизи реальных скважин. Поэтому полное расчетное понижение уровня в одной из рассматриваемых скважин зависит от действия обобщенной системы, которая характеризуется внешним фильтрационным сопротивлением $f_{\text{вн}}$ и действия самой скважины, которое может быть определено дополнительным (внутренним) фильтрационным сопротивлением Δf .

Понижение в одной из взаимодействующих скважин в общем виде может быть записано так:

$$S = S_{\text{вн}} + \Delta S_{\text{скв}}, \quad (9.21)$$

где $S_{\text{вн}}$ — понижение уровня, вызванное действием обобщенной системы; $\Delta S_{\text{скв}}$ — дополнительное понижение уровня воды в скважине, обусловленное внутренним сопротивлением Δf .

Методом обобщенных систем даны решения для линейного ряда скважин, кольцевой батареи и площадной системы [3, 14, 16, 17, 30]. Расчетные формулы для определения понижения уровня в системе взаимодействующих скважин методом обобщенных систем имеют вид:

1) для артезианских скважин

$$S = \frac{Q_s}{4\pi k m} f_{\text{вн}} + \frac{Q_c}{2\pi k m} \left(\ln \frac{r_n}{r_c} + \zeta \right), \quad (9.22)$$

2) для грунтовых вод

$$S = H_e - \sqrt{H_e^2 - \left[\frac{Q_e}{2\pi k} f_{vn} + \frac{Q_c}{\pi k} \left(\ln \frac{r_n}{r_c} + \zeta \right) \right]}, \quad (9.23)$$

где Q_e — суммарный дебит взаимодействующих скважин; Q_c и r_c — дебит и радиус скважины, для которой ведется расчет понижения; ζ — дополнительное сопротивление, учитывающее несовершенство скважины, в которой определяется понижение (если скважина совершенная, $\zeta=0$); f_{vn} — безразмерное гидравлическое сопротивление для обобщенной системы скважин (определяется по графикам и формулам, см. ниже); r_n — приведенный радиус некоторой условно выделяемой внутренней области влияния скважины (области влияния локальных фильтрационных сопротивлений).

Значение r_n для линейной и кольцевой систем скважин при одинаковых расстояниях между скважинами 2σ равно $r_n = \frac{\sigma}{\pi}$, а при разных ($2\sigma_1$ и $2\sigma_2$, см. рис. 48, А) — $r_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\pi}$. При площадном расположении скважин (рис. 48, Б) $r_n = 0,27\sqrt{F_0}$.

Безразмерное гидравлическое сопротивление f_{vn} в линейном ряду представляет собой гидравлическое сопротивление линейной галереи f_l , в кольцевой системе — гидравлическое сопротивление кольцевой галереи f_k и в площадной системе — гидравлическое сопротивление большого колодца f_{pl} . Эти величины обычно определяются по графикам, которые приведены в работе П. П. Климентова и В. М. Кононова [30] на рис. 138, 139 и 140 (с. 322, 324 и 326). Гидравлические сопротивления вычисляются и по формулам. Так, для линейного ряда грунтовых скважин формулы гидравлического сопротивления имеют вид:

1) для центральной скважины ряда

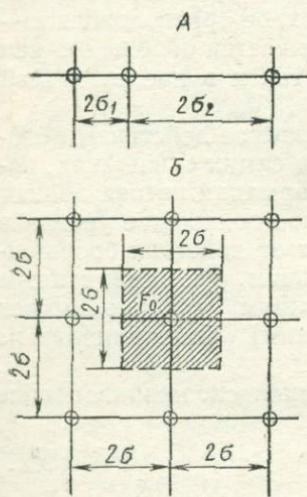
$$f_a = \ln \frac{16,4at}{l^2}, \quad (9.24)$$

2) для крайних скважин ряда

$$f_a = \ln \frac{4,1at}{l^2}, \quad (9.25)$$

где a — коэффициент уровнепроводности; t — период эксплуатации скважин; l — половина общей длины ряда скважин.

Для артезианских скважин используются те же формулы с заменой в них коэффициента уровнепроводности a на коэффициент пьезопроводности χ .



Задача 18 (по П. П. Климентову и В. М. Кононову, 1973). В неограниченном потоке грунтовых вод запроектировано строительство линейного водозабора, состоящего из 11 разнодебитных совершенных скважин с суммарным дебитом $6655 \text{ м}^3/\text{сут}$. Требуется определить понижение уровня в центральной и крайней скважинах водозабора через 25 лет его эксплуатации, если через 10 лет после ввода его в работу будет действовать другой водозабор, отстоящий от первого на расстоянии $r = 2500 \text{ м}$, с суммарным дебитом $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Мощность водоносного горизонта до начала эксплуатации $H_e = 30 \text{ м}$, коэффициент фильтрации $k = 15 \text{ м}/\text{сут}$, водоотдача водоносных пород $\mu = 0,25$. Расположение скважин линейного ряда равномерное (расстояние между скважинами $2\sigma = 80 \text{ м}$). Радиус скважин $r_c = 0,2 \text{ м}$.

Решение. Пользуясь методом обобщенных систем, рассмотрим линейный водозабор как линейную галерею, а другой водозабор, оказывающий влияние на первый, — как большой колодец. Понижение уровня в скважинах от действия самого линейного водозабора вычисляем по формуле (9.23):

$$S = H_e - \sqrt{H_e^2 - \left[\frac{Q_s}{2\pi k} f_{\pi} + \frac{Q_c}{\pi k} \left(\ln \frac{r_{\pi}}{r_c} + \zeta \right) \right]}.$$

Определим неизвестные величины, входящие в приведенную формулу, f_{π} , r_{π} , ζ .

Гидравлическое сопротивление линейной галереи f_{π} , заменившей линейный ряд, вычислим для центральной и крайней скважин ряда по формулам (9.24) и (9.25), в которые входят a и l . Коэффициент уровнепроводности a вычислим по формуле

$$a = \frac{k h_{cp}}{\mu} = \frac{k H_e}{\mu} = \frac{15 \cdot 30}{0,25} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Общая длина равна $2l = (n-1)2\sigma = 10 \cdot 80 = 800 \text{ м}$, $l = \frac{800}{2} = 400 \text{ м}$ (n — количество скважин водозабора). Зная a и l , определим гидравлическое сопротивление f_{π} :

1) для центральной скважины

$$f_{\pi} = \ln \frac{16,4 at}{l^2} = \ln \frac{16,4 \cdot 1800 \cdot 9125}{400^2} = 7,40;$$

2) для крайней скважины

$$f_{\pi} = \ln \frac{4,1 at}{l^2} = \ln \frac{4,1 \cdot 1800 \cdot 9125}{400^2} = 6,04.$$

Приведенный радиус r_{π} при одинаковых расстояниях между скважинами равен:

$$r_{\pi} = \frac{\sigma}{\pi} = \frac{40}{3,14} = 12,74 \text{ м}.$$

Дополнительное сопротивление ζ в данном случае равно нулю, поскольку скважины линейного ряда совершенные. Подставляя

исходные данные в формулу (9.23), получим понижение уровня для центральной скважины:

$$S = 30 - \sqrt{30^2 - \left[\frac{6655}{6,28 \cdot 15} \cdot 7,4 + \frac{605}{3,14 \cdot 15} \left(\ln \frac{12,74}{0,2} + 0 \right) \right]} = 12,00 \text{ м.}$$

Аналогичный расчет для крайней скважины дает $S = 9,51 \text{ м.}$

Срезку уровня от действия другого водозабора S_{B3} определим по формуле для одиночной скважины (9.14), так как он (расположен на расстоянии $r = 2500 \text{ м}$) рассматривается как большой колодец, дебит которого $Q_{\Sigma B} = 5000 \text{ м}^3/\text{сут}$, а время действия 15 лет, т. е. 5475 сут.

$$S_{B3} = H_e - \sqrt{H_e^2 - \frac{Q_{\Sigma B}}{2\pi k} \ln \frac{2,25 at}{r^2}} =$$

$$= 30 - \sqrt{30^2 - \frac{500}{6,28 \cdot 15} \ln \frac{2,25 \cdot 1800 \cdot 5475}{2500^2}} = 1,15 \text{ м.}$$

С учетом срезки уровня от действия другого водозабора понижение в центральной скважине ряда равно $S_{\text{расч}} = 12,00 + 1,15 = 13,15 \text{ м.}$, а в крайней скважине $S_{\text{расч}} = 9,51 + 1,15 = 10,66 \text{ м.}$

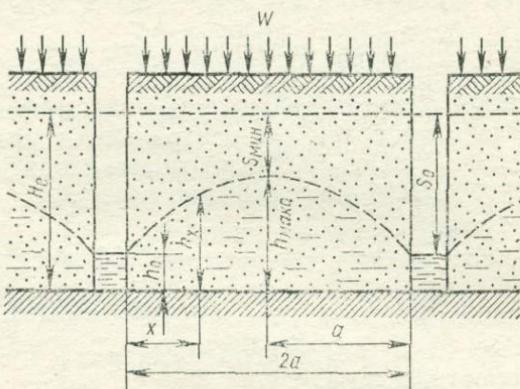


Рис. 49. Схема к расчету систематического горизонтального дренажа совершенного типа:

W — величина инфильтрации атмосферных осадков, H_e — мощность водоносного горизонта в естественных условиях, S_0 — понижение уровня грунтовых вод в дрене, $S_{\text{мин}}$ — минимальное положение уровня грунтовых вод между дренами, h_0 — столб воды в дрене, $h_{\text{макс}}$ — максимальная мощность потока между дренами, h_x — мощность потока в сечении, отстоящем от ближайшей дрены на расстоянии x , a — половина расстояния между дренами

Расчеты систематических горизонтальных дренажей. Систематический, или площадной, горизонтальный дренаж представляет собой расположенные по системе (параллельно) горизонтальные дrenы, которые сооружаются в пределах осушаемой площади. Гид-

рогеологические расчеты систематического дренажа сводятся к определению расстояний между дренами, их дебита, а при необходимости и понижений уровня подземных вод.

Систематический горизонтальный дренаж совершенного типа. Для определения расстояния между дренами используется формула Ротэ:

$$2a = \sqrt{\frac{k}{W} (h_{\max}^2 - h_0^2)} \quad (9.26)$$

Буквенные обозначения формулы (9.26) см. на рис. 49. При определении расстояния между дренами по указанной формуле задаются необходимым понижением S_{\min} . Зная понижение, получим максимальную мощность потока между дренами ($h_{\max} = H_e - S_{\min}$). Расход каждой дрены систематического дренажа определяется по формуле

$$Q = 2aWL, \quad (9.27)$$

где W — величина инфильтрации; L — длина дрены.

Мощность водоносного горизонта в любом сечении в период работы дрен может быть выражена уравнением

$$h_x = \sqrt{h_0^2 + \frac{W}{k} (2a - x)x}. \quad (9.28)$$

Систематический горизонтальный дренаж несовершенного типа. Этот вид дренажа применяют при значительной мощности водонос-

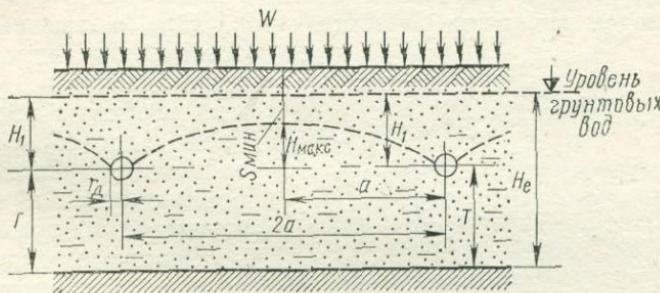


Рис. 50. Схема к расчету систематического горизонтального дренажа несовершенного типа:

H_1 — глубина заложения дрены под естественный уровень грунтовых вод, T — расстояние от центра дрены до водоупора, r_d — радиус дрены, другие обозначения см. на рис. 49

ного горизонта. Расстояние между дренами (рис. 50) определяется по формуле С. Ф. Аверьянова:

$$2a = T \left[\sqrt{\frac{8kh_{\max}}{WT} \left(1 + \frac{h_{\max}}{2T} \right)} + B_1^2 + B_1 \right], \quad (9.29)$$

где B_1 — поправочный коэффициент, равный $B_1 = -2,94 \lg \left(\sin \frac{\pi r_d}{r} \right)$ (r_d — радиус дрены). Дебит каждой дрены определяется по формуле (9.27).

Задача 19. На участке сельскохозяйственных угодий проектируется дренаж совершенного типа. Глубина залегания уровня грунтовых вод на участке 0,5 м, мощность грунтовых вод $H_e = 3,5$ м. Коэффициент водовмещающих песков $k = 11,3$ м/сут. Водоносные пески подстилаются горизонтально залегающим слоем глин. Мощность слоя воды в дренах $h_0 = 0,2$ м. Длина каждой дрены 300 м. Величина инфильтрационного питания $W = 0,002$ м/сут.

Определить расстояние между дренами при минимальном понижении уровня на 2,0 м и расход каждой дрены.

Решение. Максимальная мощность h_{\max} при работе дрен равна $h_{\max} = H_e - S = 3,5 - 2,0 = 1,5$ (рис. 50). Расстояние между дренами вычисляем по формуле (9.26):

$$2a = \sqrt{\frac{k_1}{W} (h_{\max}^2 - h_0^2)} = \sqrt{\frac{11,3}{0,002} (1,5^2 - 0,2^2)} = 111,7 \text{ м} \approx 110 \text{ м.}$$

Расход каждой дрены определяем по формуле (9.27):

$$Q = 2aWL = 110 \cdot 0,002 \cdot 300 = 66 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

§ 3. Определение гидрогеологических параметров

Определение гидрогеологических параметров — одна из важнейших задач динамики подземных вод. Эти параметры служат основой для гидрогеологических расчетов, выполняемых в связи с проектированием водозаборов, систем орошения, дренажных, гидротехнических и других инженерных сооружений.

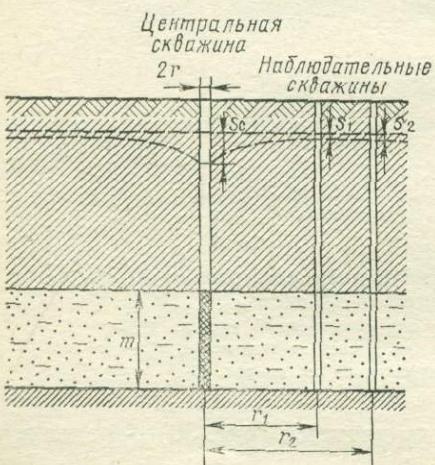


Рис. 51. Схема к определению гидрогеологических параметров при откачке из артезианской скважины

Основные гидрогеологические параметры водоносного пласта — коэффициенты фильтрации k , водопроницаемости T , пьезопроводности α или уровнепроводности a , а также внутреннее фильтрационное сопротивление скважины ζ_c , приведенный радиус влияния R_p и др. Они могут быть получены в результате проведения полевых опытных работ (откачек, наливов, на-

гнетаний). Наибольшее распространение в гидрогеологической практике получили откачки и наблюдения за восстановлением уровня в скважинах. Для вычисления параметров используются основные уравнения движения подземных вод. Располагая опытными данными, эти уравнения решают относительно входящих в них гидрогеологических параметров.

Определение гидрогеологических параметров по данным откачек из скважин при установившемся движении. При установившемся режиме фильтрации определяют коэффициенты фильтрации и водопроводимости, внутреннее фильтрационное сопротивление и приведенный радиус влияния (считая, что $R = R_{\text{п}}$). Располагая данными о дебите и понижении в процессе откачки, можно определить коэффициент фильтрации по формулам Дюпон (9.1) и (9.4), решая их относительно k .

1. Артезианские воды (рис. 51):

1) для центральной скважины

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{R_{\text{п}}}{r_c}}{m S_c} ; \quad (9.30)$$

2) для центральной и наблюдательной скважин

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_1}{r_c}}{m (S_c - S_1)} ; \quad (9.31)$$

3) для двух наблюдательных скважин

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1}}{m (S_1 - S_2)} . \quad (9.32)$$

II. Грунтовые воды (рис. 52):

1) для центральной скважины

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{R_{\text{п}}}{r_c}}{(2H_e - S_c) S_c} , \quad (9.33)$$

2) для центральной и наблюдательной скважин

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{r_1}{r_c}}{(2H_e - S_c - S_1) (S_c - S_1)} , \quad (9.34)$$

3) для двух наблюдательных скважин

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1}}{(2H_e - S_1 - S_2) (S_1 - S_2)} , \quad (9.35)$$

где S_c, S_1, S_2 — понижения уровня соответственно в центральной, первой и второй наблюдательных скважинах; r_c — радиус цент-

ральной скважины; r_1 , r_2 — расстояния от центральной скважины соответственно до первой и второй наблюдательных скважин.

Если откачки проводятся из несовершенных скважин, то в приведенные формулы вводится поправка на несовершенство скважин, полученная Н. Н. Веригиным.

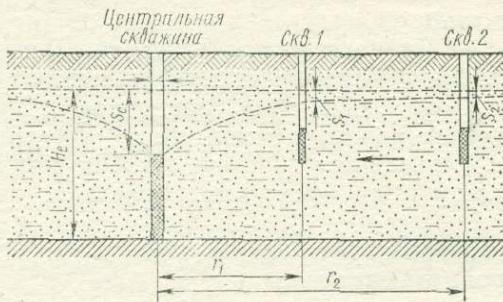


Рис. 52. Схема к определению гидрогеологических параметров при откачке из грунтовой скважины

I. Артезианские воды:

1) для центральной скважины

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{R_n}{r_c} + 0,217 \zeta_c}{m S_c}; \quad (9.36)$$

2) для центральной и наблюдательной скважин

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_1}{r_c} + 0,217 (\zeta_c - \zeta_1)}{m (S_c - S_1)}; \quad (9.37)$$

3) для двух наблюдательных скважин

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_1 - \zeta_2)}{m (S_1 - S_2)}. \quad (9.38)$$

II. Грунтовые воды:

1) для центральной скважины

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{R_n}{r_c} + 0,217 \zeta_c}{(2H_e - S_c) S_c}; \quad (9.39)$$

2) для центральной и наблюдательной скважин

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{r_1}{r_c} + 0,217 (\zeta_c - \zeta_1)}{(2H_e - S_c - S_1) (S_c - S_1)}; \quad (9.40)$$

3) для двух наблюдательных скважин

$$k = 0,732 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\zeta_c - \zeta_1)}{(2H_e - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}, \quad (9.41)$$

где ζ_c , ζ_1 , ζ_2 — внутренние фильтрационные сопротивления, учитывающие несовершенство соответственно центральной, первой и второй наблюдательных скважин. Они определяются по табл. 12. При нахождении сопротивлений для грунтовых скважин мощность следует уменьшать на половину величины понижения уровня в центральной скважине, т. е. принимать $\frac{m}{r} = \frac{H_e - 0,5 S_c}{r}$. Сопротивление находят также по графикам (см. рис. 45, 46). При двух наблюдательных скважинах для артезианских вод показатель общего сопротивления центральной скважины ζ_c может быть рассчитан по формуле

$$\zeta_c = \frac{S_c - S_1}{S_1 - S_2} \ln \frac{r_2}{r_1} - \ln \frac{r_1}{r_c}. \quad (9.42)$$

Определив коэффициент фильтрации по формулам (9.30—9.41) и умножив его на мощность водоносного горизонта, получим коэффициент водопроводимости T . Для напорных вод T можно получить также из уравнения (9.1), решив его относительно km :

$$T = km = 0,366 Q \frac{\lg \frac{R_n}{r_c}}{S_c}. \quad (9.43)$$

При двух наблюдательных скважинах эта формула примет вид

$$T = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1}}{S_1 - S_2}. \quad (9.44)$$

Приведенный радиус влияния R_n определяется по данным опытной откачки при двух наблюдательных скважинах по формулам:

1) для артезианских вод

$$\lg R_n = \frac{S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1}{S_1 - S_2}; \quad (9.45)$$

2) для грунтовых вод

$$\lg R_n = \frac{(2H_e - S_1) S_1 \lg r_2 - (2H_e - S_2) S_2 \lg r_1}{(2H_e - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}. \quad (9.46)$$

Буквенные обозначения в формулах см. на рис. 51 и 52.

Для грунтовых вод при понижении уровня в центральной скважине, не превышающем 20% мощности водоносного горизонта, можно пользоваться формулой (9.45).

Задача 20. Определить основные гидрогеологические параметры k , T , $R_{\text{п}}$ по результатам кустовой откачки, состоящей из центральной и двух наблюдательных совершенных скважин. Скважины вскрыли напорные воды (см. рис. 51). Исходные данные приведены в табл. 13.

Таблица 13

Диаметр центральной скважины, м	Мощность водоносных песков, м	Понижение уровня в центральной скважине, м	Дебит, м ³ /сут	Понижение уровня в наблюдательных скважинах, м		Расстояние наблюдательных скважин от центральной, м	
				скв. 1	скв. 2	скв. 1	скв. 2
0,203	40,0	6,25	950	3,50	2,60	125	310

Решение. Коэффициент фильтрации определим по формулам (9.31) и (9.32):

1) по центральной и первой наблюдательной

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_1}{r_c}}{m(S_c - S_1)} = 0,366 \cdot 950 \frac{\lg \frac{125}{0,1}}{40(6,25 - 3,50)} = 9,79 \text{ м/сут};$$

2) по центральной и второй наблюдательной:

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_c}}{m(S_c - S_2)} = 0,366 \cdot 950 \frac{\lg \frac{310}{0,1}}{40(6,25 - 2,60)} = 8,31 \text{ м/сут};$$

3) по двум наблюдательным:

$$k = 0,366 Q \frac{\lg \frac{r_2}{r_1}}{m(S_1 - S_2)} = 0,366 \cdot 950 \frac{\lg \frac{310}{125}}{40(3,50 - 2,60)} = 10,40 \text{ м/сут}.$$

Среднее значение коэффициента фильтрации

$$k_{\text{ср}} = \frac{9,79 + 8,31 + 10,40}{3} = 9,50 \text{ м/сут}.$$

Коэффициент водопроводимости равен:

$$T = k_{\text{ср}} m = 9,50 \cdot 40 = 380 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Приведенный радиус влияния вычислим по формуле (9.45):

$$\lg R_{\text{п}} = \frac{S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1}{S_1 - S_2} = \frac{3,50 \lg 310 - 2,60 \lg 125}{3,50 - 2,60} = 3,631.$$

При $\lg R_{\text{п}} = 3,631$ приведенный радиус влияния $R_{\text{п}} = 4276$ м.

Определение гидрогеологических параметров по данным откачек из скважин при неустановившемся движении. В условиях неустановившейся фильтрации подземных вод к скважине гидрогеологические параметры как основные расчетные зависимости для неогра-

ниченного в плане пласта определяются по формулам (9.11), (9.12), (9.13) и (9.14). Для начального периода откачки с ярко выраженным неустановившимся режимом фильтрации (при $\frac{r^2}{4\kappa t} > 0,1$) применяются формулы (9.11) и (9.12), основанные на использовании экспоненциальной зависимости; для второго периода с квазистабилизировавшимся режимом фильтрации (при $\frac{r^2}{4\kappa t} < 0,1$) используются формулы (9.13) и (9.14), основанные на логарифмической зависимости.

