

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,  
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.  
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .  
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.  
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.



Н.Н. ЛЕНЧЕНКО  
Н.В. ФИСУН

---

# ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ЧАСТЬ 1

НЕДРА



Н.Н. ЛЕНЧЕНКО  
Н.В. ФИСУН

---

# ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

УЧЕБНОЕ  
ПОСОБИЕ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВУЗОВ  
В ДВУХ ЧАСТЯХ  
ЧАСТЬ 1

Рекомендовано УМО по образованию  
в области прикладной геологии в качестве  
учебного пособия для студентов высших  
учебных заведений, обучающихся по специальности  
130302 «Поиски и разведка подземных вод  
и инженерно-геологические изыскания»  
направления подготовки 130300 «Прикладная  
геология»



МОСКВА  
НЕДРА  
2008



УДК 551.491.5

ББК 26.326

Л33

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук *А.Н. Клюквин*

**Ленченко Н.Н., Фисун Н.В.**

**Л33** Практикум по динамике подземных вод: Учеб. пособие для студентов вузов: В 2 ч. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – Ч. 1. – 120 с.: ил.  
ISBN 978-5-8365-0308-6

Содержит полный курс лабораторно-практических работ, соответствующих специальности 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания». Рассмотрены особенности схематизации гидрогеологических условий и гидродинамические расчеты при изучении подземных потоков как в естественных условиях, так и под воздействием основных типов инженерных сооружений (водозаборов, дренажей, гидротехнических сооружений, массивов орошения), предложены задания по определению гидродинамических параметров подземных потоков.

Для студентов направления подготовки 130300 «Прикладная геология», а также для учащихся геологических вузов. Может быть использовано в инженерной практике при решении практических задач в области гидрогеологии.

**ISBN 978-5-8365-0308-6**

© Ленченко Н.Н., Фисун Н.В., 2008

© Оформление.

ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Предисловие .....                                                                                          | 5         |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Основные понятия и определения в динамике подземных вод.....</b>               | <b>7</b>  |
| <i>Задача</i> .....                                                                                        | 16        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Построение гидродинамических секток (ГДС).....</b>                             | <b>18</b> |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 20        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Схематизация гидрогеологических условий и построение расчетных схем.....</b>   | <b>23</b> |
| 3.1. Схематизация и ее задачи.....                                                                         | 23        |
| 3.2. Схематизация, ее критерии и построение расчетной схемы.....                                           | 24        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 31        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование динамики потоков на основе плоскопараллельной фильтрации.....</b> | <b>37</b> |
| 4.1. Задачи исследований.....                                                                              | 37        |
| 4.2. Установившееся движение подземных вод при отсутствии инфильтрационного питания.....                   | 38        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 43        |
| 4.3. Установившееся движение подземных вод с инфильтрационным питанием.....                                | 47        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 49        |
| 4.4. Подпор подземных вод при повышении уровня в реке.....                                                 | 51        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 56        |
| 4.5. Подпор уровней на массиве орошения.....                                                               | 63        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 66        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследования радиальной и плано- радиальной фильтрации .....</b>               | <b>69</b> |
| 5.1. Основные положения.....                                                                               | 69        |
| 5.2. Водоприток к скважине в условиях стационарной фильтрации.....                                         | 70        |
| 5.3. Основные расчетные схемы стационарной радиальной фильтрации и их решения.....                         | 71        |
| 5.3.1. Скважина у границы I рода .....                                                                     | 71        |
| 5.3.2. Скважина в пласте с перетеканием.....                                                               | 71        |
| 5.3.3. Инверсия разгрузки.....                                                                             | 72        |
| 5.3.4. Взаимодействующие скважины .....                                                                    | 72        |
| 5.3.5. Кольцевые водозаборы («большой колодец»).....                                                       | 73        |
| 5.3.6. Учет несовершенства скважин по степени вскрытия пласта.....                                         | 73        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 74        |
| 5.4. Водоприток к скважине в условиях нестационарной фильтрации....                                        | 78        |
| 5.5. Основные расчетные схемы нестационарной фильтрации и их решения.....                                  | 80        |
| <i>Задачи</i> .....                                                                                        | 83        |
| 5.6. Метод фильтрационных сопротивлений при расчетах скважин.....                                          | 86        |