При неустановившейся фильтрации определяются коэффициенты фильтрации k , водопроводимости T , пьезопроводности κ или уровнепроводности a , приведенный радиус влияния R_p и др. Существует много методов определения гидрогеологических параметров. В за-

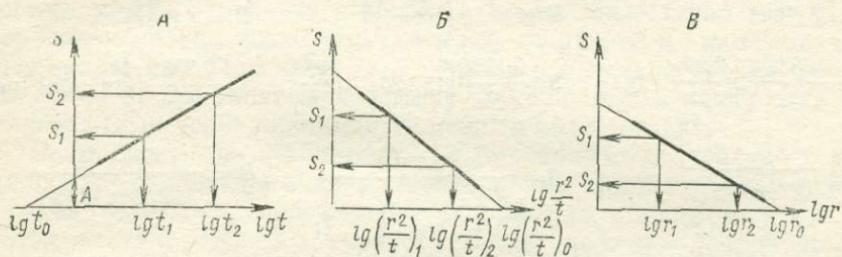


Рис. 53. Графики зависимости: А — $S=f(\lg t)$; Б — $S=f[\lg(r^2/t)]$; В — $S=f(\lg r)$

висимости от характера опытной информации они подразделяются на две группы. В методах первой группы (методы подбора, эталонной кривой, характерных точек, графоаналитический и др.) используются закономерности режима подземных вод при откачках, определяемых только фильтрационными и емкостными свойствами опробуемых водоносных горизонтов. Этими методами определяют основные расчетные параметры. В методах второй группы (методы Ф. М. Бочевера, Е. Л. Минкина, М. Хантуша и др.) используются опытные закономерности, которые определяются не только фильтрационными и емкостными свойствами, но и граничными условиями. Методами второй группы кроме основных определяются и специфические параметры (коэффициент перетекания, гидравлическое сопротивление дна водоемов или водотоков и др.). Методы подробно описаны в соответствующей литературе [5, 10, 12, 44, 45, 48, 50]. Ниже рассматривается графоаналитический метод расчета параметров (метод Джейкоба) для артезианских и грунтовых вод. Он нашел широкое применение в гидрогеологической практике.

Артезианские воды. Для напорных вод в графоаналитическом методе исходной является формула (9.13). В зависимости от выбранных координат существуют три способа обработки данных: временного, комбинированного и площадного прослеживания.

Способ временного прослеживания заключается в прослеживании понижения или восстановления уровня во времени по замерам

в одной скважине ($S - \lg t$). В способе комбинированного прослеживания регистрируют изменения уровня во времени по нескольким наблюдательным скважинам ($S - \lg r^2/t$). Обработка изменений уровня в зависимости от расстояния наблюдательных скважин до центральной, т. е. по площади опытного участка, рассматривается в способе площадного прослеживания ($S - \lg r$). Все три способа обработки данных по исходному уравнению (9.13) представляют собой уравнения прямой линии в разных системах координат (рис. 53).

Формулы для расчетов гидрогеологических параметров (коэффициентов водопроводности T , пьезопроводности κ , а также приведенного радиуса влияния $R_{\text{п}}$) см. ниже:

Временное прослеживание	Комбинированное прослеживание	Площадное прослеживание
$S = f(\lg t)$	$S = f\left[\lg\left(\frac{r^2}{t}\right)\right]$	$S = f(\lg r)$
$S = \frac{0,183Q}{km} \left(\lg \frac{2,25\kappa}{r_c^2} + \lg t \right)$	$S = \frac{0,183Q}{km} \left(\lg 2,25\kappa - \lg \frac{r^2}{t} \right)$	$S = \frac{0,366Q}{km} \left(\frac{1}{2} \lg 2,25\kappa t - \lg r \right)$
$B = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	$B = \frac{S_1 - S_2}{\lg\left(\frac{r^2}{t}\right)_2 - \lg\left(\frac{r^2}{t}\right)_1}$	$B = \frac{S_1 - S_2}{\lg r_2 - \lg r_1}$
$T = km = \frac{0,183Q}{B}$	$T = km = \frac{0,183Q}{B}$	$T = km = \frac{0,366Q}{B}$
$\lg \kappa = 2\lg r_c - 0,35 + \frac{A}{B}$	$\lg \kappa = \frac{A}{B} - 0,35$	$\lg \kappa = \frac{2A}{B} - 0,35 - \lg t$
$R_{\text{п}} = 1,5 \sqrt{\kappa t}$	$R_{\text{п}} = 1,5 \sqrt{\kappa t}$	$R_{\text{п}} = 1,5 \sqrt{\kappa t}$

Буквенные обозначения: t — продолжительность откачки; r — расстояние от рассматриваемой скважины до центральной; Q и r_c — дебит и радиус центральной скважины; B — угловой коэффициент (тангенс угла наклона прямой на графике к оси абсцисс); A — отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат (начальная ордината прямой).

При обработке опытных данных по одной скважине используется способ временного прослеживания. Если количество скважин более трех, данные можно обрабатывать всеми способами. Расчет гидрогеологических параметров по приведенным формулам сводится к следующему. Для любого способа по опытным данным строится график зависимости в полулогарифмических координатах. Взяв на прямой две произвольные точки и спроектировав их на оси абсцисс и ординат, получим величины, по которым определяется угловой коэффициент B . По соответствующим формулам вычисляется коэффициент водопроводности. Разделив последний на мощность водоносного пласта, получим коэффициент фильтрации. Далее с графика снимается A . Определив A , можно установить коэффициент пьезопроводности κ . После κ вычисляется приведенный радиус влияния $R_{\text{п}}$.

При расчетах по указанным способам постоянство дебита откачки является обязательным условием. Если откачка проводится из несовершенной скважины, методика расчета параметров не изменяется. Несколько изменяются формулы для определения пьезопроводности, в которые вводится выражение — 0,434 ζ . Для способа временного прослеживания эта формула имеет вид

$$\lg z = 2 \lg r_c - 0,35 + \frac{A}{B} - 0,434\zeta, \quad (9.47)$$

где ζ — гидравлическое сопротивление, учитывающее несовершенство скважины (определяется по табл. 12 или графикам на рис. 45 и 46). Величина ζ в наблюдательных скважинах незначительная, и ее обычно пренебрегают. Определение параметров теми же способами можно проводить и по результатам наблюдений за восстановлением уровня после откачки в возмущающей и наблюдательных скважинах. При этом за S берется повышение уровня, отсчитываемое от динамического уровня, замеренного в конце откачки. За расчетный дебит принимается дебит в конце откачки.

Размерность коэффициента пьезопроводности зависит от размерностей понижения и времени, выбранных при построении графика. Так, если понижение измеряется в метрах, а время в сутках, то размерность z $m^2/сут$. Размерность коэффициентов водопроводимости и фильтрации зависит только от размерности дебита. Если дебит измеряется в $m^3/сут$, размерность коэффициента водопроводимости $m^2/сут$, а коэффициента фильтрации — $m/сут$.

Грунтовые воды. Графоаналитический метод применим только для напорных водоносных горизонтов, мощность которых во время откачки остается постоянной. В грунтовых водах мощность во время откачки — величина переменная. Однако если понижение к концу откачки не превышает 20% начальной мощности водоносного горизонта H_e , можно определять с допустимой для практики погрешностью расчетные параметры для грунтовых вод как для артезианских. Если же это условие не соблюдается, для определения гидрогеологических параметров строятся те же графики, что и для артезианских вод, только по оси ординат откладывают не S , а $(2H_e - S)S$. Расчетные формулы для грунтовых вод даны ниже:

Временное прослеживание	Комбинированное прослеживание	Площадное прослеживание
$(2H_e - S)S = f(\lg t)$	$(2H_e - S)S = f\left[\lg\left(\frac{r^2}{t}\right)\right]$	$(2H_e - S)S = f(\lg r)$
$B = \frac{(2H_e - S_2)S_2 - (2H_e - S_1)S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	$B = \frac{(2H_e - S_1)S_1 - (2H_e - S_2)S_2}{\lg\left(\frac{r^2}{t}\right)_2 - \lg\left(\frac{r^2}{t}\right)_1}$	$B = \frac{(2H_e - S_1)S_1 - (2H_e - S_2)S_2}{\lg r_2 - \lg r_1}$
$k = \frac{0,366Q}{B}$	$k = \frac{0,366Q}{B}$	$k = \frac{0,732Q}{B}$
$\lg a = 2 \lg r - 0,35 + \frac{A}{B}$	$\lg a = \frac{A}{B} - 0,35$	$\lg a = \frac{2A}{B} - 0,35 - \lg t$
$R_{II} = 1,5 \sqrt{at}$	$R_{II} = 1,5 \sqrt{at}$	$R_{II} = 1,5 \sqrt{at}$

Ход расчетов параметров для грунтовых вод аналогичен расчетам для артезианских вод. Если возмущающая скважина несовершенная, методика расчета сохраняется. Лишь в расчетную формулу для определения уровнепроводности добавляется выражение $-0,434 \xi$. Так, для комбинированного прослеживания эта формула имеет вид

$$\lg a = \frac{A}{B} - 0,35 - 0,434\xi, \quad (9.48)$$

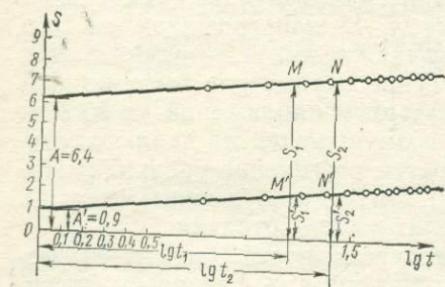


Рис. 54. Графики зависимости $S = f(\lg t)$ для центральной и наблюдательной скважин (к задаче 21)

где ξ — гидравлическое сопротивление, учитывающее несовершенство скважины. Определяется оно по тем же графикам и таблице, что и для артезианских вод.

Задача 21 (по Н. Н. Бинденману и Л. С. Язвигу, 1970). Из напорного водоносного горизонта проведена опытная откачка с постоянным дебитом $1200 \text{ м}^3/\text{сут}$. Наблюдения за уровнем осуществлялись по центральной и наблюдательной скважинам, расстояние между которыми 100 м .

Радиус центральной скважины $0,1 \text{ м}$. Результаты опытной откачки см. в табл. 14.

Таблица 14

Время от начала откачки $t, \text{ ч}$	$\lg t$	Понижение уровня воды		Время от начала откачки $t, \text{ ч}$	$\lg t$	Понижение уровня воды	
		в центральной скважине $S_c, \text{ м}$	в наблюдательной скважине $S_1, \text{ м}$			в центральной скважине $S_c, \text{ м}$	в наблюдательной скважине $S_1, \text{ м}$
6	0,78	7,12	1,6	42	1,62	7,90	2,33
12	1,08	7,42	1,90	48	1,68	7,96	2,44
18	1,26	6,54	2,04	54	1,73	8,00	2,48
24	1,38	7,70	2,18	60	1,78	8,04	2,52
30	1,48	7,75	2,24	66	1,82	8,08	2,56
36	1,56	7,82	2,31	72	1,86	8,12	2,60

Определить коэффициенты фильтрации и пьезопроводности, а также приведенный радиус влияния на конец откачки.

Решение. Так как наблюдения велись только по двум скважинам, данные обрабатываем по способу временного прослеживания. Строим график зависимости $S_c = f(\lg t)$ и $S_1 = f(\lg t)$, выражая понижения в метрах, а время в часах (рис. 54). Взяв на построенных прямых по две произвольные точки (M, N — для центральной скважины и M', N' — для наблюдательной скважины), вычислим угло-

вой коэффициент B (см. с. 90). Для центральной скважины

$$B = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1} = \frac{7,7 - 7,5}{1,4 - 1,2} = 1,0;$$

для наблюдательной скважины

$$B = \frac{S_2^1 - S_1^1}{\lg t_2 - \lg t_1} = \frac{2,2 - 2,0}{1,4 - 1,2} = 1,0.$$

Затем вычисляем коэффициент водопроводимости:

$$T = \frac{0,183Q}{B} = \frac{0,183 \cdot 1200}{1,0} = 220 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Для определения коэффициента пьезопроводности нужно знать величины A , которые снимаем с графика (рис. 54). По центральной скважине $A=6,4$, по наблюдательной — $A=0,9$. Зная A , определим коэффициент пьезопроводности:

1) для наблюдательной скважины

$$\lg z = 2 \lg r_c - 0,35 + \frac{A}{B} = 2 \lg 100 - 0,35 + \frac{0,9}{1,0} = 4,55;$$

$$z = 3,58 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{ч} = 8,5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

2) для центральной скважины

$$\lg z = 2 \lg 0,1 - 0,35 + \frac{6,4}{1,0} = 4,05; z = 1,12 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{ч} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Коэффициент пьезопроводности берут по наблюдательной скважине, так как определение его по центральной скважине менее надежно из-за возможного влияния призабойной зоны.

Определим приведенный радиус влияния на конец откачки по формуле

$$R_n = 1,5 \sqrt{zt} = 1,5 \sqrt{8,5 \cdot 10^5 \cdot 3} = 2395 \text{ м.}$$

ГЛАВА 10. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 1. Виды моделирования и его задачи

В гидрогеологической практике большую роль играет количественная оценка условий движения подземных вод. Однако сложность природных условий и процессов часто создает такие ситуации, когда либо нет возможности описать реальную обстановку с помощью уравнений, либо имеются уравнения, точное решение которых до сих пор не найдено. При таких исследованиях огромное значение приобретает моделирование. В гидрогеологических расчетах применяются два вида моделирования: физическое и математическое.

Физическое моделирование применяют при изучении процессов, механизм которых еще недостаточно выяснен. В простейшем случае модель воспроизводит изучаемое явление с сохранением физической природы и геометрического подобия и отличается от оригинала лишь размерами одноименных параметров и скоростью протекания исследуемого процесса. Этот вид моделирования осуществляется на фильтрационных лотках, где создается фильтрационный поток, подобный потоку в натуре, но в уменьшенном масштабе.

В фильтрационных лотках на реальном грунте исследуются специальные вопросы, например фильтрация, осложненная явлениями внутреннего размыва грунта (суффозия), или заиление (кольматаж) грунта, фильтрация при наличии разнородных жидкостей (нефть, вода) и т. д.

Математическое моделирование применяют при изучении процессов, которые имеют одинаковое математическое описание. Они описываются однотипными дифференциальными уравнениями, но по физической сущности могут быть совершенно различными.

В природе существует целый ряд аналогичных процессов: фильтрация жидкостей в пористой среде, движение электричества в проводнике, распространение тепла в твердом теле, диффузия жидкостей и газов, распространение магнитного потока и др.

Академик А. Н. Крылов писал: «Казалось бы, что может быть общего между расчетами движения небесных светил под действием притяжения к Солнцу и между собою и качкою корабля на волнении... Между тем, если написать только формулы и уравнения без слов, то нельзя отличить, какой из этих вопросов решается — уравнения одни и те же»¹.

При математическом моделировании исследования ведут на модели (например, электрической). Полученные результаты с помощью уравнений переносят на интересующее нас явление или процесс (например, фильтрацию воды в пористой среде). Для решения фильтрационных задач используются преимущественно гидравлическая и электрическая аналогии, модели делаются сплошными и сеточными.

Сплошная гидравлическая модель основана на аналогии между плоским фильтрационным потоком и ламинарным потоком в щели между двумя стенками. Такая модель носит название щелевого лотка (за рубежом ее называют вязко-жидкостной моделью Хеле — Шоу). В щелевом лотке можно воспроизвести движение жидкости в однородном грунте при наличии свободной поверхности.

Сплошная электрическая модель получила наиболее широкое практическое применение. Она основана на электрогидродинамической аналогии (сокращенно ЭГДА), т. е. аналогии между фильтрацией жидкости в пористой среде и потоком электричества.

На сеточных моделях сплошной фильтрационный поток моделируется ортогональной сеткой гидравлических и электрических сопротивлений. Теоретической основой моделей является метод сеток

¹ Собрание трудов акад. А. Н. Крылова. М. — Л., 1951, т. 1, ч. 2, с. 28.

(метод конечных разностей). Весь фильтрационный поток разбивается на отдельные блоки, а вода, содержащаяся в каждом блоке, как бы сосредотачивается в центре блока. Сеточные модели называются *сеточными интеграторами* (гидравлическими и электрическими). Таким образом, при физическом и математическом моделировании фильтрации подземных вод используются: фильтрационные и щелевые лотки, приборы ЭГДА, гидравлические и электрические интеграторы.

Гидрогеологические задачи, решаемые методами моделирования, делятся на три типа: прямые, обратные и инверсные.

Прямой задачей называют такую, в которой заданы конкретные начальные и граничные условия и требуется определить изменения фильтрационного потока (напоров или уровня подземных вод) в различные моменты времени по всей моделируемой области.

Обратной задачей известны параметры и характер распределения напоров в исследуемой области движения подземных вод. Требуется определить те возмущения, которые определяют данные условия распределения напоров, т. е. решается задача относительно неизвестных граничных условий.

Инверсная задача ставит своей целью определение физических параметров по известным граничным условиям и характеру распределения напоров в исследуемой области фильтрации.

Наиболее перспективное направление в развитии методов моделирования — сочетание сплошных и сеточных электрических моделей, сеточных электрических моделей с цифровыми вычислительными машинами, а также конструирование сложных постоянно действующих сеточных электрических моделей артезианских бассейнов.

Методы моделирования фильтрации подземных вод изложены в работах [3, 17, 18, 22, 23, 24, 33, 34 и др].

§ 2. Решение задач установившейся фильтрации на моделях ЭГДА

Если сопоставить основные законы фильтрационного потока и электрического тока, т. е. законы Дарси и Ома, то идентичность записи этих законов очевидна:

$$Q = kF \frac{\Delta H}{\Delta l} = \frac{\Delta H}{\Phi} \quad \text{и} \quad I = cF_m \frac{\Delta V}{\Delta l_m} = \frac{\Delta V}{\Phi_m}. \quad (10.1)$$

Характеристики электрического поля обозначены индексом m , характеристики фильтрационного — без индекса.

Решение задач установившейся фильтрации сводится к построению электрической сетки линий токов и линий равных потенциалов. Сетка аналогична гидродинамической сетке. Таким образом, электрическую сетку следует рассматривать как гидродинамическую, по которой можно определить элементы фильтрационного потока (напор, скорость движения воды, расход потока). Переход от приведенного потенциала \bar{V} (все замеры на моделях ЭГДА снимаются в ви-

де приведенных значений потенциала) к истинному значению напора H в артезианском потоке выражается формулой

$$H = H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \bar{V}, \quad (10.2)$$

где H_{\max} и H_{\min} — максимальный и минимальный напоры в реальной области фильтрации.

При моделировании потоков грунтовых вод для перехода от приведенных потенциалов \bar{V} к истинным значениям мощности потока h используется аналогичная формула:

$$h^2 = (h_{\max}^2 - h_{\min}^2) \bar{V} + h_{\min}^2. \quad (10.3)$$

Формула скорости фильтрации имеет вид

$$v = k \frac{\Delta H}{\Delta S}, \quad (10.4)$$

где k — коэффициент фильтрации водовмещающих пород; ΔH — разность напоров между двумя соседними линиями равных напоров гидродинамической сетки; ΔS — расстояние между теми же линиями равных напоров, измеренное по промежуточной линии тока с учетом масштаба чертежа (см. рис. 37).

Весь фильтрационный поток линиями тока гидродинамической сетки разделен на ленты тока (лента тока — часть фильтрационного потока, ограниченного смежными линиями тока). Фильтрационный расход потока на единицу его ширины q равен сумме расходов всех лент тока и может быть выражен формулой

$$q = \sum_{n=1}^m k \left(\frac{\Delta H}{\Delta S} \cdot \Delta l \right), \quad (10.5)$$

где Δl — ширина ленты тока.

Для квадратной сетки (при $\Delta S = \Delta l$) формула единичного расхода упростится:

$$q = m k \Delta H. \quad (10.6)$$

Модель области фильтрации делается из токопроводящих материалов, в качестве которых широко используется специальная электропроводная бумага с удельным сопротивлением от 100 до 100 000 Ом·см. Схема прибора, изображенная на рис. 55, состоит из главной (питающей) и измерительной цепей, а также модели. В соответствии с этой принципиальной схемой электрический ток от источника питания 1 через контактный ключ 2 и реостат 3 идет к шине 4 и далее поступает на модель 5, откуда через шину 6 возвращается в сеть. В измерительную цепь включены арометр 7 и гальванометр 8. Подвижный контакт арометра 7 соединен с иглой 9, которой замеряется потенциал в различных точках модели.

Для замеров приведенного потенциала \bar{V} используется принцип мостовой схемы (иногда ставится компенсационная схема). Если иглу установить в такой точке модели, где гальванометр 8 пока-

жет нуль, то потенциалы на модели и на контакте агометра 7 будут равны. Зная сопротивления h_1 и h_2 на агометре 7, легко найти приведенный потенциал по формуле

$$\bar{V} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (10.7)$$

Установив контакт делителя сопротивлений (агометра 7) на соответствующую величину, можно найти на модели точки с любым значением приведенного потенциала. Для учебных целей могут быть использованы упрощенные конструкции приборов ЭГДА, которые легко изготовить в лабораторных условиях.

Модели ЭГДА и принцип работы на них рассмотрены в работах [17, 18, 22, 23, 52 и др.].

Задача 22 (по М. А. Вевиоровской и др., 1962). На песчаной однородной толще мощностью 82,5 м и с коэффициентом фильтрации 10 м/сут построена плотина шириной 37 м. Мощность воды в верхнем бьефе 12 м, в нижнем — 2 м. Водоупор горизонтален. На границе плотины со стороны верхнего бьефа установлен шпунт на глубину 40 м.

Необходимо: 1) построить гидродинамическую сетку через десятичные доли приведенного напора; 2) определить расход фильтрации под плотиной на 1 м ширины потока; 3) построить эпюры приведенных напоров под плотиной и выходных скоростей в нижнем бьефе. Длину моделируемого участка принять пятикратной ширине плотины, т. е. 185 м. Модель выполнить в масштабе 1 : 500.

Решение. Для построения гидродинамической сетки следует выполнить две задачи — прямую и обращенную.

1. Прямая задача — определение линий равных напоров.

В масштабе вырезаем из электропроводной бумаги модель данного участка, оставляя полоски бумаги шириной 0,5 см для присоединения шин по всей длине области фильтрации верхнего и нижнего бьефов. Для моделирования шпунта разрезаем ножницами электропроводную бумагу по всей длине шпунта. В полученный разрез вставляем полоску обычной бумаги, чтобы не было контакта между разрезанными частями электропроводной бумаги. К модели присоединяем шины и подключаем их к прибору (шину верхнего бьефа — к гнезду с индексом 100%, шину нижнего бьефа — к гнезду с индексом 0%). Включаем прибор и устанавливаем на шинах точное значение потенциала (исключая влияние подводящих проводов). Затем устанавливаем делитель напряжения в положение 10%, 20%, ..., 90%, строим последовательно линии равных потенциалов с интервалом в 10%. На этих линиях пишем

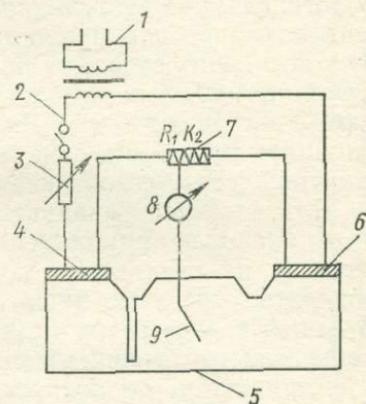


Рис. 55. Схема прибора ЭГДА

приведенный потенциал \bar{V} в долях единицы ($0,1; 0,2; \dots; 0,9$) и действительный напор (в метрах), определяемый по формуле (10.2).

Так, по линии приведенного потенциала $\bar{V}=0,1$ действительный напор равен $H_1=H_{\min}+(H_{\max}-H_{\min}) \bar{V}_1=2+(12-2) \cdot 0,1=3$ м; по линии приведенного потенциала $\bar{V}_2=0,2$ действительный напор составит $H_2=2+(12-2) \cdot 0,2=4$ м и т. д.

2. Обращенная задача — определение линий тока.

Из электропроводной бумаги, которая использовалась в прямой задаче, вырезаем другую модель участка, оставляя полоски для шин вдоль тех границ модели, где не было шин в прямой задаче. Присоединяем шины к модели. По линии шпунта устанавливается полосовая шина (латунная или медная полоска при помощи зажимного ключа ребром прижимается к модели). На шину, установленную по линии основания плотины, и полосовую шину подается нулевой потенциал, а на шины по линии водоупора и боковым границам — потенциал 100 %. Включаем прибор и опять устанавливаем на шинах точное значение потенциала. С помощью иглы строим линии тока (сетку строим квадратную).

Для получения квадратной гидродинамической сетки берем одну из наиболее прямолинейных лент тока в прямой задаче и разбиваем ее на глаз или с помощью измерителя на криволинейные квадраты отрезками линий тока и подсчитываем их количество. В нашей задаче таких квадратов пять ($m=5$). Искомый интервал приведенного потенциала для построений линий тока равен $1/m$, т. е. линии тока проводятся, устанавливая делитель напряжения в положениях $1/m \cdot 100\%$, $2/m \cdot 100\%$, ..., $m-1/m \cdot 100\%$.

Совместив модели прямой и обращенной задач, получим квадратную гидродинамическую сетку или близкую к ней (рис. 56, А).

Фильтрационный расход под плотиной вычислим по формуле (10.6):

$$q = m k \Delta H = 5 \cdot 10 \cdot 1 = 50 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для построения эпюры приведенных напоров по оси ординат в произвольном масштабе откладываем значения приведенного напора ($0; 0,1; 0,2; \dots; 1,0$), а по оси абсцисс двойную длину шпунта AB и BC и ширину плотины CD . Данные приведенного напора переносим на график в виде точек, которые соединяются плавной кривой (рис. 56, Б).

Эпюра выходных скоростей фильтрации строится следующим образом. От границы плотины в нижнем бьефе (рис. 56, А, точка D) откладываем по оси абсцисс расстояние в м. На ось ординат наносим значения скорости фильтрации в соответствующих точках нижнего бьефа. Скорость фильтрации определяется по формуле (10.4):

$$v = k \frac{\Delta H}{\Delta S},$$

где ΔH — разность напоров между смежными линиями равных напоров ($\Delta H = H_1 - H_{\min} = 3 - 2 = 1$); ΔS — длина линий тока между

смежными линиями равных напоров в различных точках. В данной задаче взято шесть значений ΔS : 3,8; 8,1; 12,6; 18,9; 26,1; и 31,5 м. Зная значения ΔS , по формуле (10.4) вычисляем скорости фильтра-

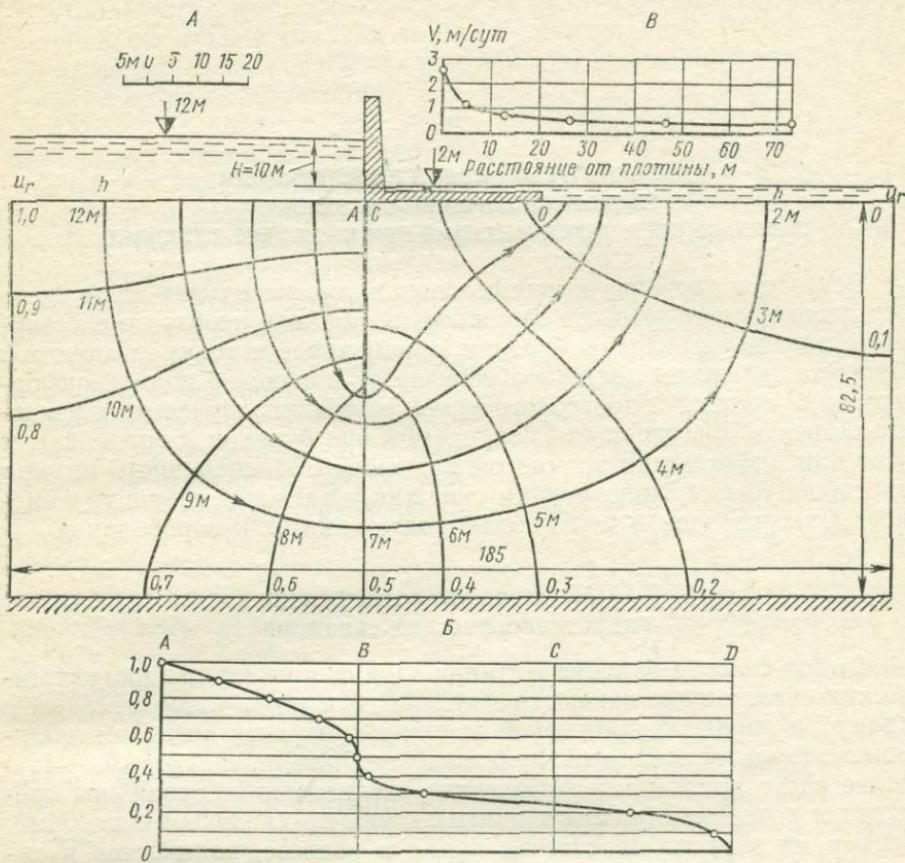


Рис. 56. Расчет фильтрации под плотиной в однородной толще при наличии шпунта (к задаче 22): А — гидродинамическая сетка, Б — эпюра приведенных напоров, В — эпюра выходных скоростей

ции в выбранных точках ($v_1=2,63$; $v_2=1,23$; $v_3=0,79$; $v_4=0,53$; $v_5=0,46$; $v_6=0,32$ м/сут). Нанесенные на график точки скоростей фильтрации соединяются плавной кривой (рис. 56, Б).

Часть 3

МЕТОДИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ГЛАВА 11. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН, НАБЛЮДЕНИЯ И ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ СКВАЖИН

Вскрытие, изучение и использование подземных вод чаще всего осуществляется буровыми скважинами, поэтому необходимо совершенствовать технологию бурения, опробование и документацию их. Буровые скважины должны обеспечивать получение полной информации о геолого-гидрогеологических условиях изучаемого участка. Объем и достоверность получаемой при бурении и опробовании скважин информации во многом зависят от обоснованного выбора способа бурения, конструкции скважин, надежной изоляции водоносных горизонтов и технической подготовки их к опробованию.

§ 1. Обоснование конструкции гидрогеологических скважин

Выбор способа бурения и станка. При сооружении гидрогеологических скважин применяются способы бурения: *вращательный с прямой и обратной промывкой водой, с продувкой воздухом, ударно-канатный, колонковый, реактивно-турбинный, шнековый*. Наиболее часто при гидрогеологических исследованиях скважины проходят роторным (вращательным) и ударно-канатным способами. Выбор их зависит от состава пород в разрезе, количества и типа водоносных горизонтов, назначения и вида скважины, глубины и диаметров бурения, изученности участка и других факторов. При выборе необходимо учитывать достоинства и недостатки рассматриваемых способов бурения.

Категории гидрогеологических скважин, типы их конструкций. По целевому назначению различают скважины: поисковые, разведочные, разведочно-эксплуатационные, эксплуатационные и наблюдательные.

Поисковые скважины бурят при поисково-съемочных работах и предназначены для изучения общих геолого-гидрогеологических условий, предварительной количественной и качественной оценки встреченных водоносных горизонтов.

Разведочные скважины проходят при предварительной и детальной разведках перспективных участков с целью количественной и качественной оценки наиболее перспективных горизонтов и для изучения гидрогеологических параметров водоносных пластов.

Разведочно-эксплуатационные скважины, сооружаемые на детальной стадии разведки в местах будущих водозаборов, предназначены для полного изучения основного водоносного горизонта и последующей их передачи в эксплуатацию.

Наблюдательные скважины могут закладываться на предварительной, детальной стадиях разведки и используются для наблюдений за режимом подземных вод как при проведении опытных работ, так и при эксплуатации.

Общие требования ко всем категориям скважин: 1) сооружение их с минимальными затратами труда, времени и средств; 2) качественное и эффективное выполнение гидрогеологических наблюдений, исследований, опробования; 3) возможность размещения измерительных приборов, приборов опробования, водоподъемников и т. д.; 4) защита водоносных горизонтов от загрязнения, возможность проведения ремонтных работ, извлечения труб.

Конструкции гидрогеологических скважин разнообразны. Они определяются целевым назначением бурения, глубиной и способом проходки, конечным и начальными диаметрами, способами изоляции и опробования, особенностями водоносных горизонтов. Основными элементами конструкции гидрогеологических скважин (рис. 57) являются: кондуктор (направляющая труба); техническая или эксплуатационная колонна; сальник, цементный стакан, фильтр с отстойником и надфильтровой частью.

К параметрам конструкции скважин относятся: длина, диаметр колонн обсадных труб, фильтра, интервалы цементации. Количество и длина обсадных колонн зависят от глубины скважины, геологического разреза и способа бурения. Глубина скважины выбирается в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта и мощности его вскрытия (водоносные горизонты мощностью до 20 м вскрываются полностью) [31]. Вскрытая мощность водоносного горизонта и конечный диаметр скважины должны обеспечивать проектный дебит, установку фильтра и проведение необходимых исследований. Значения минимальных диаметров различных категорий скважин при вращательном и ударном способе бурения рекомендованы П. П. Климентовым [31].

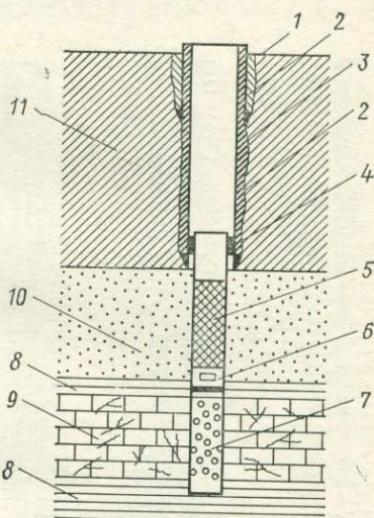


Рис. 57. Схема конструкции скважины с двумя фильтрами:

1 — кондуктор (направляющая труба), 2 — цементация, 3 — эксплуатационная колонна, 4 — сальник, 5 — фильтр сетчатого типа, 6 — ниппель с промывочным окном и цементной пробкой, 7 — фильтр дырчатого типа, 8 — глины, 9 — трещиноватые известняки, 10 — водонасыщенные пески, 11 — суглинки

Эксплуатационный диаметр скважины, предназначенный для размещения водоподъемника, должен быть на 50—100 мм больше диаметра водоподъемника. Если диаметр фильтра меньше диаметра эксплуатационной или технической колонны, возникает необходимость в установке сальника или переходника. При создании конструкции скважины необходимо учитывать, что при вращательном способе бурения обсадные трубы устанавливаются в скважине после бурения определенного интервала и выход колонны одного диаметра может быть очень значительным (до нескольких сот метров).

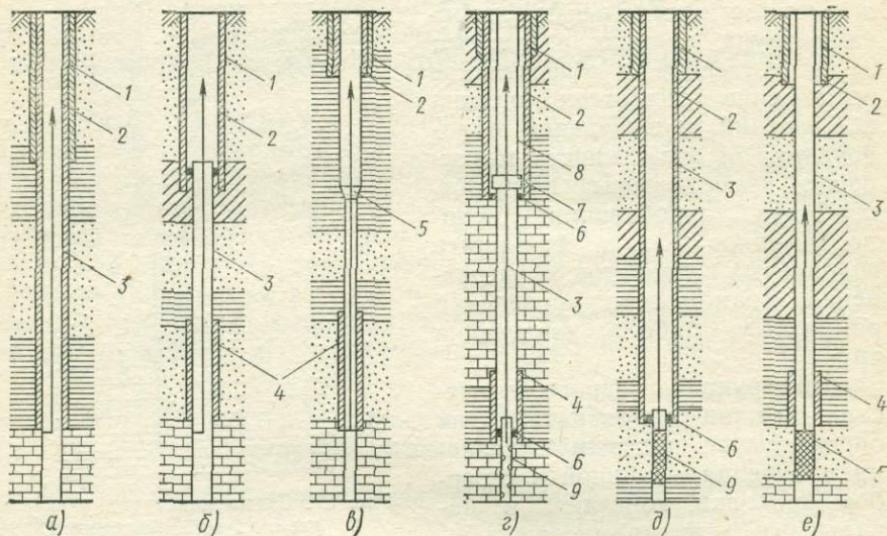


Рис. 58. Схема конструкций скважин при роторном бурении:

a, b, в, г, д, е — в разных геологических условиях; 1 — кондуктор, 2 — затрубная цементация, 3 — эксплуатационная колонна, 4 — подбашмачная цементация, 5 — переходник, 6 — сальник, 7 — муфта с левой резьбой, 8 — техническая колонна, 9 — фильтровая колонна. Стрелкой показана высота подъема подземных вод

При ударном способе бурение ведется с одновременной обсадкой скважины и выход колонны одного диаметра может быть 30—40 м, реже до 70 м с установкой башмака труб в глинистых толщах [47]. Ниже приведены наиболее часто встречающиеся конструкции скважин [9].

Роторный способ бурения (рис. 58):

- конструкция скважины позволяет надежно изолировать неиспользуемые водоносные горизонты;
- конструкция позволяет монтировать водоподъемник выше эксплуатационной колонны, которая устанавливается вплоть на сальнике с подбашмачной цементацией;
- конструкция предусматривает изоляцию верхней части скважины и установку насоса в колонне с переходником на меньший диаметр;

г) конструкция позволяет надежно изолировать два интервала с установкой одной эксплуатационной колонны;

д) наиболее простая и экономически выгодная конструкция с использованием одной эксплуатационной колонны; она широко применяется в практике;

е) сходна с предыдущей, но фильтр устанавливается на эксплуатационной колонне с применением специальной манжеты для цементации колонны выше водоносного горизонта.

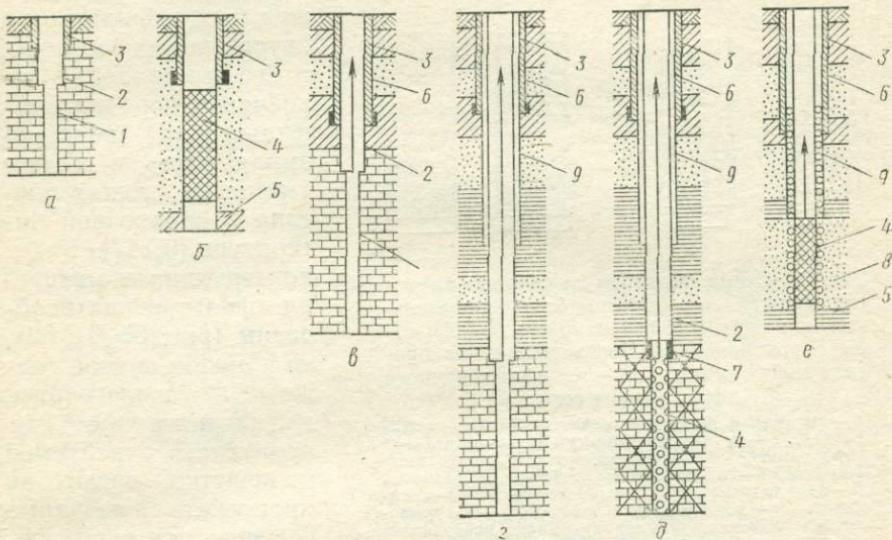


Рис. 59. Схема конструкций скважин при ударно-канатном бурении:

а, б, в, г, д, е — в разных геологических условиях; 1 — водоприемная часть, 2 — эксплуатационная колонна, 5 — отстойник, 6 — межтрубная цементация, 7 — сальник, 8 — гравийная обсыпка, 9 — техническая колонна

Ударно-канатный способ бурения (рис. 59):

а) скважина закреплена одной колонной в верхней части, остальная часть — в скальных породах без обсадки;

б) при небольшой глубине скважины фильтр установлен на колонне труб;

в) верхняя часть скважины закреплена колонной труб с цементацией, остальная часть — в скальных породах без обсадки;

г) двухколонная конструкция предусматривает изоляцию вышележащих горизонтов;

д) конструкция сходна с предыдущей, но предусматривает установку фильтра в водоносном горизонте;

е) конструкция предусматривает установку фильтра с гравийной обсыпкой и надежную изоляцию двух водоносных горизонтов.

Для обоснования диаметра эксплуатационной колонны в скважине необходимо правильно выбирать водоподъемники с учетом

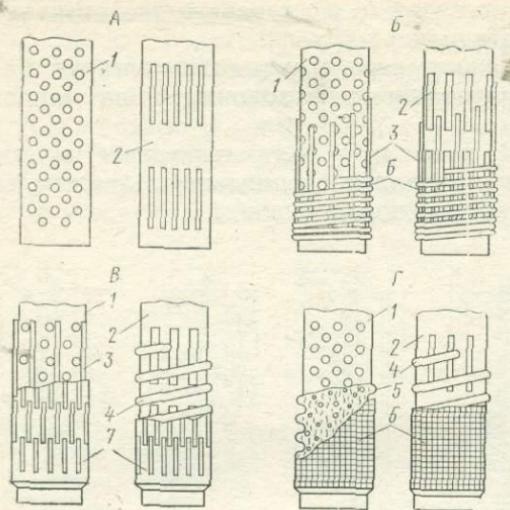


Рис. 60. Схема фильтров на опорных каркасах из труб: А — фильтры без дополнительной водоприемной поверхности; Б — фильтры с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, В — из штампованного листа, Г — из сеток:

1 — трубчатый фильтр — каркас с круглой перфорацией, 2 — трубчатый фильтр-каркас с щелевой перфорацией, 3 — подкладочные продольные стержни, 4 — подкладочная спиральная обмотка, 5 — подкладочная гофрированная сетка из винипласти, 6 — водоприемная поверхность из проволочной обмотки, 7 — водоприемная поверхность из штампованного стального листа

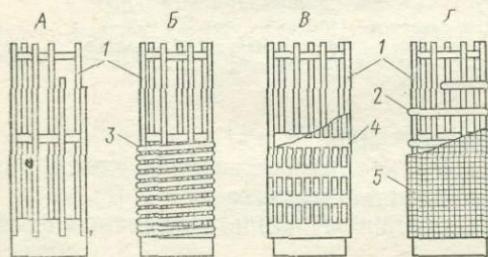


Рис. 61. Схемы фильтров на опорных каркасах из стержней (каркасно-стержневые): А — каркасно-стержневой фильтр без дополнительной водоприемной поверхности, Б — с водоприемной поверхностью из намотанной проволоки, В — из штампованного листа, Г — из сетки:

1 — стержневой фильтр-каркас, 2 — подкладочная спиральная намотка, 3 — водоприемная поверхность из проволочной обмотки, 4 — водоприемная поверхность из штампованного листа, 5 — водоприемная поверхность из сеток

их диаметра, глубины установки и производительности. Принцип выбора водоподъемников и описание типов приведены в главе 12.

Выбор и расчет фильтра. Водоприемная часть скважин должна быть с фильтром в неустойчивых породах и бесфильтровой в устойчивых породах. Бесфильтровая водоприемная часть в мелкозернистых песках описана в справочной литературе [9; 47]. Виды, конструкции и материал фильтра разнообразны (рис. 60, 61, 62), но в любом случае должны удовлетворять требованиям [9; 31]: пропускать требуемое количество воды; не пропускать песчаные частицы из окружающей породы; не разрушаться от коррозии; не забиваться и не зарастать вследствие выпадения солей в осадок; не ухудшать качество воды; наружный диаметр фильтра должен быть на 50 мм при ударном способе и на 100 мм при роторном способе бурения меньше внутреннего диаметра скважины в интервале установки фильтра.

Типы фильтров, применяемых в различных водоносных породах, приведены ниже:

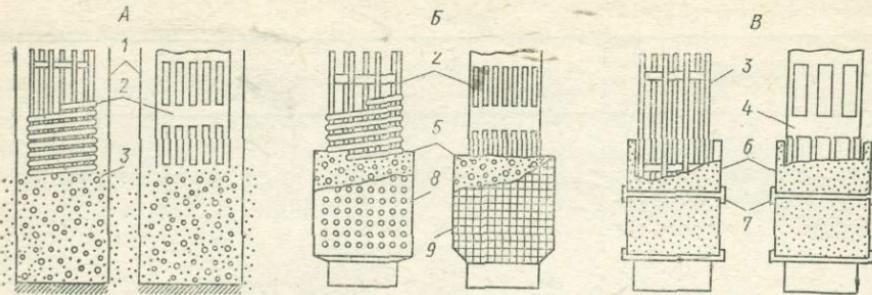


Рис. 62. Схема гравийных фильтров: А — фильтры с гравийной обсыпкой, Б — фильтры кожуховые, В — фильтры блочные:

1 — обсадные трубы, 2 — опорный каркас, 3 — стержневой каркас, 4 — трубчатый каркас, 5 — гравийная обсыпка, 6 — фильтровый блок, 7 — резиновые уплотнительные прокладки, 8 — кожух из штампованного кровельного железа, 9 — кожух из сетки квадратного плетения

Водоносные породы

Полускальные неустойчивые породы; щебнистые и галечниковые породы (20—100 мм более 50%)

Гравий, гравелистый песок (2—5 мм более 50%)

Пески крупные (1—2 мм более 50%)

Пески средние (0,25—0,5 мм более 50%)

Пески мелкие (0,1—0,25 мм более 50%)

Фильтры и их конструкция

Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией; стержневые фильтры

Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, стержневые фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали или с водоприемной поверхностью из стального штампованного листа

Трубчатые фильтры с щелевой перфорацией, стержневые фильтры с обмоткой из проволоки из нержавеющей стали, с водоприемной поверхностью из штампованного листа или сетки квадратного плетения

Трубчатые и стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из сеток киперного, галунного плетения или с двух- и трехслойной обмоткой из проволоки

Трубчатые и стержневые фильтры с одно-, двух- и трехслойной песчано-гравийной обсыпкой. Блочные фильтры

Для фильтров определяют длину рабочей и надфильтровой частей, отстойника, размеры и расположение отверстий каркасов рабочей части. Длину (м) рабочей части фильтра l_0 в водоносных пластиах значительной мощности определяют по эмпирической формуле

$$l_0 = \frac{Q \cdot a}{d}, \quad (11.1)$$

где Q — проектный дебит скважины, $\text{м}^3/\text{ч}$; d — наружный диаметр каркаса фильтра, м; a — коэффициент, зависящий от состава пород и определяемый по табл. 15.

Таблица 15

Порода	Коэффициент фильтрации, м/сут	α
Песок мелкий	2—5	90
Песок средний	5—15	60
Песок крупный	15—30	50
Гравий	30—70	30

Согласно ГОСТ В-1872—42 диаметр и длина рабочей части фильтра при ограниченной потребности в воде должны удовлетворять соотношению

$$Q = 3600\pi d l_0 \rho v, \quad (11.2)$$

где Q — проектная производительность скважины, $\text{м}^3/\text{ч}$; ρ — коэффициент скважности фильтровой сетки ($0,3—0,4$); v — допускаемая скорость входа воды в скважину, определяемая по формуле $v = 65 \sqrt{k}$.

Размеры и расположение отверстий рабочей части каркасов фильтров даны В. В. Дубровским [47]. Длины отстойников выбираются по ГОСТ 13-1872—42 [46]: при глубине скважин до 15 м — 1,5—2 м; при глубине 16—30 м — не менее 3 м; при глубине 31—90 м — не менее 5 м и при глубине более 90 м — не менее 10 м.

Для гравийных фильтров разных типов (см. рис. 62) определяют размеры проходных отверстий каркаса, состав и объем гравия для обсыпки [37]. Состав однослойной обсыпки определяют по отношению

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 8 \div 12, \quad (11.3)$$

где D_{50} — диаметр частиц, которых в обсыпке содержится по массе 50%; d_{50} — то же, в породе.

Толщина одн слойной обсыпки должна быть не менее 50 мм. Состав гравийной обсыпки и размеры проходных отверстий каркаса фильтра d_0 определяют из соотношения $d_0 \leqslant (1,5 \div 4) D_{50}$. Объем гравийной обсыпки может быть вычислен по формуле

$$V = \frac{\pi (D^2 - d^2) (l_1 + l_2 + l_3)}{4} + 15 \div 25\%, \quad (11.4)$$

где D — внутренний диаметр обсадной трубы, м; d — наружный диаметр каркаса фильтра, м; l_1 — длина отстойника, м; l_2 — длина рабочей части фильтра, м; l_3 — надфильтровая часть (5—10 м выше башмака при поднятой обсадной трубе), м.

Установить фильтр можно на эксплуатационной колонне, выходящей к устью скважины, и впотай на резиновом или пеньковом сальнике (рис. 63), при этом надфильтровая труба должна заходить в эксплуатационную колонну не менее чем на 3—5 м [47]. Установка фильтров впотай производится либо при помощи штанг

и спускового крюка (при небольшой глубине скважины), либо при помощи спускового патрубка на штангах. Разработаны методы бурения с одновременной посадкой фильтра и промывкой чистой водой и посадка фильтра с применением эрлифта [6; 9; 47].