|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Задачи</b> .....                                                 | 88 |
| 5.7. Учет скачкообразного изменения расхода скважины.....           | 89 |
| <b>Задачи</b> .....                                                 | 90 |
| 5.8. Анализ структуры нарушенного откачкой потока подземных вод.... | 92 |
| <b>Задачи</b> .....                                                 | 94 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Определение гидродинамических параметров по данным опытно-фильтрационных работ</b> ..... | 95  |
| 6.1. Параметры и методы их определения.....                                                                          | 95  |
| 6.2. Принципы диагностики и интерпретации данных опытных откачек.....                                                | 97  |
| <b>Задачи</b> .....                                                                                                  | 98  |
| 6.3. Обработка данных откачек для схем неограниченного пласта.....                                                   | 101 |
| <b>Задачи</b> .....                                                                                                  | 104 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....                                                                                | 118 |
| Приложение 1. Значения функций $\Phi(\lambda) = 1 - \operatorname{erfc}(\lambda)$ и $R(\lambda)$ ..... | 118 |
| Приложение 2. Значения функции $S_g(\tau)$ .....                                                       | 118 |
| Приложение 3. Значения функции $S_v(\tau)$ .....                                                       | 118 |
| Приложение 4. Значения функции $\left[ -E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right]$ .....             | 119 |
| Список литературы.....                                                                                 | 120 |

Настоящее учебное пособие содержит полный курс лабораторно-практических занятий по динамике подземных вод (ДПВ) и соответствует учебной программе специальности 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания». Лабораторно-практические занятия тематически оформлены в виде отдельных лабораторных работ, содержащих краткое изложение теоретических основ, расчетных схем и уравнений, необходимых для решения предлагаемых далее практических задач. Предлагаемые задачи, как правило, даны в 10 вариантах условий, различающихся числовыми значениями параметров и (или) вариантами задания граничных условий. В качестве примера рассмотрено полное решение каждого первого варианта задачи с пояснениями, что позволяет студенту осуществить самостоятельное решение одного из последующих вариантов задачи.

Курс рассчитан на проведение 24 лабораторно-практических занятий продолжительностью 2 академических часа каждое, в процессе которых студенты получают консультации по существу решаемых задач и защищают выполненные ими самостоятельно лабораторные работы. Кроме того, предусматривается проверка полученных знаний и навыков путем сдачи четырех контрольных работ.

Учебное пособие состоит из двух частей, каждая из которых соответствует темам, изучаемым в течение одного из двух семестров. Вторая часть пособия содержит вопросы и задачи, предлагаемые студентам на контрольных работах.

Настоящее пособие подготовлено в результате ведения авторами лабораторно-практических занятий по ДПВ для студентов специальности «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» на кафедре гидрогеологии РГГРУ (МГРИ) им. С. Орджоникидзе в течение 30 лет.

Первая часть пособия представляет собой существенно переработанный и дополненный «Практикум по динамике подземных вод» под редакцией И.К. Гавич, изданный в 1984 г. Вторая часть пособия написана впервые и также содержит наиболее

часто встречающиеся в практике гидрогеологических расчетов задачи.

Н.Н. Ленченко, Н.В. Фисун – кандидаты геолого-минералогических наук, специалисты в области динамики подземных вод и методов гидрогеологических исследований при поисках и разведке подземных вод, опубликовали 100 научных и 15 научно-методических работ.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ДИНАМИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Одним из основных понятий в ДПВ является **область фильтрации**. Под областью фильтрации понимают часть подземной гидросферы, в пределах которой проводится количественное изучение движения подземных вод. Область фильтрации состоит из одного или нескольких взаимосвязанных водоносных горизонтов на всей или части зоны их распространения, характеризуется определенными геометрическими размерами, физическими свойствами среды и оконтуривается границами с заданными на них граничными условиями. При нестационарном режиме фильтрации должны быть заданы начальные условия (уровни на начало прогноза при  $t = 0$ ). Рассмотрим каждый из вышеуказанных элементов (рис. 1.1).

**Геометрические размеры области фильтрации** включают:

$L$  – длина всей области,  $l_1$  и  $l_2$  – протяженные размеры частей области фильтрации, характеризующиеся разными гидрогеологическими условиями (строение пласта, величина инфильтрационного питания и т.п.);  $B$  – ширина всей области,  $b_1$  и  $b_2$  – попе-