При бурении скважин вращательным способом с глинистой промывкой необходимо предусматривать наиболее эффективный способ разглинизации скважины (насосом, гидронасадкой, гидравлическим ударом, вибрацией, применением паст и др.) [6; 9].

Выбор обсадных труб, долот. Для закрепления стенок скважин, изоляции водоносных горизонтов, изготовления каркасов фильтров применяются бесшовные трубы (ГОСТ 632—64) (табл. 16).

При ударно-канатном способе бурения зазор между предыдущей и последующей колоннами обсадных труб должен быть 10—50 мм (с учетом диаметра муфты), при роторном бурении величина зазора между стенками скважины и муфтой обсадной трубы должна быть 25—50 мм, а между долотом и наружным диаметром обсадной колонны — не менее 100 мм. Так, для спуска колонны диаметром 219 мм

скважина должна быть пробурена долотом диаметром 295 или 346 мм. Соотношения между диаметрами долот и обсадных труб при вращательном бурении приведены у В. В. Дубровского. Для лучшего использования обсадных труб муфты этих труб должны быть обточены.

При бурении в рыхлых неустойчивых породах ударным способом целесообразно пользоваться безмуфтовыми обсадными трубами [47].

Пример. Проектируется разведочно-эксплуатационная скважина с обсыпным гравийным фильтром. Параметры каркаса фильтра: наружный диаметр 168 мм, длина рабочей части 30 м, отстойник 10 м, надфильтровая часть 10 м. Диаметр обсадной колонны, в которой будет устанавливаться фильтр, 259 мм. Водоносная порода представлена песками, по данным гранулометрического состава которых $d_{50}=0,2$ мм. Необходимо подобрать состав гравия, рассчитать его объем и определить диаметр отверстий каркаса фильтра.

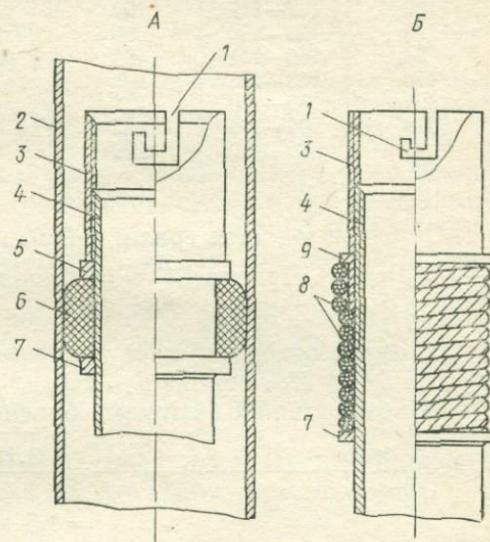


Рис. 63. Сальник: А — резиновый разжимной, Б — пеньковый разжимной:
1 — вырез для спускового ключа, 2 — обсадная труба, 3 — муфта, 4 — надфильтровая труба, 5 — подвижной фланец, 6 — резиновый цилиндр, 7 — приваренный фланец, 8 — пеньковая сальниковая набивка, 9 — кольцо

Таблица 16

Диаметры обсадных труб, мм		Муфты, наружный диаметр, мм	Диаметры обсадных труб, мм		Муфты, наружный диаметр, мм
наружный	внутренний		наружный	внутренний	
114	102—98	133	273	259—249	299
127	115—109	146	299	282—274	324
140	127—117	159	324	305—299	351
146	133—124	166	340	321—315	365
168	155—144	188	(351)	333—327	376
178	163—153	198	(377)	359—353	402
194	179—169	216	407	388—382	432
219	205—195	245	508	486	533
245	230—220	270			

Определим состав гравийной обсыпки из соотношения

$$\frac{D_{50}}{d_{50}}(8 \div 12). \text{ Приняв } \frac{D_{50}}{d_{50}} = 10, \text{ получим } d_{50} \times 10 = 0,2 \times 10 = 2,0 \text{ мм.}$$

Диаметр отверстий каркаса фильтра определим из соотношения $d_0 \leqslant (1,5 \div 4) D_{50}$, приняв $d_0 = 2D_{50}$. Тогда $d_0 = 2 \cdot 2 = 4,0 \text{ мм.}$

Объем гравийной засыпки определим по формуле (11.2):

$$V = \frac{\pi (D^2 - d^2) (l_1 + l_2 + l_3)}{4} = \frac{3,14 (0,262 - 0,17^2) (10 + 30 + 10)}{4} = 1,5 \text{ м}^3.$$

С учетом непредвиденных расходов и потерь засыпаемого материала к вычисленному количеству добавляется 15—25%, что составит $1,5 + 0,3 = 1,8 \text{ м}^3$.

С учетом способа бурения, состава пород и диаметров обсадных труб выбирают долота для бурения отдельных интервалов скважины. При бурении гидрогеологических скважин сплошным забоем роторным способом применяются долота различных типов и размеров: трехшарошечные, двух- и трехлопастные, а при бурении с отбором керна — колонковые долота. В зависимости от крепости пород применяют различные типы шарошечных долот: *M* (мягкие и вязкие породы), *MC* (мягкие с пропластками пород средней твердости), *C* (породы средней твердости), *CT* (средней твердости с пропластками твердых пород), *T* (твёрдые и крепкие), *TK* (крепкие и очень крепкие породы), *OK* (очень крепкие породы). Диаметры долот: 93, 97, 112, 118, 132, 135, 140, 145, 151, 161, 190, 214, 243, 269, 295, 320, 346, 370, 394, 445, 490. Двух- и трехлопастные долота (Д2Л и Д3Л) предназначены для бурения в породах мягких и средней твердости и имеют те же диаметры, кроме 97, 151 и 445 мм. Колонковые долота В-ДК имеют диаметры 118, 145, 190, 214, 243, 269, 295, 346 мм.

При ударном способе бурения применяются долота плоские (пластичные, глинистые породы), двутавровые (плотные сухие гли-

ны, галечник), округляющие (сланцы, известняки, песчаники), крестовые (твёрдые трещиноватые и валунисто-галечниковые породы) с диаметрами 148, 198, 248, 298, 345, 395, 445, 595, 695 мм.

Для очистки скважин при ударном способе от разбуренной породы и при проходке в песках применяются желонки с односторочным клапаном диаметрами 120, 173, 225, 285 мм, желонки с плоским двусторочным клапаном диаметрами 335, 390, 435, 530 мм. Для извлечения разжиженного шлама, воды из скважины применяются желонки с полусферическим клапаном диаметрами 130, 172, 224, 280 мм.

При вращательном бурении скважин может производиться цементация затрубного пространства отдельных колонн обсадных труб до устья или в определенных интервалах для изоляции основного горизонта от остальных, для предохранения затрубного пространства от обвалов, с целью охраны скважины от загрязнения и т. д. Цементирование скважин ведется при помощи двух пробок, с одной пробкой, через заливочные трубы, а также способом манжетного цементирования [47].

В процессе проектирования конструкции, бурения скважин должен составляться геолого-технический наряд — основной документ на проходку скважин. В зависимости от способа бурения, особенностей конструкции, типа скважины формы геолого-технических нарядов отличаются друг от друга, но по содержанию (для одного вида бурения) они сходны. Геолого-технический наряд при вращательном способе бурения делится на две части: геологическую и техническую.

§ 2. Гидрогеологические наблюдения и документация при бурении скважин

Буровые скважины, хотя и недоступные для непосредственного осмотра, должны дать исчерпывающий материал о геолого-гидрогеологических условиях участка. Это требует тщательной организации гидрогеологических наблюдений и тщательного оформления документации при буровых работах. Наблюдения предусматривают выявление водоносных горизонтов, изучение условий их залегания, состава, мощности, водообильности, фильтрационных свойств, химического состава воды и других особенностей. При бурении глубоких разведочных скважин водоносные горизонты опробуют с помощью испытателей и опробователей пластов различных типов. Наиболее часто в практике используется испытательный снаряд ИСВ для поинтервального опробования скважин глубиной до 2000 м, а также СИП-3, ОПГ и др. [7; 31].

Виды и характер гидрогеологических наблюдений при бурении скважин зависят от способа бурения, особенностей геологического разреза и водоносных горизонтов, целевого назначения скважины.

Вращательный способ бурения. 1. Ведутся наблюдения за проходимыми породами по керну с учетом процента его выхода, а при бурении сплошным забоем — по шламу, отбиравшему лотком-ло-

вушкой, устанавливаемой в циркуляционном желобе в 2—3 м от устья скважины. Шлам отбирают через 1—2 м проходки скважины из каждого пласта, при смене пород его берут одновременно с определением глубины по формуле

$$h = H - \frac{Hvk}{v_1}, \quad (11.5)$$

где H — глубина скважины в момент отбора шлама, м; v — средняя скорость проходки, м/мин; v_1 — скорость подъема глинистого раствора по межтрубному пространству скважины, м/мин; k — поправочный коэффициент к скорости подъема частиц шлама, равный $0,8 \div 0,85$. При применении колонковых долот получают керн, процент выхода которого определяют путем деления длины полученного керна (м) на длину рейса (м) и умножают на 100.

2. Наблюдают за водоносностью пород по изменению объема промывочной жидкости в отстойнике по рейке, по изменению физических свойств промывочной жидкости (плотности, вязкости, отстою и др.). Частота наблюдений 2—3 раза в смену, а при необходимости чаще.

3. Определяют статический уровень, температуру воды после удаления из скважины глинистого раствора и прокачки. Это возможно при использовании пластоиспытателей, креплении фильтром или в устойчивых породах. Пробы воды берут пробоотборниками после прокачки скважины.

4. При газопроявлениях отбирают пробы газа специальными приспособлениями.

Ударно-канатный способ бурения. 1. Ведутся наблюдения за проходимыми породами через 0,5—2 м проходки, при отборе образцов пород из-под клапана желонки при последнем ее подъеме из скважины. Породы с ненарушенной структурой отбираются с помощью грунтоносов.

2. Наблюдения за водоносностью пород ведут по косвенным признакам (литологическому составу, чистому обмытому водой инструменту и т. д.). Положение уровня воды в скважине рекомендуется измерять не менее 4 раз в смену.

3. Замер температуры воды, отбор проб воды на анализы производится после желонирования и восстановления уровня воды в скважине.

4. В закарстованных и сильно трещиноватых породах ведут наблюдения за провалами бурового инструмента.

При бурении скважин одной из главных форм документации, которую ведет техник гидрогеолог, служит геологический журнал, составленный по определенной форме (см. с. 111).

В зависимости от видов работ, проводимых по скважине, в процессе бурения составляются акты: на заложение скважины; контрольных замеров глубины; на опробование водоносных горизонтов; на обсадку скважины обсадными трубами; на тампонаж колонн обсадных труб; на сокращение и ликвидацию керна; осмотра и посадки фильтра; на проведение геофизических работ; на проведение

откачки; на желонирование; ликвидации или сдачи-приема скважины. Окончательная документация представляется в виде паспорта скважины и отчета.

Пример. Необходимо составить проект разведочно-эксплуатационной скважины для водоснабжения поселка. К эксплуатации намечен водоносный пласт среднезернистых песков четвертичного возраста, содержащий напорные воды. Мощность водоносного пласта 60 м, глубина залегания 60 м, высота напора над кровлей пласта 30 м. Эксплуатация скважины намечается с дебитом 800 м³/сут при понижении уровня 7 м в течение 27 лет ($\approx 10\,000$ сут) с помощью погружного центробежного насоса.

Учитывая назначение скважины, ее глубину, изученность разреза, предусматриваем роторное бурение станком УРБ-ЗАМ. Выбираем тип фильтра (см. с. 105). Для среднезернистых пород рекомендуется трубчатый фильтр с водоприемной поверхностью из сетки галунного плетения. Для удобства чистки скважины, ее ремонта предусмотрен диаметр каркаса фильтра 127 мм. Длину рабочей части фильтра определяем по формуле (11.1):

$$l = \frac{Q_x}{d} = \frac{33,3 \cdot 60}{127} \approx 16 \text{ м},$$

где Q_x — проектный дебит скважины, м³/ч; a — коэффициент, определенный по табл. 15; d — диаметр каркаса фильтра, мм.

Эксплуатация скважин в подобных условиях показала, что с течением времени происходит уменьшение водопропускной способности сетки, поэтому необходимо увеличить длину рабочей части фильтра до 30 м. Длина отстойника должна быть не менее 10 м [46]. Параметры рабочей части фильтра выбираем по специальной таблице [47]: диаметр отверстий d_0 16 мм; расстояние между центрами отверстий в горизонтальном ряду a 25 мм; по вертикали b 22 мм; количество отверстий в горизонтальном ряду n 14. Количество отверстий N на 1 м трубы 635; скважность k 34,9 %.

Для создания экономичной и более простой конструкции скважины предусмотрена

Приложение			
Описание проб			
Глубина интервала, м			
Выход керна			
Описание погорода (наименование, цвет, зернистость, структура, текстура, крепость, трещиноватость и др.)			
Маркировка			
Номер образца			

установка фильтра на обсадных трубах 168 мм с переходником 127 мм. Для эксплуатации проектируется насос ЭЦНВ-6-45-180 [47] производительностью 45 м³/ч, высотой напора 180 м. Он устанавливается в обсадные трубы диаметром 6" (168 мм), глубина установки насоса 40 м.

От 0 до 60 м скважину бурят шарошечным долотом АСТ-243 с,

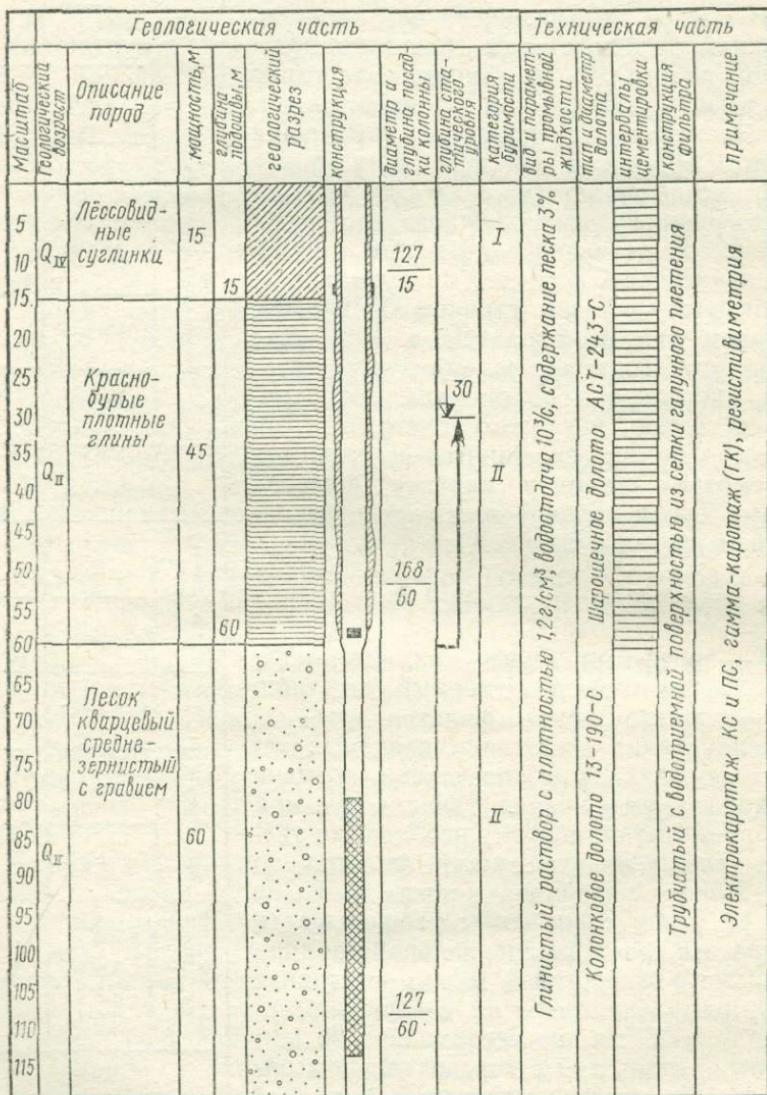


Рис. 64. Проектный геолого-технический разрез разведочно-эксплуатационной скважины

от 60 до 120 м — колонковым долотом В-190ст с отбором керна (20%). После бурения устанавливают колонну обсадных труб диаметром 168 мм с фильтром. Цементирование затрубного пространства 0—60 м осуществляют через специальные окна (выше фильтра) с применением манжета агрегатом ЦА-320.

В интервале 0—15 м предусмотрен кондуктор диаметром 273 м с затрубной цементацией. После затвердевания цемента ОЗЦ и разбуривания пробок проводят испытание скважины на герметичность. Перед обсадкой скважины ствол ее промывают облегченным глинистым раствором и проводят комплекс геофизических исследований: электрокаротаж КС и ПС, гамма-каротаж ГК и резистивиметрии для уточнения разреза, степени водообильности и мест притока воды в скважину. После установки фильтровой колонны и цементации скважины проектируется работа по восстановлению водоотдачи водоносного горизонта промывкой скважины чистой водой и тартированием желонкой.

В процессе бурения ведутся наблюдения за появлением и установлением уровня воды, за проходимыми породами по шламу, за параметрами глинистого раствора и его объемом. Данные проекта разведочно-эксплуатационной скважины представлены в геологотехническом наряде скважины (рис. 64).

ГЛАВА 12. ОПЫТНО-ФИЛЬРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Одним из основных видов работ при гидрогеологических исследованиях для различных целей являются полевые опытно-фильтрационные работы: откачки, наливы, нагнетания в скважины, наливы в шурфы, экспресс-наливы, экспресс-откачки и опережающее опробование водоносных горизонтов с помощью пластоиспытателей. Эти методы позволяют определять гидрогеологические параметры водоносных пластов и решать разнообразные гидрогеологические задачи. Выбор метода зависит от особенностей изучаемой породы, целей и стадии исследований. Основной и наиболее распространенный вид опытно-фильтрационных работ — откачки. При глубоком залегании подземных вод или при их слабой водообильности применяются наливы в скважины; при изучении фильтрационных свойств пород зоны аэрации — наливы в шурфы. Экспресс-методы применяются для ориентировочной оценки фильтрационных свойств пород при массовых определениях на поисковой и предварительной стадиях исследований.

§ 1. Виды откачек, их проектирование

Откачки подразделяются на пробные, опытные одиночные и кустовые, групповые и опытно-эксплуатационные.

Пробные откачки проводятся при поисках и предварительной разведке подземных вод для предварительной оценки водообильности, качества вод и фильтрационных свойств пород на различ-

ных участках. Эти откачки кратковременные и проводятся при одной ступени понижения.

Опытные откачки — основной вид работ при предварительной и детальной разведках подземных вод и проводятся для определения дебита Q , удельного дебита q , вида кривой дебита $Q=f(s)$, коэффициента фильтрации k или водопроводимости km , коэффициента уровня- или пьезопроводности κ или a , радиуса влияния R или приведенного радиуса влияния $R_{\text{пр}}$. При наличии наблюдательных скважин определяются размеры и темпы роста депрессионной воронки, связь между горизонтами или с рекой, водоотдача μ , показатель несовершенства скважин ξ , параметр перетекания B . Продолжительность опытных откачек 5—15 сут, количество ступеней понижения уровня от одной до четырех.

Опытные групповые откачки — разновидность кустовых откачек. Они проводятся одновременно из нескольких опытных скважин для изучения взаимодействия их и определения гидрогеологических параметров на тех участках, где откачка из одной скважины не может вызвать необходимого понижения уровня воды в ней.

Опытно-эксплуатационные откачки проводятся из одной или нескольких разведочно-эксплуатационных скважин на детальной стадии исследований в сложных гидрогеологических и гидрохимических условиях для установления закономерностей изменения уровня подземных вод или их качества при заданном дебите в течение длительного времени (один — три месяца).

При проектировании откачек необходимо правильно обосновать их вид, продолжительность, методику, оборудование, документацию и обработку данных откачек. Вид откачки выбирают с учетом стадий исследований, их целей, особенностей водоносного горизонта, глубины его залегания, наличия водоемов, связи с другими горизонтами и т. д. Проектирование опытной кустовой откачки начинают с выбора *схемы куста* — количества скважин и их взаимного расположения. В центре куста располагается опытная (возмущающая) скважина, а в виде лучей к ней — наблюдательные (рис. 65). Количество опытных скважин определяется необходимой величиной понижения уровня в удаленных наблюдательных скважинах, т. е. при создании мощного возмущения в пласте возмущающих скважин может быть две-три и располагаться они должны в вершине лучей наблюдательных скважин на расстоянии λ (рис. 65, А). Минимальное число лучей в кусте — один, максимальное — четыре, а количество наблюдательных скважин на них не менее трех. Минимальное количество скважин выбирают при глубоком залегании водоносных горизонтов (более 100 м). Чтобы обеспечить более равномерное расположение точек на площадных графиках, положение наблюдательных скважин относительно опытных на разных лучах должно различаться. Поэтому по одному лучу располагают скважины с четной нумерацией, по другому — с нечетной. Расстояния от опытной (возмущающей) до соответствующей наблюдательной скважины r_n можно определять по полуэмпирической формуле Б. Г. Самсонова:

$$r_n = r_1 \cdot a^{n-1}, \quad (12.1)$$

где r_1 — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины; n — номер наблюдательной скважины; a — коэффициент, подобранный путем численного анализа и равный для безнапорных горизонтов 1,5, для напорных — 2,5.

Чтобы исключить влияние несовершенства скважин и искажение величины понижения, ближайшую скважину следует располагать на расстоянии r_1 , примерно равном мощности опробуемого горизонта — $r_1 = (0,7 \div 1) \cdot m$, а при маломощных пластах $r_1 = (1,5 \div 2) \cdot m$ (m — мощность пласта). Максимальное расстояние от возмущающей скважины до самой дальней наблюдательной скважины до 150 м для безнапорных и до 1500 м для напорных горизонтов.

Степень возмущения (или *расход при откачке*) определяется необходимостью понижения уровня в возмущающей скважине не менее чем на 3 м в безнапорных, не менее чем на 5 м в напорных водах и не менее чем на 20—30 см в наиболее удаленных наблюдательных скважинах.

Рекомендации по расходам при откачках в зависимости от водопроницаемости пород даны Б. В. Боревским и др. [12]. При опробовании песков, песчаников, трещиноватых пород, km которых 50—500 м²/сут, расходы должны составлять 5—25 л/с, при опробовании аллювиальных песков, песчано-гравийных отложений, слабо закарстованных пород при km 500—1000 м²/сут — 25—50; при опробовании галечников и закарстованных массивов с km 1000—3000 м²/сут — 50—150 л/с.

Продолжительность одиночных откачек определяется их назначением и гидрогеологическими условиями, но не должна превышать 15 сут [12]. При необходимости разглинизации скважин продолжительность откачек увеличивается.

Продолжительность опытных кустовых откачек значительно больше и определяется гидрогеологическими условиями, назначением, а также необходимостью достижения квазистационарного режима в наблюдательных скважинах в течение времени, достаточно го для построения площадных и комбинированных графиков течения уровня. Время установления квазистационарного режима в самой дальней наблюдательной скважине может быть

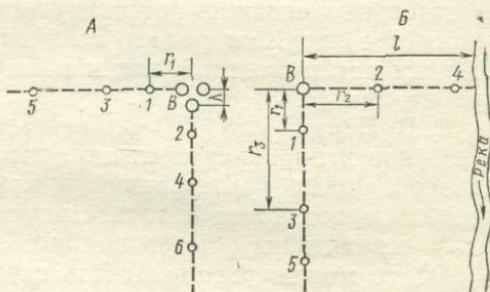


Рис. 65. Схема опытного куста: А — в неограниченном пласте, Б — в полуограниченном при связи с рекой, В — опытные (возмущающие) скважины:

1, 2, 3, 4, 5, 6 — наблюдательные скважины, λ — расстояние между опытными скважинами ($\lambda = 0,3r_1$ для безнапорных, $\lambda = 0,5r_1$ для напорных вод), l — расстояние от опытной скважины до реки (для схемы Б $r_3 < l$)

определен из соотношения

$$t_k \leq \frac{r^2}{0,4 \kappa}, \quad (12.2)$$

где r — расстояние до самой удаленной наблюдательной скважины, м; κ — коэффициент пьезо- или уровнепроводности, $\text{м}^2/\text{сут}$. Общая продолжительность откачки t определяется по формуле

$$t = t_k + t_n, \quad (12.3)$$

где t_n — представительное время, равное $5t_k$.

Для обоснования и проверки рассчитанных расстояний до наблюдательных скважин (от возмущающей), продолжительности откачки производится расчет величины понижения уровня в конце откачки как в опытной, так и в наиболее удаленной скважине по уравнениям (9.13) и (9.14).

В. В. Перцовский [38] рекомендует определенную последовательность проектирования опытных откачек. Сначала в соответствии со стадией, целью исследований и классом сооружений задаются уровнем вероятности и точностью определения водопроводимости. Если исходить из обычно принятой на практике вероятности $p = 0,95$, то можно рекомендовать следующую точность определения водопроводимости ε_s : на предварительной стадии (технический проект) 30%, на детальной стадии (рабочие чертежи) 20, по анализу эксплуатации 10%. Исходя из величины p , по табл. 17 В. В. Пер-

Таблица 17

Коэффициент линейной корреляции, p	Необходимое число измерений уровня при относительной ошибке ε_s , %				
	10	20	30	40	50
0,95	43	15	8	6	6
0,96	37	13	8	6	6
0,97	29	11	7	6	5
0,98	20	9	6	5	4
0,99	12	6	5	4	4

цовского [38] определяют минимально необходимое число точек измерений уровня воды. С учетом предельной погрешности прибора, с помощью которого измеряются уровни воды в скважинах ε_s , вычисляют расчетное понижение S_p , обеспечивающее минимально необходимую величину представительного участка на графике временного прослеживания:

$$S_p \geq \varepsilon_s \cdot n. \quad (12.4)$$

Если глубина залегания уровня подземных вод несколько десятков метров, ε_s можно принять равным 3—5 см. При построении графика $S = f(\lg t)$ должно соблюдаться требование равномерного распределения точек, поэтому к S_p прибавляют S_k , определенное из

формул. Проектный режим откачки можно выяснить на основании зависимости для квазистационарного периода фильтрации:

$$S_k + S_p = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25\kappa(t_n + t_k)}{r^2}, \quad (12.5)$$

где Q — дебит откачки, $\text{м}^3/\text{сут}$; κ — пьезопроводность, $\text{м}^2/\text{сут}$. Для грунтовых вод используется формула

$$S_k + S_p = H - \sqrt{H^2 - \frac{0,366Q}{k} \lg \frac{2,25\kappa(t_n + t_k)}{r^2}}. \quad (12.6)$$

Зависимости (12.7) и (12.8) позволяют обосновать минимальную необходимую продолжительность опытной откачки при заданном дебите. Ориентировочно продолжительность опытных кустовых откаек может быть взята в зависимости от состава пород и типа водоносного горизонта из работ [31; 41]. В зернистых породах с напорными водами продолжительность откачки 6—11 сут, в зернистых породах с безнапорными водами — 15, в трещиноватых породах с напорными и безнапорными водами — 15, при определении взаимодействия подземных вод с рекой — 10—15 сут.

Пример 1. Необходимо обосновать схему и рассчитать режим опытной кустовой откачки в напорном неограниченном пласте на детальной стадии исследований. Водоносный пласт мощностью 50 м залегает на глубине 100 м, отличается неоднородностью состава пород в разрезе и плане. Ориентировочные значения параметров: $km = 500 \text{ м}^2/\text{сут}$, $\kappa = 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$; проектный дебит откачки $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Погрешность уровнемера $\epsilon_s = 3 \text{ см}$; коэффициент корреляции $r = 0,95$.

Так как пласт неоднородный, проектируем двухлучевую схему опытного куста (см. рис. 65, Б) по три наблюдательных скважины на каждом. Ближайшую наблюдательную скважину расположим на расстоянии $r_1 = 0,7 \text{ м}$, т. е. $r_1 = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ м}$. Расстояния до остальных наблюдательных скважин рассчитаем по формуле (12.1):

$$r_2 = 35 \cdot 2,5 = 87,5 \text{ м}; \quad r_3 = 35 \cdot 2,5^2 = 219 \text{ м};$$

$$r_4 = 35 \cdot 2,5^3 = 547 \text{ м}; \quad r_5 = 35 \cdot 2,5^4 = 1360 \text{ м}.$$

Максимальное расстояние, по Б. В. Боревскому, до дальней наблюдательной скважины не должно превышать 1500 м, поэтому расчет прекращаем на скважине 5. Определяем контрольное время t_k для скважины 5 по формуле (12.2):

$$t_k = \frac{1360^2}{0,4 \cdot 10^6} = 4,6 \text{ сут.}$$

и соответствующее ему значение S_k по формуле (9.13):

$$S_k = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25\kappa t}{r^2} = \frac{0,183 \cdot 2000}{500} \lg \frac{2,25 \cdot 10^6 \cdot 4,6}{1360^2} = 0,54 \text{ м.}$$

Зная, что $p=0,95$, $\varepsilon_s=20\%$, по табл. 17 находим минимальное число точек $n=15$. Отсюда $S_p \geq 3 \cdot 15 = 45$ см. Записав полученные результаты согласно формуле (12.4), определим полную длительность откачки t_k+t_n :

$$S_k + S_p = \frac{0,183 \cdot 2000}{500} \lg \frac{2,25 \cdot 10^6 \cdot [t_k + t_n]}{1360^2}.$$

Следовательно, $t_k+t_n=19$ сут, причем наиболее информативная часть кривой прослеживания уровня наблюдается спустя $t_k=4,6$ сут.

Методика откачки. Характер понижения уровня, последовательность понижения, порядок наблюдений за уровнем, дебитом, химическим составом и другими показателями определяются целевым назначением и видом откачки, гидрогеологическими условиями и другими особенностями месторождения подземных вод.

Общие рекомендации для всех видов откачек дает П. П. Климентов [31]. Откачки необходимо проектировать с максимальным возможным (для выбранного водоподъемника) постоянным во времени водоотбором, обеспечивающим значительное снижение уровня воды как в опытной, так и в наблюдательных скважинах. При устанавлившейся фильтрации откачки следует проводить на две-три ступени понижения, причем откачуку из скважины, оборудованной сетчатым фильтром, необходимо начинать с минимального понижения, а в бесфильтровых или оборудованных перфорированными трубами скважинах с максимально возможного понижения. Максимальное понижение при опытной откачке не должно быть менее 0,3 эксплуатационного понижения. Разность между понижениями может быть от 2 до 5 м в зависимости от удельного дебита скважины. Как при эксплуатации, так и при опытных откачках максимальное понижение не должно превышать в грунтовых водах (31) $S_{\text{доп}} \approx (0,5 \div 0,6) H - \Delta h_{\text{нас}} - \Delta h_c$; в напорных водах $S_{\text{доп}} \approx H - (0,3 \div 0,5) m - \Delta h_{\text{нас}} - \Delta h_c$, где H — мощность грунтового потока или напор над водопором для напорных вод, м; $\Delta h_{\text{нас}}$ — необходимое заглубление водоприемной части насоса под уровень воды в скважине, м; Δh_c — потери напора при входе воды в скважину, предопределляемые сопротивлением фильтра и призабойной зоны.

В процессе откачки предусматриваются наблюдения за уровнями воды в скважинах, дебитом, температурой и химическим составом воды. Последовательность, частота замеров уровня должны обеспечить выявление закономерностей изменения уровней в процессе откачки во всех точках наблюдений. С учетом возможностей и целесообразности применения различных методов обработки результатов опытных работ рекомендуется проводить замеры уровня в процессе откачки в первые 2 ч через 5—10 мин, в последующие 12 ч через 0,5—1 ч и далее через 2—3 ч до конца откачки. Дебит замеряют через 0,5—1 ч в течение 14 ч и через 2—3 ч до конца откачки одновременно с замерами уровня. Замеры уровня в процессе восстановления ведутся в первые 15—20 мин через 1—2 мин, далее в течение 1—2 ч через 3—10 мин, затем через 1 ч до получения

представительных материалов. Температуру воды измеряют 2—3 раза в смену, пробу воды на различные анализы берут 1—2 раза в процессе откачки или по мере необходимости. При опытных откачках пробы должны быть отобраны в начале и конце откачки, при сложных гидрохимических условиях — в конце каждой ступени понижения; при опытно-эксплуатационных откачках — в начале, в конце и периодически в процессе откачек.

§ 2. Оборудование и приборы, применяемые при откачках

Выбор водоподъемников. Оборудование скважин, приборы, применяемые при откачках, должны обеспечить получение и регулирование дебита воды, замер уровня и температуры, отвод воды, а также удовлетворять другим требованиям. Для откачек воды из скважин применяют водоподъемники различных конструкций и видов: *лопастные* (центробежные, осевые, вихревые), *объемные* (поршневые, диафрагмовые, ротационные), *эмulsionные* (эрлифты), *водоструйные* и др. Если уровень подземных вод в скважине залегает до 7,0 м, насосы устанавливают на устье скважины, а при глубине залегания уровня воды более 7,0 м используют *глубинные насосы*. Вид насоса выбирают в зависимости от проектного дебита скважины, глубины залегания динамического уровня воды, диаметра скважины (эксплуатационного), чистоты воды, длительности откачки, наличия электроэнергии и других факторов. При залегании динамического уровня до 7,0 м используют *центробежные насосы* с горизонтальным валом типа С; К; ЭСН производительностью от 1 до 400 м³/ч. При более глубоком залегании уровня воды при откачках применяют *эрлифты*, центробежные насосы с вертикальным валом, штангово-поршневые.

Центробежные насосы (рис. 66) ЭЦНВ, АП, ЭПН, АПВН производительностью от 5 до 300 м³/ч и высотой напора от 20 до 300 м применимы для скважин диаметром от 114 до 407 мм. *Штангово-поршневые насосы* — ОМЗ, ШНД-1, ШНД-2, ШНД-3 и другие — применяют для кратковременных откачек с приводом от станков ударно-канатного бурения или от насосных качалок (НК-1, НК-2). Их производительность от 3 до 50 м³/ч. Они поднимают воду на высоту 50—150 м, могут устанавливаться в скважины диаметром 115 мм и более. Для прокачек скважины и всех видов откачек чаще всего используется *эрлифт*, сжатый воздух для которогорабатывают компрессоры ЗИФ, КС, ДК и др. Производительность эрлифтов от 50 до 150 м³/ч, высота напора до 100 м, используются они в скважинах различных диаметров при значительной глубине. Различают эрлифты с центральным расположением труб («внутри») и параллельным («рядом») (рис. 67). При высоте подъема воды от динамического уровня h до 20 м глубина погружения смесителя в воду H должна быть в 2—2,5 раза больше высоты подъема; при высоте подъема воды более 20 м — в 1,5—1,7 раза больше.

Глубина погружения смесителя под динамический уровень характеризуется коэффициентом погружения K , который равен

$$K = \frac{H}{h} (1,7 \div 2,5).$$

Рекомендуемые диаметры водоподъемных и воздухопроводных труб даны у В. В. Дубровского [47] (табл. 18).

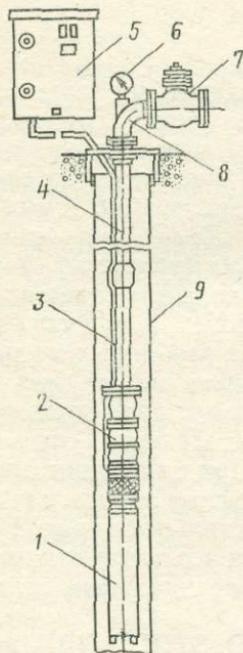


Рис. 66. Схема установки насоса (центробежного):

1 — электродвигатель, 2 — насос, 3 — токопроводящий кабель, 4 — водоподъемная труба, 5 — система автоматического управления, 6 — манометр, 7 — фланцевая задвижка, 8 — опорное кольцо, 9 — обсадная труба

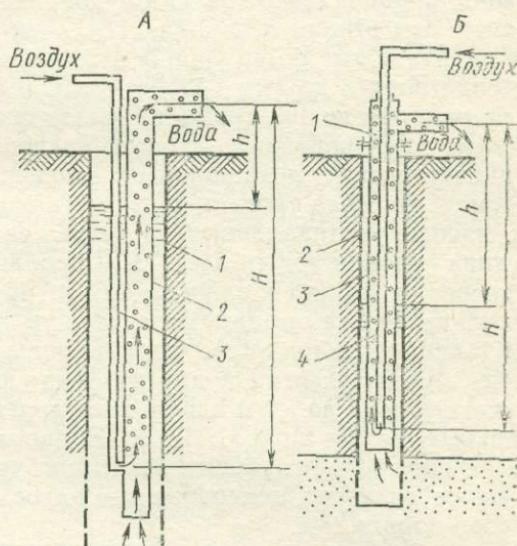


Рис. 67. Схема эрлифта:

А — с параллельным расположением труб — 1 — скважина, 2 — водоподъемные трубы, 3 — воздухоподающие трубы; Б — с центральным расположением труб: 1 — оголовок, 2 — скважина, 3 — водоподъемные трубы, 4 — воздухоподающие трубы

Более точный расчет эрлифта приведен в справочной литературе [46; 47].

Пример. Необходимо определить параметры эрлифта для откачки из скважины глубиной 100 м при глубине динамического уровня 40 м, проектном дебите 50 м³/ч, эксплуатационном диаметре скважины 168 мм.

Учитывая глубину динамического уровня 40 м и глубину скважины 100 м, выбираем оптимальный коэффициент погружения K . Для данного случая он равен 2. По таблице справочника [47] в графе $K=2$ находим динамический уровень 40 и выбираем показатели:

Таблица 18

Дебит, м ³ /ч	Высота подъема воды, м	Рекомендуемые диаметры труб, мм			
		по схеме «внутри»		по схеме «рядом»	
		водоподъемные	воздухопроводные	водоподъемные	воздухопроводные
5	10—70	40	15	32	15
10	10—70	50	20	40	20
15	10—70	60	20	60	20
20	10—70	89	25	73	20
30	10—70	114	25	89	25
50	10—70	127	32	114	25
75	10—70	146	40	127	32
100	10—70	219	50	146	40
120—200	10—70	245—273	73	219	50

глубину погружения смесителя под динамический уровень $h=40$ м, длину воздухопроводной трубы от устья скважины до смесителя $H=80$ м; длину водоподъемной трубы 83 м; рабочее давление воздуха в воздухопроводной трубе у скважины 101 324,7 Па; удельный расход воздуха на 1 м³ воды 759 935,25 Па; расход воздуха 6,3 м³/мин; расход энергии для подачи 50 м³/ч 34 кВт. Напротив графы 50 м³/ч по горизонтальной строке справа находим рекомендуемые диаметры труб для откачки эрлифтом по схеме «внутри» и «рядом». По схеме «внутри» водоподъемные трубы 5", воздухопроводные 1—1³/₄", по схеме «рядом» — 4" и 1". Выбираем схему «внутри», т. е. водоподъемные трубы 5", или 127 мм (1" = 25,4 мм), и воздухопроводные 1", или 25,5 мм. Для замера уровня воды в скважине при откачке предусматривается замерная трубка длиной 42 м и диаметром 25 мм. По справочнику [46] выбираем передвижной компрессор КС-9 производительностью (по всасываемому воздуху) 9 м³/мин. Более точный расчет эрлифта может быть произведен по формулам, приведенным в справочной литературе [8; 9; 46; 47].

Приборы, применяемые для замера уровня воды. Для замера уровня воды в скважинах при откачках используются различные уровнемеры — переносные и стационарные. К переносным относятся мерные тросы, рулетки с хлопушками, электроуровнемеры, пневматические уровнемеры. Гидрогеологические *рулетки с хлопушкой* (РС-20, Р-50) позволяют измерять уровень на глубине до 50 м, диаметр их датчика 16—40 мм, погрешность замеров 1—5 см.

Электроуровнемеры (ГГП-12б, ЭВ-1М, УЭ-50, УЭ-75, УЭ-200) предназначены для замера уровня на глубинах от 50 до 200 м, диаметр их датчиков 12—40 мм, погрешность замеров 1,5—2,0%. Действие электроуровнемеров основано на замыкании электрической цепи между опускаемым наконечником и водой, которое определяется по зажигающейся лампочке. Электроуровнемер (рис. 68) состоит из наконечника 1; электрода 2; провода 3; батарейки 4; лампочки или гальванометра 5; барабана 6; бирки на проводе 7; рейки 8 (на рисунке 9—насосные, 10—обсадные трубы, 11—шкала).

Пневматический уровнемер ПУР (рис. 69), предназначенный для небольших глубин, позволяет определять глубину залегания уровня воды X по разности между длиной измерительной трубы l и высотой столба воды в ней h , определяемой по манометру.

Для измерения уровней в скважинах в течение длительного времени могут использоваться поплавковые, барабанные, дисковые уровнемеры, но только при глубинах не более 50 м и больших диаметрах скважин.

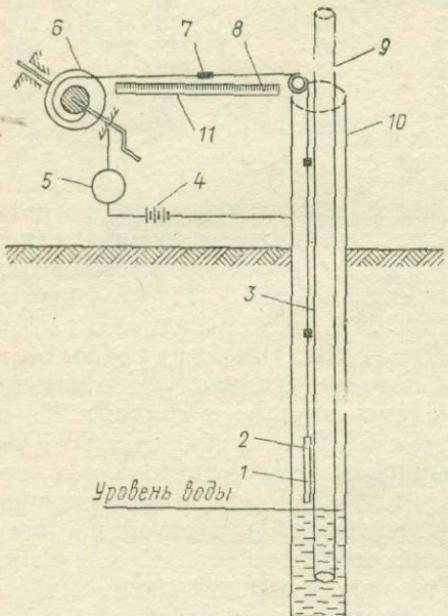


Рис. 68. Электроуровнемер конструкции Б. П. Остроумова

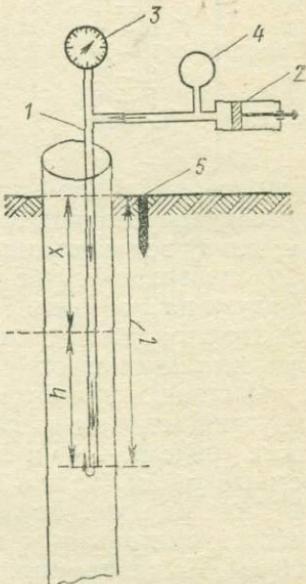


Рис. 69. Схема пневматического уровнемера (ПУР)

Регистрирующие самописцы уровня воды (УЧ, РУЦ-2, ЭКУ и др.) применяют для непрерывной регистрации изменения уровня при глубине его залегания до 400 м, диаметр их датчиков 40—70 мм, погрешность замеров до 3 см. Измерения уровня при откачке необходимы для последующих определений гидрогеологических параметров водоносных горизонтов, поэтому точность измерений должна быть предусмотрена методикой проведения опытных работ. При выборе прибора для замера уровня учитывают пространство между обсадной и водоподъемными трубами, глубину и диапазон колебаний уровня, длительность откачки, тип водоподъемника. Выбор прибора для замера уровня (с наименьшей погрешностью замера) влияет на расчет параметров.

Способы замера дебита и температуры воды. При выборе метода и прибора для замера дебита воды при откачках учитывают проектный дебит, диапазон его изменения, неравномерность (пульсация)

подачи воды, длительность откачки, наличие электроэнергии, чистоту воды и другие особенности. Правильный выбор метода и прибора для замера дебита уменьшает процент погрешности при замерах, следовательно, увеличивает точность при расчетах гидрогеологических параметров.

При кратковременных откачках воды с взвешенными частицами и дебите до 10 м/с рекомендуется *объемный способ*. Определив время заполнения емкости водой t и объем емкости V , определяют дебит (л/с) по формуле $Q = V/t$. Расход воды измеряют не менее 3 раз, причем разница в замерах времени наполнения сосуда не должна превышать 2%. Объем сосуда выбирают из расчета, что время его заполнения не менее 20—60 с.

Пример. Рассчитать объем сосуда, если проектный дебит скважины при откачках 36 м³/ч.

Объем сосуда должен быть $36,0 : 60 = 0,6 \text{ м}^3$ (600 л). При замерах расходов воды от 5 до 50 л/с и более могут быть использованы водосливы с незатопленной стенкой различного сечения. Трапециoidalные водосливы применяют при расходах 30—50 л/с, расчет дебита (л/с) ведут по формуле $Q = 0,0186 hb\sqrt{h}$. Прямоугольные и треугольные водосливы применимы при расходах менее 30 л/с, и расчет соответственно ведется по формулам: $Q = 0,018 bh\sqrt{h}$; $Q = -0,014 h^2\sqrt{h}$, где h — высота перелива воды через порог, определяемая по рейке в 0,5—1 м перед водосливом, b — ширина порога водослива.

При длительных откачках чистой воды с малыми изменениями расхода используются *турбинные* и *крыльчатые счетчики-водомеры* типа ВВ, ВК, УВТ, которые монтируются на горизонтальном прямолинейном участке трубопровода длиной 8—10 d перед прибором и 6—8 d за прибором (d — диаметр трубопровода, равный 40—300 мм). Рассчитаны они на расходы от 0,25 до 600 м³/ч, погрешность замеров 2—5%. При длительных откачках из скважин насосами, обеспечивающими равномерную подачу воды, применяют для замера расхода воды *концевые диафрагмы* с пьезометрической трубкой (рис. 70). Диафрагма 1 с круглым отверстием закреплена кольцом 2 на конце сливной трубы 3. На расстоянии 600 мм от

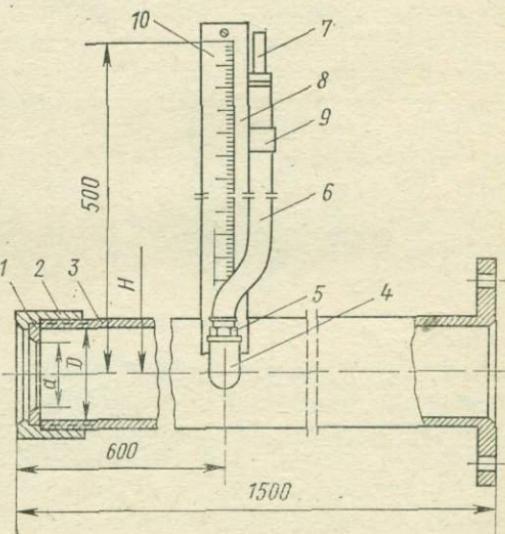


Рис. 70. Сливная труба с концевой диафрагмой

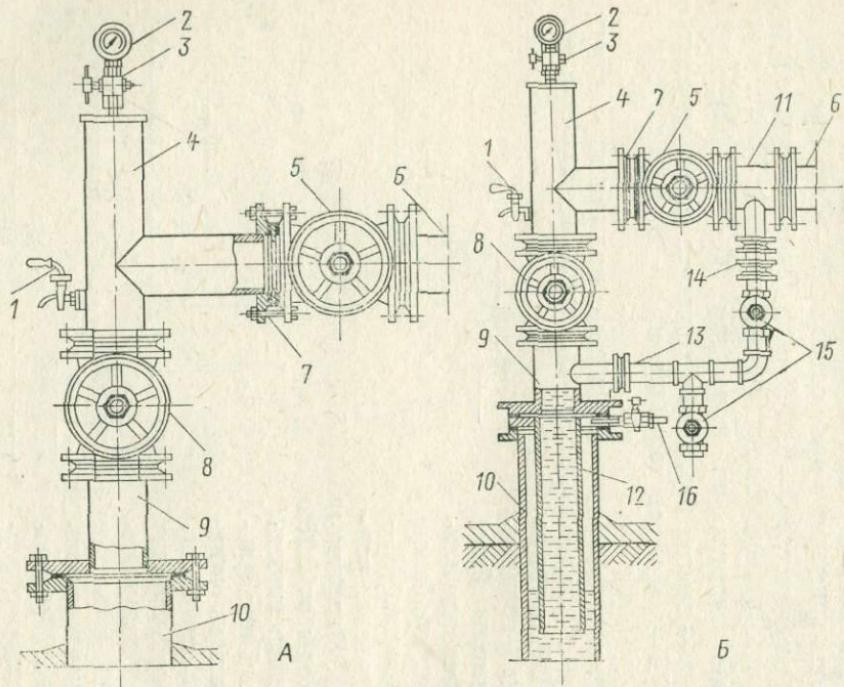


Рис. 71. Типы оголовков самоизливающихся скважин: А — непесчаных; Б — песчаных:

1 — пробнопусковой кран, 2 — манометр, 3 — трехходовой кран, 4 — отвод, 5 — эксплуатационная задвижка, 6 — трубопровод, 7 — диафрагма, 8 — ремонтная задвижка, 9 — переход, 10 — устье, 11 — патрубок с отводом, 12 — колонна труб, 13 — дополнительный отвод, 14 — диафрагма дополнительного отвода, 15 — вентили, 16 — вентиль воздушный

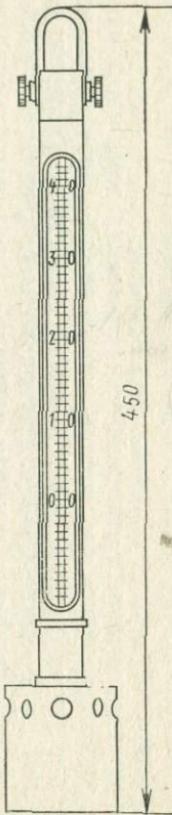


Рис. 72. Родниковый термометр

конца трубы приварен уголник 4, в который ввинчен штуцер 5 с резиновой трубкой 6, имеющей на конце стеклянную трубку 7. Рядом приварена стойка 8 с держателем 9 резиновой трубы и линейки 10.

Расход воды определяют по формуле $Q = 12528 md^2 \sqrt{H}$, где d — диаметр диафрагмы, м; H — высота напора в трубе, замеренная по трубке 7, м; m — коэффициент расхода диафрагмы, соответствующий отношению d/D (D — диаметр сливной трубы в метрах берется по справочнику [48]). Если уровень воды в стеклянной трубке опустится ниже верха сливной трубы на 30 мм, установленную диафрагму заменяют другой, меньшего диаметра.

Расход самоизливающихся скважин ориентировочно можно определить по формуле $Q = 11d^2 \sqrt{f}$, где Q — расход скважины, $\text{м}^3/\text{ч}$, d — внутренний диаметр трубы, из которой происходит самоизлив, дм; f — высота напора над верхним обрезом трубы, дм. Ошибка в определении расхода при высоте фонтана до 5 м не превышает 2 %. Для самоизливающихся скважин с большой высотой напора применяют оголовки для проведения пробных и опытных выпусков и эксплуатации (рис. 71).

Для дистанционного наблюдения за расходом и уровнем воды во время откачки на расстоянии до 150 м применяют *электромагнитные дебитометры*, позволяющие измерять расходы до 150 $\text{м}^3/\text{ч}$, понижение уровня на глубине до 20 м. Показания их не зависят от параметров откачиваемой воды, температуры воздуха и других факторов.

В состав стандартного геофизического оборудования входят *скважинные расходомеры* (ТСР, ДАУ, СТД и др.), которые позволяют получить информацию о направлении, скорости движения потока, его расходе в пластах, вскрытых скважиной. Применяются они в обсаженных и необсаженных фильтрами скважинах диаметром не менее 80 мм и при глубинах до 1000 м. Погрешность измерения до 5 % [7, 31].

Температура воды при откачках измеряется родниковыми термометрами в струе воды, выходящей из насоса (рис. 72). При наблюдениях за температурой до откачек или в наблюдательных скважинах используют термометры-хлопушки, ленивые и электрические термометры ЭТО, ЭСО, ЭТС.

§ 3. Документация опытных откачек

При проведении опытных работ особое внимание уделяется изучению закономерностей и особенностей поведения уровней и дебитов скважин, точность их замеров влияет на достоверность определения гидрогеологических параметров. Обычно в начальный период опытных работ наблюдается неустановившаяся фильтрация, характеризующаяся резкими колебаниями уровня и дебита. При установившемся дебите развивается квазиустановившийся режим с небольшими изменениями уровня воды в скважинах. Реже возникает установившийся режим при постоянных уровне и дебите.

В период опытных работ ведут журнал откачки (налива) (см. форму), в котором отмечают время замеров, дебит, положение уровней в скважинах и др.

Дата	Время, с	Глубина погружения приемного клапана от устья скв., м	Емкость сосуда при измерении дебита воды, м³	Время наполнения измерительного сосуда, ч	Дебит, м³/ч	Статический уровень, м	Динамический уровень, м	Понижение от статического уровня в центральной скв., м	Понижение в скв. №, м	Понижение в скв. №, м	Примечание

Параллельно с ведением журнала опыта строится хронологический график зависимости дебита и уровня воды в скважинах от времени (рис. 73), который обеспечивает надежный контроль за

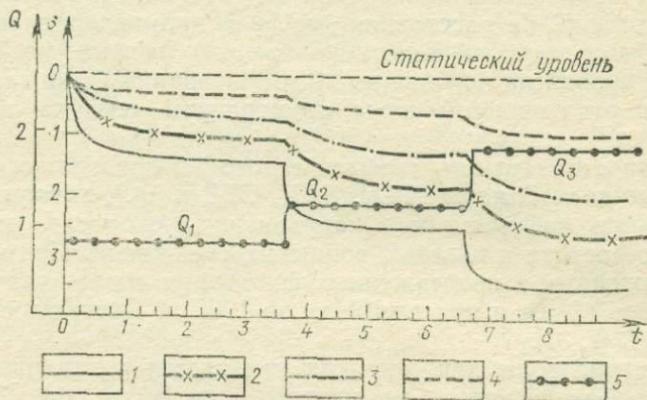


Рис. 73. График зависимости расхода и понижения от времени. Кривые изменения понижения в скважинах:

1 — центральной, 2 — первой, 3 — второй, 4 — третьей наблюдательных, 5 — кривые изменения дебита (Q_1 — при первом, Q_2 — при втором; Q_3 — при третьем понижениях S)

правильностью ведения опыта, служит основой регулирования частоты и системы наблюдений и дает основание для своевременного прекращения откачки. Хронологический график составляется в удобном для каждого случая масштабе, дебит обычно берется в литрах в секунду, понижение — в метрах и продолжительность опыта — в часах. При больших значениях понижений уровня, дебита построение графика можно начинать с условного нуля.

При установившемся режиме фильтрации, чтобы построить график зависимости дебита от понижения $Q=f(S)$ (рис. 74), отка-

ка проводится минимум с двумя понижениями. Кривая дебита позволяет судить о дебите скважины при разных понижениях уровня, о влиянии на условия работы скважины всех факторов в призабойной зоне и в самой скважине. Экстраполирование кривой для определения понижения в скважине при запроектированном дебите используется в гидравлическом методе оценки эксплуатационных запасов. Как правило, в реальных условиях вследствие влияния разных факторов кривая дебита отклоняется от теоретической формы (рис. 74) и может выражаться параболической, степенной и логарифмической зависимостями. Н. Н. Биндерман рекомендует использовать при расчетах параболическую зависимость:

$$Q = aQ + bQ^2. \quad (12.7)$$

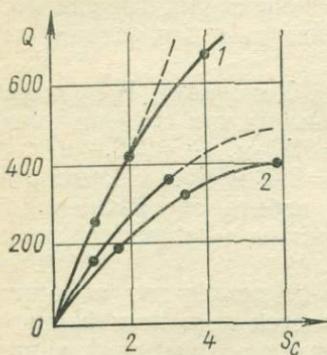


Рис. 74. Кривые дебита скважин:

1 — в изпорных водах (пунктир — теоретическая, сплошная — опытная), 2 — то же, в грунтовых водах

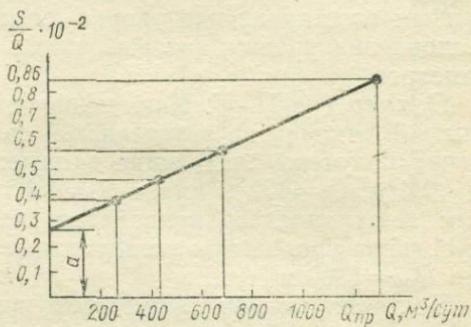


Рис. 75. График зависимости удельного понижения от дебита

В расчетах по этой формуле отклонения в прогнозируемых дебитах по сравнению с другими зависимостями не превышают 10% в сторону снижения дебита.

М. Е. Альтовский предложил удобный графо-аналитический метод построения кривой дебита. Разделив обе части уравнения (12.7) на \$Q\$, он получил уравнение прямой

$$\frac{S}{Q} = a + bQ. \quad (12.8)$$

По данным откачки, при двух дебитах вычисляются отношения \$S/Q\$ и строится график (рис. 75), по оси ординат которого откладываются значения \$S/Q\$, по оси абсцисс — значения \$Q\$. Через полученные точки проводится прямая, начальная ордината которой выражает параметр \$a\$, а тангенс угла \$\beta\$ равен значению параметра \$b\$. Параметр \$a\$ выражает как бы «долю» участия ламинарного движения, параметр \$b\$ — турбулентного движения в общем расходе воды при откачке. Для определения понижения при проектном де-

бите достаточно продолжить прямую до точки, соответствующей этому дебиту, найти значение S_3/Q_3 по шкале ординат и затем вычислить S_3 . Считается допустимым прогнозировать дебиты, экстраполируя кривую дебита в пределах от 1,5 до 3 S_{\max} (где S_{\max} — максимальная величина понижения уровня, полученная в процессе откачки).

При одиночных опытных откачках в условиях неустановившейся фильтрации строятся графики *временного прослеживания* $S=f(\lg t)$ для напорных вод и $S=(2H-S)=f(\lg t)$ для безнапорных вод.

При кустовых опытных откачках строят также графики площадного $S=f(\lg r)$ и комбинированного прослеживания $S=f(\lg r^2/t)$, сущность которых и использование описаны в гл. 9. По данным восстановления уровня после откачки строят график восстановления уровня, который также используется для расчета параметров.

Пример (по П. П. Климентову и В. М. Кононову). В процессе опытной откачки из артезианской скважины на три ступени понижения получены следующие данные: $S_1=0,97$ м, $Q_1=259,2$ м³/сут, $S_2=2,0$ м, $Q_2=432$ м³/сут и $S_3=4,0$ м, $Q_3=692$ м³/сут. Необходимо установить характер кривой зависимости дебита от понижения и понижение уровня при эксплуатации скважины с проектным дебитом $Q_{\text{пр}}=1300$ м³/сут.

Построив график зависимости дебита от понижения по опытным данным, убеждаемся, что он не является прямолинейным, а соответствует уравнению (12.9). Представление опытных данных в координатах $S/Q-Q$ свидетельствует о том, что характер кривой $Q=f(S)$ отвечает тому же уравнению, поскольку все три точки, отвечающие опытным данным, лежат на одной прямой (рис. 75). С графика снимаем значение $S_{\text{пр}}/Q_{\text{пр}}$, соответствующее величине проектного дебита $Q_{\text{пр}}=1300$ м³/сут и равное 0,0086. Из $S_{\text{пр}}/Q_{\text{пр}}=0,0086$ находим $S_{\text{пр}}=0,0086 \times 1300=11,18$ м. Такая же величина понижения уровня должна получиться и аналитически по зависимости (12.10). По графику определяем значение $a=0,25 \times 10^{-2}$ и значение b по любым двум точкам, например начальной и конечной. Тогда

$$b = \frac{\left(\frac{S}{Q}\right)_2 - \left(\frac{S}{Q}\right)_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{0,0086 - 0,0025}{1300} = 0,47 \times 10^{-5}.$$

По формуле (12.5) найдем

$$S_{\text{pac}} = 0,25 \times 10^{-2} \times 1300 + 0,47 \times 10^{-6} \times 1300^2 = 11,18 \text{ м.}$$

§ 4. Опытные наливы в шурфы

Опытные наливы в шурфы используют для определения фильтрационных свойств связных и рыхлых пород зоны аэрации. Они широко применяются при исследованиях для мелиораций, гидро-

технического строительства и др. Эти полевые работы обеспечивают изучение фильтрационных свойств пород на глубину до 5 м и при залегании грунтовых вод на глубине не менее 3—4 м от дна шурфа. Различают способы инфильтрации воды из шурфов по А. К. Болдыреву, Н. С. Нестерову, Н. К. Гиринскому, Н. Н. Биндерману. В их основу положен расчет по формулам установившейся фильтрации (кроме способа Н. Н. Биндермана).

Способ А. К. Болдырева (рис. 76) применяют для изучения коэффициента фильтрации k песков и трещиноватых пород. В дне шурфа, пройденного до заданной глубины, выкапывают зумпф, в котором устанавливается рейка. Из баков по трубке подается вода

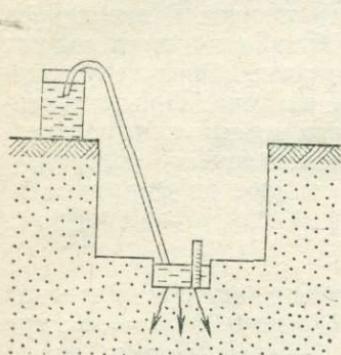


Рис. 76. Схема опыта при наливе по способу А. К. Болдырева

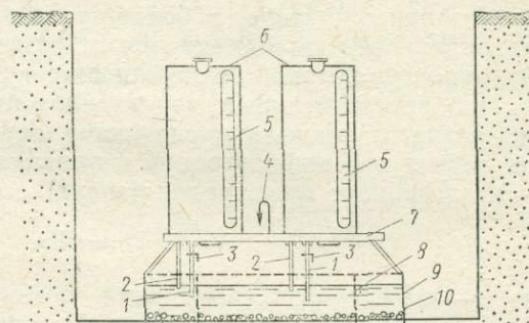


Рис. 77. Схема опытного налива по методу Н. С. Нестерова:

1 — водосливные трубы, 2 — воздушные трубы, 3 — краны, 4 — указатель равновесия (отвес), 5 — шкала, 6 — сосуды Марriotta, 7 — мостик, 8 — внутренний цилиндр, 9 — внешний цилиндр, 10 — гравий

в зумпф с интенсивностью, обеспечивающей постоянный слой воды высотой около 10 см. Скорость фильтрации (см/мин) через дно зумпфа определяется по формуле $V = Q/F$, где Q — установившийся расход, $\text{см}^3/\text{мин}$; F — площадь поперечного сечения зумпфа, см^2 . По формуле $Q = kFI$, $I = 1$ (при опыте) $k = \frac{Q}{F}$.

Способ Н. С. Нестерова (рис. 77) применим для слабопроницаемых пород (супесей, суглинков). Используемое в работе внешнее кольцо уменьшает потери воды на боковое растекание при фильтрации воды через внутреннее кольцо. Для проведения опыта в дно шурфа вдавливаются (концентрически) два цилиндра, в которые заливается вода высотой 9—10 см и этот уровень поддерживается в течение опыта сосудами Мариотта. Расход измеряют через каждые 10 мин, опыт ведут до стабилизации расхода через внутреннее кольцо. Расчет ведут по формуле (см/мин)

$$k = \frac{Ql}{F(H_k + Z + l)}, \quad (12.9)$$

где Q — установившийся расход воды, см³/мин; l — глубина просачивания воды за время опыта, м; H_k равно 0,5 максимальной высоты капиллярного поднятия, м; Z — высота слоя воды в цилиндре, см.

Для определения глубины просачивания бурят две скважины: одну на расстоянии 3—4 м от шурфа, другую — в центре внутреннего кольца по окончании опыта. Глубина скважин 3—4 м от дна шурфа. При бурении отбирают образцы грунта через 0,25 м на определение влажности, по данным которой определяется глубина просачивания. К недостаткам опыта относятся приближенный учет капиллярного растекания и длительность проведения опыта.

Способ Н. К. Гиринского применим в связных и рыхлых породах. Он менее длителен и более прост в исполнении. В дно шурфа вдавливают цилиндр диаметром от 30 до 50 см, в цилиндр подают воду, уровень которой поддерживает постоянным. Опыт ведут аналогично вышеописанным до стабилизации расхода. При дальнейших расчетах учитывают силу капиллярного всасывания, растекание потока при инфильтрации и влияние защемленного воздуха.

Коэффициент фильтрации (м/сут) определяют по формуле

$$k = a \zeta Q, \quad (12.10)$$

где a — коэффициент, зависящий от глубины вдавливания кольца в породы l_0 и диаметра кольца d (при l_0/d до 0,03 $a=1,06$; при $l_0/d=0,04$ $a=1,08$; при $l_0/d=0,05$ $a=1,1$); ζ — коэффициент, значение которого зависит от значения H_k+Z и диаметра кольца. Ниже приводятся значения ζ для кольца диаметром 50 см:

H_k+Z , м	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65
ξ	0,63	0,66	0,70	0,73	0,77	0,82	0,87	0,93
H_k+Z , м	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
ξ	1,00	1,07	1,16	1,27	1,38	1,53	1,72	1,94
H_k+Z , м	0,20	0,15	0,10					
ξ	2,25	2,65	3,25					

Значения капиллярного поднятия H_k :

Наименование грунта	Высота капиллярного поднятия H_k , м
---------------------	---

Суглинок тяжелый	2,00
Суглинок легкий	1,60
Супесь тяжелая	1,20
Супесь легкая	0,80
Песок мелкозернистый, глинистый	0,60
Песок мелкозернистый, чистый	0,40
Песок среднезернистый	0,20
Песок крупнозернистый	0,10

Способ Н. Н. Биндермана применим для обработки результатов опыта по способу Н. С. Нестерова. Для этого используют формулы неустановившейся фильтрации. Коэффициент фильтрации рас-

считывают по формуле

$$k = \frac{\beta V}{F \cdot t}, \quad (12.11)$$

где V — объем воды, израсходованной за время t от начала опыта; β — коэффициент, значение которого зависит от l/Z и определяется выражением

$$\beta = 1 - \frac{Z + H_k}{l} \ln \left(1 + \frac{l}{Z + H_k} \right). \quad (12.12)$$

Способ Н. Н. Биндермана не требует длительного времени на проведение опыта, более прост и дает достаточно точные результаты. Позволяет определять не только коэффициент фильтрации, капиллярное давление H_k , но и недостаток насыщения μ_0 . Для этого по графику [30, 163] $\frac{l}{Z + H_k} = f \left(\frac{t}{t_1} \right)$ находят значение $\frac{l}{Z + H_k}$, по которому, зная глубину просачивания l , определяют H_k .

Недостаток насыщения μ_0 определяют по формуле

$$\mu_0 = \frac{|V|}{F \cdot l}. \quad (12.13)$$

Детальное изложение методики проведения опытных наливов, нагнетаний в скважины, экспресс-откачек, экспресс-наливов в скважины и шурфы и обработки данных приведены в работе [31].

Задача 23. Вычислить коэффициент фильтрации суглинка по данным опыта по способу Н. С. Нестерова. Во время опыта вода в кольцах поддерживалась на высоте $z=10$ см, диаметр внутреннего кольца $d=25$ см, глубина просачивания по данным бурения скважин $l=200$ см. Остальные данные приведены в журнале опыта (табл. 19).

Таблица 19

время наблюдений	Данные наблюдений		Данные обработки	
	количество профиль- тровавшейся воды, см ³	время фильт- рации, мин	расход Q , см ³ /мин	время, прошедшее от начала опыта, t , мин
10	3 500	60	58,3	60
11	2 300	60	38,3	120
12	2 100	60	35,3	180
13	2 000	60	33,3	240
14	1 950	60	32,5	300
15	1 900	60	31,6	360
16	1 800	60	30,0	420
17	1 800	60	30,0	480
18	1 790	60	29,8	540
19	1 800	60	30,0	600
20	3 500	1200	30,0	720
	24 440			

По данным колонок 4 и 5 строим график (рис. 78), по которому определяем установившийся расход $Q_{уст}=30,0 \text{ см}^3/\text{мин}$. Расчет коэффициента фильтрации ведем по формуле (12.11):

$$k = \frac{Qt}{F(l+z+H_k)}.$$

Определим площадь поперечного сечения внутреннего кольца по формуле $F = \frac{\pi \cdot 14 \cdot 625}{4} = 490,6 \text{ см}^2$. Находим капиллярное давление H_k , которое для суглинка легкого равно 80 см. Подставляем

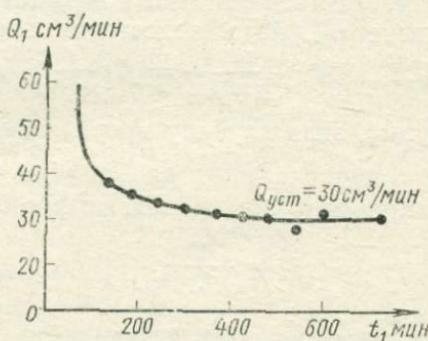


Рис. 78. График зависимости расхода от времени (метод Н. С. Нестерова)

найденные данные в формулу (12.11):

$$k = \frac{30 \cdot 200}{490,6(200 + 10 + 80)} = 0,042 \text{ см}/\text{мин} = 0,60 \text{ м}/\text{сут.}$$

Используя данные опыта, рассчитаем коэффициент фильтрации по способу Н. Н. Биндермана по формуле (12.13):

$$k = \frac{\beta V}{Ft},$$

где V — объем воды, израсходованный за время $t=720$ мин от начала опыта и равный 24440 см^3 , β — коэффициент, определяемый по формуле (12.14):

$$\beta = 1 - \frac{z + H_k}{l} \ln \left(1 + \frac{l}{z + H_k} \right) = 1 - \frac{10 + 80}{200} \ln \left(1 + \frac{200}{10 + 80} \right) = 0,64;$$

$$k = \frac{0,6 \cdot 24440}{490,6 \cdot 720} = 0,041 \text{ см}/\text{мин} = 0,59 \text{ м}/\text{сут.}$$

Полученное значение k мало отличается от значения k , полученного по формуле (12.11). Определение недостатка насыщения по ведем по формуле (12.15):

$$\mu_0 = \frac{V}{F \cdot l} = \frac{24\,440}{490,6 \cdot 200} = 0,24.$$

ГЛАВА 13. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Подземные воды используются в народном хозяйстве для хозяйствственно-питьевого и производственного водоснабжения, орошения и обводнения, энергетических целей и теплофикации, лечебных целей, в качестве столовых минеральных вод и как сырье для извлечения ценных компонентов. Особенно острым является вопрос обеспечения водой населения для хозяйствственно-питьевых нужд. Потребность в воде для водоснабжения вновь создаваемых и расширяющихся городов, промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов в нашей стране непрерывно возрастает.

Подземные воды имеют определенные преимущества перед поверхностными: распространены почти повсеместно, имеют высокое качество, менее подвержены опасности радиоактивного, химического и бактериологического загрязнения. В силу этого они предназначены прежде всего для удовлетворения питьевых и бытовых нужд населения. Доля подземных вод в обеспечении хозяйствственно-питьевого водоснабжения уже сейчас превышает 50% [31].

Для хозяйствственно-питьевого водоснабжения используются пресные воды, требования к их качеству регламентируются ГОСТ 2874—73.

Проект использования подземных вод для водоснабжения по каждому объекту согласуется с органами санитарно-эпидемиологической службы и органами по использованию и охране водных ресурсов на территории СССР.

Сооружения для забора подземных вод должны надежно обеспечивать прием (захват) потребного количества подземных вод и подачу воды в водоводы. Тип и схему размещения водозаборных сооружений следует выбирать с учетом геологических и гидрогеологических условий на основе технико-экономического расчета. Характеристика типов водозаборов приведена в гл. 9.

§ 1. Определение потребности в воде и количества скважин водозабора для различных объектов

Для расчета количества скважин водозабора необходимо располагать данными о проектных эксплуатационных дебитах скважин и потребности в воде для объекта. Проектные эксплуатационные дебиты скважин выбираются на основании опыта эксплуатации скважин в районе разведки с учетом возможной экстраполяции понижений.

Заявки на потребное количество воды для водоснабжения того или иного объекта составляются управлением коммунального хозяйства при областных, городских или поселковых Советах народных депутатов или рассчитываются проектными организациями (Гипроводхозами, Водоканалпроектами и др.). Количество воды рассчитывается по нормам хозяйствственно-питьевого водопотребления на одного жителя, нормам расхода воды для жилых и общественных зданий, расхода воды на поливку зеленых насаждений и на наружное пожаротушение.

Вышеуказанные нормы в виде таблиц приведены в справочнике гидрогеолога [46].

Количество скважин будущего водозабора определяется делением заявленной потребности в воде на эксплуатационный дебит одной скважины по формуле

$$n = \frac{Q_{\text{потреб}}}{Q_s} . \quad (13.1)$$

Система расположения скважин группового водозабора выбирается в зависимости от граничных условий водоносного пласта в плане. Чаще всего устраивают линейные, площадные и кольцевые водозаборы. Расстояния между скважинами в водозаборе зависят от изменчивости литологического состава и фильтрационных свойств водовмещающих пород, гидравлического режима водоносного горизонта, условий восполнения эксплуатационных запасов и в каждом конкретном случае должны обосновываться гидрогеологическими расчетами.

Для каждого варианта при принятых количестве водозахватных сооружений и расстояниях между ними гидрогеологическими расчетами устанавливается возможность получения нужного количества воды Q при понижениях уровня S , не выходящих за предель максимально допустимых понижений $S_{\text{доп}}$. Должно выдерживаться условие $S \leq S_{\text{доп}}$. $S_{\text{доп}}$ принимается равной 60—80% от мощности водоносного пласта для безнапорных горизонтов и высоте напора над кровлей водоносного горизонта при эксплуатации напорных пластов [3].

Пример 1. Рассчитаем потребное количество воды для поселка в $\text{м}^3/\text{сут}$ при следующих условиях.

1. Число жителей к 1990 г. предполагается 10 000.

2. Поселок будет застроен домами со всеми коммунальными удобствами — водопровод, канализация и централизованное горячее водоснабжение.

3. В поселке разместятся: а) гостиница с ваннами в отдельных номерах — на 200 человек; б) поликлиника на 20 посетителей одновременно; в) детские сады — 3 по 450 человек; г) столовая на 100 обедающих одновременно; д) баня на 200 посетителей; е) школа на 2000 учащихся; ж) кинотеатр на 700 зрителей по 3 сеанса в день.

4. Площадь, занятая поселком, примерно $1,5 \text{ км}^2$ (1500000 м^2), причем площадь, занятая зелеными насаждениями, равна примерно 70% от общей площади.

Решение: 1. Определяем количество воды для жителей поселка [46, с. 451] с учетом коэффициента часовой неравномерности, равным 1,25. $0,200 \text{ м}^3/\text{сут} \times 1000 \times 1,25 = 2500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

2. Для общественных зданий [46, с. 452]: а) гостиница: $0,200 \text{ м}^3/\text{сут} \times 200 \times 1,7 = 68 \text{ м}^3/\text{сут}$; б) поликлиника: $0,015 \times 20 \times 1,0 = 0,30 \text{ м}^3$; с учетом пропускной способности поликлиники — 200 человек за рабочий день:

$$\frac{200 \text{ чел.}}{20 \text{ чел.}} \times 0,3 = 3 \text{ м}^3/\text{сут};$$

в) детские сады: $0,100 \text{ м}^3/\text{сут} \times 1350 \times 3,0 = 405 \text{ м}^3/\text{сут}$; г) столовая (пропускная способность за рабочий день 700 человек): $0,020 \text{ м}^3/\text{сут} \times 700 \times 1,5 = 21 \text{ м}^3/\text{сут}$; д) баня: $0,150 \times 200 = 30 \text{ м}^3/\text{сут}$; е) школа: $0,020 \times 2000 \times 2 = 80 \text{ м}^3/\text{сут}$; ж) кинотеатр: $0,005 \times 700 \times 3 \times 2 = 21 \text{ м}^3/\text{сут}$.

3. На поливку зеленых насаждений [46, с. 452], улиц, проездов: $0,001 \times 1\ 500\ 000 \times 0,7 = 10\ 500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

4. На наружное пожаротушение из расчета [46, с. 453] застройки многоэтажными домами, возникновения одного очага пожара одновременно и времени пожаротушения — 3 ч: $0,015 \text{ м}^3/\text{сут} \times 3600 \times 3 = 162 \text{ м}^3/\text{сут}$.

5. Общая потребность в воде составляет $2500 + 68 + 3 + 405 + 21 + 30 + 80 + 21 + 10\ 500 + 162 = 13\ 790 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Пример 2. Рассчитаем количество скважин водозабора при заявленной потребности в воде 10 000 м³/сут. Заявленную потребность намечено удовлетворить за счет эксплуатации подземных вод нижнесарматского водоносного комплекса. Дебит скважин, опробованных на стадии предварительных исследований, в среднем 8 л/с при понижении на 5 м. Водоносный комплекс напорный, высота напора 30 м.

Решение: 1. Учитывая возможность экстраполяции фактически полученного понижения в пределах 2—3 S_{\max} , достигнутого при откачках [13], определяем эксплуатационное понижение: $S_e = 5 \text{ м} \times 3 = 15 \text{ м}$.

2. Проектный эксплуатационный дебит, соответствующий эксплуатационному понижению, равен $8 \text{ л}/\text{с} \times 3 = 24 \text{ л}/\text{с}$.

3. Количество скважин водозабора определяем по формуле (13.1):

$$n = \frac{Q_{\text{потреб}}}{Q_e} = \frac{10\ 000}{86,4 \cdot 24} = 5 \text{ скв.}$$

§ 2. Эксплуатационные запасы и методы их оценки

Разведка подземных вод должна проводиться в тесной связи с методикой оценки эксплуатационных запасов.

Под эксплуатационными запасами понимается количество воды в кубических метрах в сутки, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и при качестве

воды, удовлетворяющем требованиям в течение всего расчетного срока водопотребления (25 лет или 10 000 сут). Оцениваются эксплуатационные запасы месторождений подземных вод, их отдельных участков, а также крупных гидрогеологических районов.

Под *месторождением подземных вод* подразумевается такая часть площади распространения водоносных горизонтов или комплексов, в пределах которой под влиянием естественных или искусственных факторов создаются благоприятные условия (по сравнению с окружающими площадями) для отбора подземных вод в количестве, достаточном для целесообразного их использования в народном хозяйстве.

Эксплуатационные запасы подземных вод могут обеспечиваться: 1) естественными запасами оцениваемого горизонта; 2) естественными ресурсами оцениваемого горизонта; 3) привлекаемыми ресурсами, формирующимися в процессе эксплуатации за счет перетекания подземных вод из других водоносных горизонтов и поверхностных водоемов; 4) искусственными запасами и ресурсами подземных вод, формирующимися при гидротехническом строительстве, орошении земель и искусственном восполнении подземных вод.

Под *естественными (емкостными) запасами* понимается объем гравитационной воды в порах, трещинах и карстовых пустотах водовмещающих пород. В естественных запасах безнапорных водоносных горизонтов выделяют объем гравитационной воды, находящейся в водовмещающих породах в зоне колебаний уровня. Его называют *регулировочным запасом*.

В напорных пластах к естественным запасам относятся также так называемые *упругие запасы* — объем воды, который может быть высвобожден из пласта при понижении в нем пластового давления. Эта часть запасов имеет весьма существенное значение в высоконапорных водоносных горизонтах.

Под *естественными ресурсами* понимается объем воды, идущий на питание водоносного горизонта в ненарушенных условиях. Естественные ресурсы равны сумме всех приходных элементов баланса данного горизонта (инфилтрация атмосферных осадков, фильтрация из рек и водоемов, перетекание из смежных горизонтов и др.). Они могут быть определены также по расходу подземного потока или по сумме расходных элементов баланса (испарение, родниковый сток, фильтрация в реки).

Если эксплуатационные запасы подземных вод полностью обеспечиваются в течение всего срока эксплуатации возобновляемыми источниками формирования (питания), эксплуатация водозаборов происходит при установленвшемся режиме фильтрации. В противном случае наблюдается неустановившийся режим фильтрации.

Эксплуатационные запасы подземных вод по их народнохозяйственному значению разделяют на две группы: *балансовые запасы*, использование которых экономически целесообразно и которые должны удовлетворять кондициям, т. е. требованиям к качеству вод для данного назначения и заданным условиям режима экс-

плуатации, и забалансовые запасы, использование которых в настоящее время экономически нецелесообразно (вследствие малого количества, несоответствия качества заданному назначению, особо сложных условий эксплуатации или технологии извлечения ценных компонентов), но они могут рассматриваться как объект использования в будущем.

Эксплуатационные запасы подземных вод подразделяются в зависимости от степени разведанности месторождений, изученности качества вод и условий эксплуатации на четыре категории: *A*, *B*, *C₁* и *C₂*. Подробная характеристика категорий запасов дана в инструкции по применению эксплуатационных запасов подземных вод [25].

По геолого-гидрогеологическим условиям, определяющим методику проведения разведочных работ и подсчета эксплуатационных запасов, месторождения подземных вод могут быть разделены на основные типы [25]:

- месторождения в речных долинах;
- месторождения в артезианских бассейнах;
- месторождения в конусах выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин;
- месторождения в ограниченных по площади структурах или массивах трещинных и трещинно-карстовых пород и в зонах тектонических нарушений;
- месторождения в песчаных массивах пустынь и полупустынь;
- месторождения в надморенных и межморенных водно-ледниковых отложениях;
- месторождения в области развития многолетнемерзлых пород.

Из всех типов наиболее широко развиты и имеют наибольшее промышленное значение месторождения в речных долинах и артезианских бассейнах. Они составляют более 60% от общего числа разведанных месторождений.

По степени неоднородности фильтрационных свойств водовмещающих пород водоносные горизонты и комплексы могут быть разделены на условно однородные, неоднородные и весьма неоднородные. Для предварительной характеристики степени неоднородности пласта могут быть использованы данные по удельным дебитам скважин. В условно однородных пластах максимальные и минимальные дебиты однотипно оборудованных скважин различаются не более чем в 5 раз, в неоднородных — в 5—10 раз и в весьма неоднородных — более чем в 10 раз.

Для выработки общих принципов разведочных работ и оценки эксплуатационных запасов в зависимости от сложности гидрогеологических условий все месторождения подземных вод могут быть подразделены на три обобщенные группы [25].

Группа I. Месторождения с простыми гидрогеологическими условиями. Подземные воды приурочены к спокойно залегающим коллекторам выдержанной мощности, представленным однородными (пористыми и равномерно трещиноватыми) породами.

Группа II. Месторождения со сложными гидрогеологическими условиями. Подземные воды приурочены к относительно спокойно залегающим коллекторам невыдержанной мощности или неоднородным по фильтрационным свойствам (неравномерно трещиноватым и закарстованным).

Группа III. Месторождения с очень сложными гидрогеологическими условиями. Подземные воды приурочены к весьма неоднородным по фильтрационным свойствам (неравномерно трещиноватым или закарстованным) коллекторам, имеющим локальное распространение, или пластам, невыдержаным по мощности и осложненным тектоническими нарушениями.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод проводится гидродинамическим, гидравлическим, балансовым методами, методом гидрогеологической аналогии либо комплексом перечисленных методов.

Суть гидродинамического метода заключается в расчетах водозаборных сооружений при принятых начальных и граничных условиях и параметрах водоносного горизонта в пределах рассматриваемой области фильтрации. Гидродинамические методы могут быть подразделены на аналитические и машинные.

Гидродинамические методы оценки эксплуатационных запасов наиболее целесообразно применять для месторождений первой и второй групп по сложности гидрогеологических условий. Для достаточно простых гидрогеологических условий (однородные фильтрационные свойства, прямолинейные границы водоносных пластов) следует использовать аналитические зависимости. Расчетные формулы выбираются в зависимости от принятой схемы водозабора и граничных условий водоносного пласта. Этот вопрос широко освещен в работах Н. Н. Биндемана, Л. С. Язвина, Н. И. Плотникова и др. [11, 39, 41].

В сложных гидрогеологических условиях, характеризующихся существенной неоднородностью гидрогеологических параметров, сложной конфигурацией границ пласта, наиболее целесообразны методы аналогового моделирования.

Оценка эксплуатационных запасов гидравлическим методом заключается в определении расчетного дебита водозабора или прогнозных понижений в скважинах по эмпирическим данным, полученным в процессе опыта. Опытным путем определяют понижение уровня и срезки уровней во взаимодействующих скважинах при установленвшемся режиме. Этот метод может быть использован для оценки запасов в условиях обеспеченного их восполнения, но при существенной неоднородности водовмещающих пород. В условиях неустановившейся фильтрации гидравлический метод применяют для оценки эксплуатационных запасов в основном месторождений III группы.

Гидравлический метод в сочетании с гидродинамическим может быть использован и при неустановившемся движении для месторождений II группы.

Оценка запасов балансовым методом заключается в определении объема воды, который может быть отобран водозабором в течение того или иного срока эксплуатации за счет сработки естественных запасов, частичного или полного перехвата водозабором естественного потока. Этот метод вспомогательный и применяется при оценке эксплуатационных запасов низких категорий (C_2 , иногда C_1). Балансовый метод должен использоваться обязательно в сочетании с гидравлическим или гидродинамическим при оценке обеспеченности эксплуатационных запасов более высоких категорий в ограниченных структурах.

Оценка запасов методом гидрогеологической аналогии заключается в определении модуля эксплуатационных запасов водоносного горизонта, устанавливаемого по данным эксплуатации действующих водозаборов.

Под модулем эксплуатационных запасов понимается расход, который может быть получен с единицы площади (а в долинах рек с единицы длины) водоносного горизонта. Для использования метода аналогии необходимо доказать идентичность гидрогеологических условий и источников формирования запасов.

§ 3. Требования к разведке и изученности месторождений подземных вод

Для планомерного выявления ресурсов подземных вод и во избежание неоправданных затрат необходимо соблюдать определенную последовательность в проведении поисково-разведочных работ. Выделяют три основные стадии: поисковую, предварительную и детальную разведки [25]. В зависимости от потребности в воде, сложности гидрогеологических условий и степени их изученности отдельные стадии исследований могут быть совмещены или полностью исключены. Последнее должно быть обосновано.

Гидрогеологические исследования на каждой из стадий выполняются по проекту [31]. Результаты работ каждой из стадий — основа для составления проекта последующей стадии и проектирования водоснабжения. В результате проведения работ в различные стадии должны быть решены следующие вопросы [25].

Поисковые работы — поиски месторождений (участков) и в их пределах водоносных горизонтов, перспективных для постановки разведочных работ.

Предварительная разведка — изучение основных особенностей геолого-гидрогеологических условий месторождения (участка), предварительная оценка основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и расчетных гидрогеологических параметров, выбор рациональной схемы водозaborа, предварительная оценка эксплуатационных запасов подземных вод по низким категориям.

Детальная разведка — уточнение условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод, обоснование схемы и конструкции водозaborа, оценка эксплуатационных запасов подземных

вод по категориям, определяющим выделение капиталовложений на проектирование и строительство новых или реконструкцию действующих водозаборов. Капитальные вложения выделяются при наличии на участке намечаемого водозабора утвержденных государственной комиссией по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР эксплуатационных запасов подземных вод категорий *A* и *B*, обеспечивающих проектную производительность водозабора в течение расчетного срока водопотребления: запасы категории *A* должны составлять не менее 50%.

На участках с весьма сложным гидрогеологическим строением, где выявление запасов подземных вод категории *A* в процессе разведки нецелесообразно, допускается проектирование и выделение капитальных вложений на строительство водозаборных сооружений на базе запасов категории *B* (главным образом месторождения III группы). Это допустимо также в случаях, когда выявленные запасы категории *B* на оцениваемом месторождении (участке) значительно (в 2—3 раза) превышают потребность в воде, при ожидаемых небольших затратах на сооружение водозабора (соизмеримых с затратами на разведку).

Достоверность определения эксплуатационных запасов существенно зависит от степени неоднородности фильтрационных свойств водовмещающих пород и от достоверности определения расчетных гидрогеологических параметров (связанной с количеством их определений). Поэтому на стадии детальной разведки всех типов месторождений подземных вод в пределах детально разведуемого водозаборного участка количество разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин, попадающих в схему водозабора, зависит от степени изменчивости фильтрационных свойств и должно составлять в относительно однородных пластах 15—20% (но не менее трех на водозаборный ряд), а в неоднородных — 40—50% от числа эксплуатационных скважин. В весьма неоднородных пластах на месте каждой проектной скважины должны быть пробурены разведочная или разведочно-эксплуатационная скважина [25].

§ 4. Пример проекта гидрогеологических исследований для водоснабжения

В качестве примера возьмем проект на детальную разведку подземных вод для хозяйствственно-питьевого водоснабжения одного из населенных пунктов, расположенного в пределах артезианского бассейна. Исходными данными для составления проекта служат материалы, полученные на предварительной стадии.

В результате проведенных предварительных гидрогеологических исследований на участке был выявлен наиболее перспективный источник централизованного водоснабжения — силурийский водоносный комплекс. Данный водоносный комплекс в региональном плане развит на значительной площади. При схематизации природной обстановки для расчетов принята схема «неограниченный пласт».

На стадии предварительной разведки были пробурены и опробованы 3 скважины, вскрывшие силурийские отложения (в пределах глубин 98—180 м на полную мощность — 81—82 м). Силурийский водоносный комплекс приурочен к трещиноватым и кавернозным известнякам, перекрытым сверху глинами сеномана и подстилаемым аргиллитами кембрия. Подземные воды напорные. Высота напора над кровлей пласта 48—50 м.

Минерализация воды силурийского водоносного комплекса 0,8—1,0 г/л, жесткость 1,2—3,6 мг·экв/л, по составу это гидрокарбонатные кальциевые воды.

Параметры пласта рассчитаны по данным двух опытных одиночных откачек и одной кустовой. Как более достоверные приняты данные кустовой откачки: водопроводность $T = k \cdot m = 192,5 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент пьезопроводности $\kappa = 1,4 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Перед выбором объема и методики проектируемых работ были оценены эксплуатационные запасы подземных вод силурийского водоносного комплекса гидродинамическим методом. Производительность водозабора рассчитана путем определения понижения уровня воды в скважине, находящейся в наихудших условиях, на конечный срок эксплуатации.

Расчетный срок эксплуатации водозабора был принят равным 10^4 сут.

Размер понижения для условий «неограниченного пласта» определили по зависимости (9.13):

$$S = \frac{Q_{\text{проек}}}{4\pi km} \ln \frac{2,25 \kappa t}{r_k^2} = \frac{0,183 Q_{\text{проек}}}{km} \lg \frac{2,25 \kappa t}{r_k^2},$$

где $Q_{\text{проек}}$ — проектная производительность водозабора, $\text{м}^3/\text{сут}$; она принята равной (с учетом заявленной потребности) $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$; km — водопроводимость пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$ (принята равной $192,5 \text{ м}^2/\text{сут}$); κ — коэффициент пьезопроводности пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$ (равен $1,4 \cdot 10^5$); t — расчетный срок эксплуатации водозабора, сут (10^4); r_k — расчетный радиус большого колодца. Радиус большого колодца при принятой линейной схеме водозабора определяется по зависимости $r_k = 0,2l$ [6], где l — длина ряда при линейной системе.

Для определения длины ряда рассчитали количество скважин водозабора при принятом эксплуатационном дебите $Q_3 = 648 \text{ м}^3/\text{сут}$ по формуле (13.1):

$$n = \frac{Q_{\text{проек}}}{Q_3} = \frac{5000}{648} = 8 \text{ скв.}$$

Расстояние между скважинами водозабора было принято равным 400 м. Поэтому

$$l = 400 \cdot (n - 1) = 400 \cdot 7 = 2800 \text{ м},$$

$$r_k = 0,2 \cdot 2800 = 560 \text{ м},$$

$$S = \frac{0,183 \cdot 5000}{192,5} \lg \frac{2,25 \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 10^4}{560^2} = 19,0 \text{ м.}$$

Определили дополнительное понижение, обусловленное сопротивлением самой скважины, по формуле [30]:

$$\Delta S_{\text{скв}} = \frac{Q_0}{2\pi k m} \left(\ln \frac{r_n}{r_c} + \zeta \right), \quad (13.2)$$

где r_c — радиус скважины в м (принят 0,1 м), r_n — приведенный радиус некоторой условной области влияния данной скважины, равный для линейной системы: $r_n = \sigma / 2\pi$; где σ — расстояние между скважинами $r_n = \frac{400}{2 \cdot 3,14} = 60$ м; ζ — фильтрационное сопротивление, принятое равным нулю для совершенных скважин:

$$\Delta S_{\text{скв}} = \frac{648}{2 \cdot 3,14 \cdot 192,5} 2,3 \lg \frac{60}{0,1} = 3,4 \text{ м.}$$

Таким образом, общее понижение в центральной скважине водозабора на конец расчетного периода примерно равно 22,4 м (19 + 3,4) и эксплуатационные запасы 5000 м³/сут можно считать обеспеченными, так как расчетное понижение не превышает допустимого, равного высоте напора над кровлей водоносного горизонта (48 м).

На детальной стадии разведки проводятся буровые и опытные работы, геофизические, стационарные гидрогеологические наблюдения, топографические работы и лабораторные исследования.

Буровые работы — проходка разведочно-эксплуатационных и наблюдательных скважин для организации кустовых откачек.

Изучаемый участок относится ко второму типу месторождений подземных вод (месторождение в артезианских бассейнах) и ко II группе (подземные воды приурочены к спокойно залегающим неравномерно трещиноватым коллекторам, поэтому количество разведочно-эксплуатационных скважин должно быть равным 50% от числа эксплуатационных скважин [25] (4 скважины).

Так как протяженность линейного ряда 2800 м, для определения гидрогеологических параметров пласта на участке необходимо заложить два куста — один куст на каждые 1000 м протяженности водозабора [39].

Глубина скважин при условии вскрытия водоносного пласта на полную мощность будет равна 180 м, поэтому для проведения кустовых откачек необходимо запроектировать наименьшее количество наблюдательных скважин — по три в каждом кусте. Общее количество скважин — десять (четыре разведочно-эксплуатационные и шесть наблюдательных). Общий метраж бурения 180 м × 10 = = 1800 м. Порядок выбора конструкций скважин, типов фильтров, оборудования приводится в гл. 11.

Опытные работы включают пробные откачки из наблюдательных скважин, опытные одиночные из двух разведочно-эксплуатационных скважин и двух опытных кустовых из остальных разве-

дочно-эксплуатационных скважин. Перед пробными и опытными откачками из всех скважин проводятся прокачки. Продолжительность одной прокачки 1 смена — 7 ч (по опыту работ). После прокачек наблюдают за восстановлением уровня.

Пробные откачки проводятся в течение 24 ч (3,43 смены). Время, затрачиваемое на прокачки и пробные откачки по всем скважинам, должно составить $1 \text{ см} \times 10 + 3,43 \text{ см} \times 6 = 30,58 \text{ см}$.

Характер и виды опытных откачек выбирают в зависимости от принятого метода оценки запасов подземных вод.

Оценку запасов подземных вод по результатам детальной разведки намечено произвести гидродинамическим и гидравлическим методами, что возможно для месторождений II группы [25]. В связи с этим опытные одиночные откачки будут проведены с двумя понижениями уровня общей продолжительностью 8 сут. Назначение этих откачек — установить характер зависимости дебита от понижения. Время на проведение откачек составит: $3,43 \text{ см} \times 8 \times 2 = 54,88 \text{ см}$.

Кустовые откачки будут проведены при одном понижении уровня при постоянном дебите для точного определения гидрогеологических параметров.

Расстояния наблюдательных скважин от центральной — возмущающей определяют по формуле (12.1): $r_n = r_1 a^{n-1}$, где r_1 — расстояние до первой наблюдательной скважины принимается равным 0,7 мощности водоносного пласта — 82 м · 0,7 = 57 м; a — коэффициент, равный для напорных вод 2,5. Определим r_2 , r_3 :

$$r_2 = 57 \cdot 2,5^{2-1} = 142 \text{ м};$$

$$r_3 = 57 \cdot 2,5^{3-1} = 366 \text{ м.}$$

Рассчитаем время проведения кустовой откачки по формуле (12.3):

$$t = t_k + t_n; \quad t_k = \frac{r^2}{0,4x},$$

где r — расстояние до удаленной наблюдательной скважины, м; x — коэффициент пьезопроводности, $\text{м}^2/\text{сут}$.

$$t_k = \frac{355^2}{0,4 \cdot 1,4 \cdot 105} = 2,2 \text{ сут};$$

$$t_n = 5t_k = 5 \cdot 2,2 = 11 \text{ сут}; \quad t = 2,2 + 11 = 13,2 \text{ сут.}$$

Затраты времени на кустовые откачки равны: $13,2 \times 2 \times 3,43 = 90,55 \text{ см}$. Общие затраты времени на все виды опытных работ (прокачки, пробные, опытные одиночные и кустовые откачки) составят: $30,58 + 54,88 + 90,55 = 176,01 \text{ см}$.

Методика проведения откачек, выбор насосов и приборов для их проведения обоснованы в гл. 12.

Стационарные гидрогеологические наблюдения за подземными водами будут производиться в течение 1 года. В наблюдательную

сеть намечается включить по одной наблюдательной скважине из числа пробуренных в каждом кусте и по две разведочные скважины из числа пробуренных на стадии предварительной разведки, одна из которых пройдена на вышележащий сеноманский водоносный горизонт.

В цикл режимных наблюдений войдут замеры уровня и температуры воды один раз в 5 дней и отбор проб воды на сокращенный химический анализ по сезонам года. Количество замеров уровня и температуры по всем точкам за год составит: 6 замеров $\times 4 \times 12 = 288$ замеров. Количество проб воды, отбираемых за год по всем пунктам, равно: 4 пробы $\times 4 = 16$ проб.

Топографические работы будут заключаться в плановой и высотной привязке всех 10 скважин.

Лабораторные работы будут включать проведение анализов. В соответствии со стадией разведки под схему водозабора подземные воды намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта должны быть охарактеризованы полными химическими анализами. Должно быть выяснено содержание вредных микрокомпонентов согласно ГОСТ 2874—73: бериллия Be, молибдена Mo, мышьяка As, свинца Pb, фтора F, радия-226 Ra, стронция-90 Sr, марганца Mn, меди Cu, цинка Zn. Этими анализами должны быть охвачены все разведочно-эксплуатационные скважины.

Для характеристики бактериальных свойств воды намечается отобрать по одной пробе воды из каждой разведочно-эксплуатационной скважины на бактериологический анализ.

ГЛАВА 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРИТОКОВ К ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

Определение притоков подземных вод к горным выработкам — одна из сложнейших задач рудничной гидрогеологии. В зависимости от гидрогеологических условий и характера исходных материалов для решения подобных задач могут быть использованы балансовый, гидродинамический методы, моделирование и метод аналогии. Наиболее широко применяется гидродинамический метод расчета водопритоков как к отдельным выработкам, так и к системе выработок. Для выбора формул расчета водопритоков необходимо знать проектируемые виды выработок, особенности и параметры водоносных горизонтов, граничные условия пластов, характер поступления воды в выработки и другие факторы. Описание различных методов определения водопритоков в выработки, методы борьбы с ними приведены в работах В. Д. Бабушкина [4], П. П. Климентова [32] и др.

Приток воды ($\text{м}^3/\text{сут}$) в ствол шахты из однородного артезианского водоносного горизонта (рис. 79) определяют по формуле

$$Q = 1,36 k \frac{(2H - M) M}{\lg R - \lg r}, \quad (14.1)$$

где H — высота напора над подошвой водоносного пласта, м; M —

мощность напорного водоносного пласта, м; R — радиус влияния, м; r — радиус выработки, м.

Притоки безнапорных вод ($\text{м}^3/\text{сут}$), поступающих по всему периметру карьера, рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{1,36k(H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} . \quad (14.2)$$

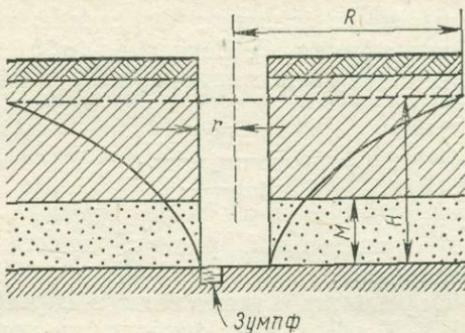


Рис. 79. Приток воды в ствол шахты

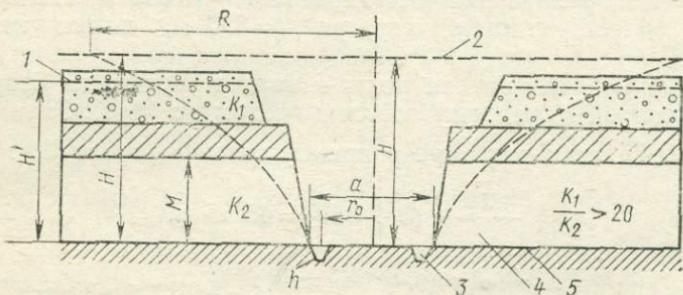


Рис. 80. Схема притока безнапорных и напорных вод, вскрытых по всему периметру карьера:

1 — уровень грунтовых вод, 2 — пьезометрический уровень напорных вод, 3 — столб воды в дренажных зумпфах, 4 — продуктивный комплекс, 5 — водоупор

Притоки напорных вод рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{\pi k [(2H^1 - M)M - h^2]}{\ln \frac{R}{r_0}} , \quad (14.3)$$

где H — мощность грунтового водоносного горизонта, м; H_1 — напор над подошвой напорного пласта. Остальные обозначения см. на рис. 80.

Если карьер одновременно дренирует безнапорные воды вскрытых отложений и напорные воды коренных пород, как это показано на рис. 80, то притоки, подсчитанные по формулам (14.2) и (14.3), суммируются.

В условиях безнапорных вод при неограниченном в плане пласте приток к участку подземных разработок с приведенным радиусом r_0 определяют по формуле

$$Q = \frac{2\pi k H^2}{-E_i\left(-\frac{r_0}{4a_y t}\right)}, \quad (14.4)$$

где a_y — коэффициент уровнепроводности; t — длительность откачки; E_i — экспоненциальная функция, определяемая по специальным таблицам или графикам [4]. Если $r^2/4a_y t \leq 0,1$, т. е. поток может рассматриваться как квазистационарный, формулу (14.4) приводят к виду

$$Q = \frac{\pi k H^2}{\ln \frac{R_n}{r_0}}, \quad (14.5)$$

где $R_n \approx 1,5 \sqrt{a_y t}$ — приведенный радиус депрессии; r_0 — радиус выработки (приведенный).

Задача 24. Определить приток воды в карьер из напорного горизонта (рис. 80). Коэффициент фильтрации пород $k_2 = 5$ м/сут, мощность водоносной толщи $M = 10,5$ м, напор над подошвой пласта $H_1 = 52,3$ м, радиус влияния карьера $R = 10\ 000$ м, столб воды в зумпфе $h = 1$ м, ширина карьера $l = 350$ м, длина карьера $a = 1250$ м.

Для определения притока воды в карьер применим формулу (14.3), в которой r_0 рассчитывается по формуле Н. К. Гиринского $r_0 = \frac{a}{4} + 0,4b$, так как карьер прямоугольной формы [32]:

$$r_0 = \frac{1250}{4} + (0,4 \cdot 350) = 452,5 \text{ м},$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 5 [(2 \cdot 52,3 - 10,5) \cdot 10,5 - 112]}{2,3 \lg \frac{10\ 000}{452,5}} = 4537,5 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

ГЛАВА 15. ПРИНЦИП РАБОТЫ С ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТОЙ СССР МАСШТАБА 1 : 2 500 000

В результате обширных гидрогеологических исследований на территории СССР выявлены общие закономерности формирования, распространения, химического состава, температурных и других особенностей подземных вод. Изучение распространения подземных вод и составляет основу раздела «Подземные воды СССР».

Основным пособием к практическим занятиям по этой части курса является обзорная гидрогеологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000 с объяснительной запиской. На этой карте дано гидрогеологическое районирование территории СССР, в основу которого положен структурно-геоморфологический принцип. К гидрогеологическим районам первого порядка (A и B) относятся

крупные платформенные структуры (синеклизы, прогибы) и крупные складчатые системы: *А* — районы преобладающего развития артезианских и грунтовых вод осадочных отложений в пределах платформы и краевых прогибов (артезианские бассейны); *Б* — районы преимущественного развития грунтовых вод зоны трещиноватости пород и напорных вод тектонических нарушений в пределах щитов и горноскладчатых областей.

Для работы с гидрогеологической картой необходимо разобраться в особенностях гидрогеологического районирования и в условных обозначениях к гидрогеологической карте.

На карте в соответствии с международной геологической легендой цветными обозначениями показаны площади распространения первых от поверхности водоносных горизонтов и комплексов горных пород, комплексов, обводненных локально или спорадически, толщ пород практически водоупорных, водопроницаемых, но безводных. Для четвертичных отложений разработана особая шкала цветов. На цветовой фон нанесены геологические индексы (для комплексов они объединены — $Q+N+K_2$). Сплошной окраской (без дополнительных обозначений) показаны площади распространения первых от поверхности земли водоносных горизонтов и комплексов артезианских и грунтовых вод осадочных и вулканогенных пород преимущественно равнинных платформенных областей и межгорных понижений. Крапом и штриховкой, совмещенными с фоновой закраской, показаны первые от поверхности земли горизонты:

1. Водоносные горизонты и комплексы осадочных и вулканогенных пород горных районов с глубоко расположенным уровнем подземных вод.

2. Водоносные горизонты, комплексы преимущественно кристаллических пород, обводненных в зоне экзогенной трещиноватости и по зонам тектонических разломов, распространенных в пределах горно-складчатых областей и щитов платформ.

3. Комплексы сильно дислоцированных преимущественно водоупорных отложений, локально обводненных по отдельным пластам карбонатных и других водопроницаемых пород.

4. Преимущественно водоупорные толщи пород с локальной водоносностью по зонам трещиноватости.

Границы распространения водоносных горизонтов или комплексов, лежащих ниже первых от поверхности земли, показаны на карте сплошными или пунктирными линиями, цвет которых соответствует возрасту содержащих их пород. Для отражения специфических условий в районах распространения многолетнемерзлых пород введены обозначения в виде полос, цвет которых соответствует возрасту водоносных горизонтов, комплексов. Южная граница распространения многолетнемерзлых пород и изолинии вероятных их максимальных изомощностей показаны линиями зеленого цвета. При помощи дополнительных индексов, часто соответствующих геологическим, даны наиболее важные с гидрогеологической точки зрения характеристики литологического состава и ге-

незиса водовмещающих пород (эффузивных, интрузивных, метаморфических, карбонатных, соленосных и др.).

Минерализация (г/л) подземных вод показана на карте краем красного цвета: 1—3 — слабо солоноватые, 3—10 — сильно солоноватые, 10—50 — соленые, обычно непригодные для практического использования, 50—100 — слабые рассолы и более 100 — крепкие рассолы. Воды с минерализацией до 1 г/л крапом не отмечаются. Особым знаком отмечены площади распространения вод, пестрых по минерализации. Химический состав подземных вод дан по опорным водопунктам и разрезам.

Впервые на карте указаны площади распространения естественных ресурсов подземных вод. Они охарактеризованы изолиниями среднемноголетнего модуля подземного стока на 80% территории СССР. Сечение изолиний модуля подземного стока 0,2—0,5 л/(с·км²) для равнинных территорий и 3—5 л(с·км²) для горных сооружений. Отдельные районы с особо сложными гидрогеологическими условиями обведены контурами, в пределах которых указаны предельные или средние значения модулей подземного стока. Естественные ресурсы подземных вод (расход подземного стока) для любой заданной площади вычисляют по формуле

$$Q = 0,001 \cdot M_n \cdot F, \quad (15.1)$$

где Q — расход подземного стока, м³/с; M_n — модуль подземного стока, л/(с·км²), определенный по карте; F — заданная площадь, км².

Если по заданной площади проходит несколько изолиний модуля подземного стока, то расход подземного стока определяют по формуле

$$Q = 0,001 M_{n_1} F_1 + M_{n_2} F_2 + \dots + M_{n_j} F_j, \quad (15.2)$$

где $M_{n_1}, M_{n_2}, \dots, M_{n_j}$ — модули подземного стока, определенные по карте; F_1, F_2, \dots, F_j — площади, тяготеющие к данным изолиниям и определяемые планиметрированием, км².

Для горноскладчатых областей синим цветом проведены границы распространения различных по газовому составу и температуре провинций минеральных вод: 1) сероводородно-углекислых, углекислых, азотно-углекислых термальных вод областей современного вулканизма; 2) углекислых минеральных вод областей молодой магматической деятельности; 3) азотных термальных вод областей новейших тектонических движений; 4) азотных, азотно-метановых и метановых вод артезианских бассейнов платформ, краевых прогибов и складчатых областей.

Около знаков водопунктов приведены значения глубин залегания кровли статического уровня, минерализации и химического состава основного водоносного горизонта. Данные опорных гидрогеологических разрезов приведены в объяснительной записке к карте.

Следовательно, гидрогеологическая карта позволяет охаракте-

ризовать гидрогеологические особенности любого района территории СССР.

Пример. По гидрогеологической карте масштаба 1:2500000 необходимо составить гидрогеологическую характеристику района Ергеней.

На схеме районирования находим Ергенинский район, который значится под номером 13₂. Он относится к группе районов А, в которой преобладает развитие артезианских и грунтовых вод осадочных отложений равнинной области краевой зоны Русской и Скифской плит. Цифра 13 означает, что площадь относится к Прикаспийскому гидрогеологическому району I порядка (Прикаспийская синеклиза), а индекс указывает на район II порядка. По изогипсам на карте определяем, что палеозойский фундамент залегает на этой площади на глубине около 1000 м, температура на этой глубине 30—50° С.

На палеозойском фундаменте залегает мощная толща меловых, палеогеновых, неогеновых и четвертичных отложений, вскрытых опорными скважинами 92 и 93, глубина которых соответственно равна 1850 и 504 м. В отложениях нижнего мела К₁ встречены воды с минерализацией более 100 г/л, содержанием Br 110 г/л, I 40 мг/л. Пресные воды в верхнемеловых отложениях К₂ встречены лишь в северной части района. В пределах Ергенинского района первыми от поверхности залегают: водоносный комплекс миоцена N₁ и олигоцена, водоносные горизонты ергенинских песков N_{2erg} и четвертичных отложений Q. Четвертичные отложения содержат грунтовые воды с минерализацией 3—5 г/л, в долинах рек менее 3 г/л.

Водоносный горизонт ергенинских песков — основной горизонт, имеющий практическое значение. Он представлен напорными водами с удельными дебитами скважин от 0,02 до 0,8 л/с, минерализация воды от 0,5 до 5 г/л. Модуль подземного стока M_п в центральной части равен в среднем 0,75 л/с на площади F₁=36 286 км², на остальной территории района (площадь F₂=71 880 км²) модуль равен 0,6 л/с. Естественные ресурсы в пределах площади F₁ составляют:

$$Q_1 = 0,001 \cdot F_1 \cdot M_{\text{п}} = 0,001 \cdot 0,75 \cdot 36 286 = 27,2 \text{ м}^3/\text{с};$$

на площади F₂:

$$Q_2 = 0,001 \cdot F_2 \cdot M_{\text{п}} = 0,001 \cdot 0,6 \cdot 71 880 = 43,13 \text{ м}^3/\text{с}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Анатольевский П. А., Малоян А. В., Шнееров О. М. Технология бурения скважин на воду. М., 1962, 248 с.
2. Ансберг Е. А., Боровицкий В. П., Бутц Ш. Ф. и др. Практикум по общей гидрогеологии. Л., 1965, 232 с.
3. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М., 1953, 616 с.
4. Бабушкин В. Д., Пересынко Д. И., Прохоров С. П. и др. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых. М., 1969, 408 с.
5. Бабушкин В. Д., Плотников И. И., Чуйко В. М. Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М., 1974, 208 с.
6. Башкатов Д. Н., Роговой В. Л. Бурение скважин на воду. М., 1976, 206 с.
7. Башкатов Д. Н., Тесля А. Г. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин на воду. М., 1970, 144 с.
8. Белицкий А. С., Дубровский В. В. Проектирование разведочно-эксплуатационных скважин для водоснабжения. М., 1974, 255 с.
9. Беляков В. М., Попков В. А., Краснощеков Г. М. Учебная книга мастера по бурению скважин на воду. М., 1976, 367 с.
10. Биндерман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., 1970, 208 с.
11. Богомолов Г. В. Гидрогеология с основами инженерной геологии. М., 1975.
12. Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откаек. М., 1973, 304 с.
13. Боревский Б. В., Хордикайнен М. А., Язвин Л. С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М., 1976, 246 с.
14. Бочевер Ф. М. Гидрогеологические расчеты крупных водозаборов подземных вод и водопонизительных установок. М., 1963, 59 с.
15. Бочевер Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М., 1968, 327 с.
16. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., 1968, 352 с.
17. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В. и др. Основы гидрогеологических расчетов. 2-е изд. М., 1969, 367 с.
18. Вевиоровская М. А., Кравченко И. П., Румянцев С. А. Методы аналогий применительно к фильтрационным расчетам. М., 1962, 257 с.
19. Гавич И. К., Лучшева А. А., Семенова С. М. Сборник задач по общей гидрогеологии. М., 1964, 252 с.
20. Гармонов И. В., Лебедев А. В. Основные задачи по динамике подземных вод. М., 1952, 244 с.
21. Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000. Объяснительная записка. М., 1972.
22. Дружинин Н. И. Изучение региональных потоков подземных вод методом электрогоидродинамических аналогий. М., 1966, 336 с.
23. Дружинин Н. И. Метод электрогоидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. М. — Л., 1956, 356 с.
24. Жернов И. Е., Шестаков В. М. Моделирование фильтрации подземных вод. М., 1971, 266 с.
25. Инструкция по применению эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод. М., 1976.
26. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. 2-е изд. М., 1943, 260 с.
27. Климентов П. П. Общая гидрогеология. 3-е изд. М., 1971, 224 с.
28. Климентов П. П. Сборник задач по динамике подземных вод. М., 1951, 127 с.
29. Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология. М., 1977, 357 с.

30. Климентов П. П., Кононов В. М. Динамика подземных вод. М., 1973, 440 с.
31. Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований. М., 1978, 407 с.
32. Климентов П. П., Сыроватко М. В. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых. М., 1966, 379 с.
33. Крашин И. И. Моделирование фильтрации и теплообмена в водонапорных системах. М., 1976, 159 с.
34. Крашин И. И., Пересунько Д. И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования (методическое руководство). М., 1976, 206 с.
35. Опытно-фильтрационные работы/Под ред. Шестакова В. М. и Башкатова Д. Н. М., 1974, 202 с.
36. Овчинников А. М. Общая гидрогеология. 2-е изд. М., 1955, 380 с.
37. Оноприенко М. Г. Бурение и оборудование гидрогеологических скважин. М., 1978, 168 с.
38. Перцовский В. В. Обоснование режима опытных откачек. — Разведка и охрана недр. 1976, № 7, с. 46—49.
39. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. М., 1968, ч. 2, 466 с.
40. Плотников Н. А., Сычев К. И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением. М., 1976, 152 с.
41. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения (методическое пособие). М., 1969, 327 с.
42. Посохов Е. В. Общая гидрохимия. Л., 1975, 208 с.
43. Резников А. А., Муликсовская Е. Н., Соколов И. Ю. Методы анализа природных вод. 3-е изд. М., 1970, 477 с.
44. Самсонов Б. Г., Бурдакова О. Л., Кривошеева Л. И. Рекомендации по обработке результатов опытных работ на основе уравнений неустановившегося движения. М., 1969, 104 с.
45. Силин-Бекчурин А. И. Динамика подземных вод. М., 1965, 380 с.
46. Справочник гидрогеолога. М., 1962, 616 с.
47. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду/Под ред. Дубровского В. В. 2-е изд. М., 1972, 511 с.
48. Справочное руководство гидрогеолога. 2-е изд. Л., 1967, т. 1, 592 с.
49. Справочник по специальным работам. Проектирование и сооружение скважин для водоснабжения. М., 1970, 200 с.
50. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ (методические рекомендации). М., 1969, 185 с.
51. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. 4-е изд. М., 1975, 303 с.
52. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М., 1973, 326 с.
53. Шестаков В. М., Кравченко И. П., Пашковский И. С. Практикум по динамике подземных вод. 2-е изд. М., 1975, 270 с.
54. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. М., 1949, 523 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
Часть 1. Общая гидрогеология	
Глава 1. Общий круговорот воды в природе	4
§ 1. Основные метеорологические приборы и работа с ними	4
§ 2. Параметры поверхностного и подземного стоков	7
Глава 2. Влажность и водные свойства горных пород	10
§ 1. Определение влажности	10
§ 2. Определение влагоемкости, капиллярных свойств и водоотдачи пород	10
§ 3. Определение коэффициента фильтрации пород	14
Глава 3. Физические свойства и химический состав подземных вод	15
§ 1. Обработка химических анализов подземных вод	16
§ 2. Систематизация химических анализов подземных вод и оценка пригодности воды для целей хозяйствственно-питьевого водоснабжения	22
§ 3. Графические методы изображения химического состава вод	27
Глава 4. Грунтовые воды	32
§ 1. Построение карт гидроизогипс и глубин залегания грунтовых вод	32
§ 2. Анализ карт гидроизогипс	34
Глава 5. Артезианские воды	38
§ 1. Построение карт гидроизоприв	39
§ 2. Анализ карты гидроизоприв	40
Часть 2. Динамика подземных вод	
Глава 6. Основные законы фильтрации воды в горных породах	45
Глава 7. Установившееся и неустановившееся движение подземных вод	48
§ 1. Определение расхода подземных вод и построение депрессионных кривых потоков для установившегося движения в однородных и неоднородных пластах	48
§ 2. Применение уравнений неустановившегося движения подземных вод для решения гидрогеологических задач	56
Глава 8. Движение подземных вод в районах гидротехнических сооружений и водохранилищ	60
§ 1. Прогноз подпора грунтовых вод	60
§ 2. Фильтрационные расходы воды под плотиной и в обход ее плечевых примыканий, потеря воды на фильтрацию из водохранилищ и каналов	63
Глава 9. Движение подземных вод к водозаборным и дренажным сооружениям	69
§ 1. Расчеты одиночных водозаборов	70
§ 2. Обоснование расчетных схем и расчеты взаимодействующих водозаборов и дренажных сооружений	77
§ 3. Определение гидрогеологических параметров	84
Глава 10. Моделирование фильтрации подземных вод	93
§ 1. Виды моделирования и его задачи	93
§ 2. Решение задач установившейся фильтрации на моделях ЭГДА	95
Часть 3. Методика гидрогеологических исследований	
Глава 11. Требования к конструкциям гидрогеологических скважин, наблюдения и документация при проходке скважин	100
§ 1. Обоснование конструкции гидрогеологических скважин	100
§ 2. Гидрогеологические наблюдения и документация при бурении скважин	109
Глава 12. Опытно-фильтрационные работы	113
§ 1. Виды откаек, их проектирование	113
§ 2. Оборудование и приборы, применяемые при откаек	119
§ 3. Документация опытных откаек	125
§ 4. Опытные наливы в шурфы	128
Глава 13. Гидрогеологические исследования для целей водоснабжения	133
§ 1. Определение потребности в воде и количества скважин водозабора для различных объектов	133
§ 2. Эксплуатационные запасы и методы их оценки	135
§ 3. Требования к разведке и изученности месторождений подземных вод	139
§ 4. Пример проекта гидрогеологических исследований для водоснабжения	140
Глава 14. Определение водопритоков к горным выработкам	144
Глава 15. Принцип работы с гидрогеологической картой СССР масштаба 1 : 2 500 000	146
Литература	150

30 K.

18850