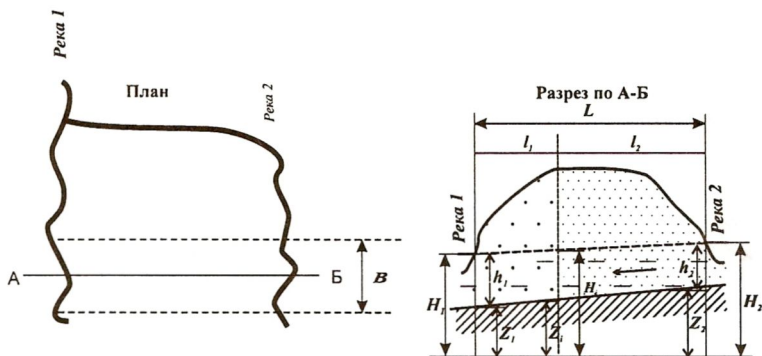


Рис. 1.1. Область фильтрации и ее характеристики

речные размеры области (для плоско-параллельной фильтрации обычно принимают  $b = 1$  м);

$z_1$  – отметка водоупора безнапорных (грунтовых) вод над плоскостью сравнения в  $i$ -м сечении,  $i = \frac{z_1 - z_2}{l_{1-2}}$  – уклон водо-

упорного ложа на участке 1–2;

$h$  и  $m$  – мощность безнапорного и напорного водоносного пласта, соответственно, причем обычно считают, что в безнапорных водах  $h$  зависит от положения уровня  $H$ , т.е.  $h = f(H)$ , а в напорных водах принимают условие  $m = \text{const}$ ;

$\bar{F} = h \cdot B$  или  $\bar{F} = m \cdot B$  – площадь поперечного сечения водоносного пласта для безнапорных и напорных вод, соответственно; стрелкой показано направление движения воды, перпендикулярное к этой плоскости;

$\uparrow F = B \cdot L$  или  $\uparrow F = b \cdot l$  – площадь распространения пласта или его части в области фильтрации, используется при характеристике фильтрации воды в вертикальном направлении;

$m_0$  – принято для обозначения мощности относительно водоупорных пород между водоносными горизонтами.

К **физическим свойствам среды** относят параметры пород и пластов. Параметры пород – это коэффициент фильтрации  $k$  [м/сут], гравитационная водоотдача  $\mu$  [доли единицы] в безнапорных водах, упругоємкость  $\beta^*$  в напорных водах. Водоотдача и упругоємкость проявляются только при нестационарном режиме фильтрации.

Величина гравитационной водоотдачи для песчаных пород определяется как разность между полной и максимально-молекулярной влагоемкостями ( $\mu = \text{ПВ} - \text{ММВ}$ ). Физический смысл водоотдачи становится ясным из выражения

$$\mu = \frac{\Delta V_{\text{в}}}{\Delta H \cdot \uparrow F}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta V_{\text{в}}$  – изменение объема воды в пласте на участке площадью  $F$  при изменении уровня воды в пласте на  $\Delta H$ . Другими словами, водоотдача  $\mu$  характеризует объем воды, который отдаст 1 м<sup>2</sup> площади при снижении уровня на 1 м. Величина гравитационной водоотдачи для песчаных пород может быть определена по эмпирической формуле  $\mu = 0,117 \sqrt[3]{k}$ . Процессы водоотдачи и насыщения протекают не мгновенно, поэтому их показатели изменяются во времени. Приведенная формула характеризует предельные их значения.

Физический смысл коэффициента фильтрации может быть определен из уравнения

$$k = \frac{Q}{I \cdot \bar{F}}, \quad (1.2)$$

где  $Q$  – расход воды, фильтрующийся по пласту через поперечное сечение  $\bar{F}$  под воздействием напорного градиента  $I$ . Другими словами, коэффициент фильтрации численно равен расходу, идущему через поперечное сечение пласта  $F = 1 \text{ м}^2$  под влиянием напорного градиента  $I = 1$ .

Значения упругоемкости  $\beta^*$  изменяются в зависимости от литологического состава и глубин залегания пород. С увеличением глубины залегания водоносного пласта  $z$  этот параметр убывает по эмпирической зависимости

$$\beta^* = \frac{A}{z},$$

где  $A$  для песков и песчаников принимаем равным  $10^{-3}$ , а для глинистых пород –  $(2 \div 4) \cdot 10^{-2}$ .

Однородный пласт характеризуется условиями  $k = \text{const}$  и  $\mu = \text{const}$ , т.е. параметры не изменяются в плане и разрезе пласта. В неоднородном пласте  $k$  и (или)  $\mu$  изменяются. В плане возможны изменения по отдельным зонам, связанные с геологоструктурными (тектоника) или литолого-фациальными (условия седиментации) факторами. Такой пласт называется кусочно-неоднородным. Здесь размеры однородных участков обычно соизмеримы с размерами области фильтрации. Если же размеры однородных участков очень мелкие, то влияние каждого из них индивидуально учесть невозможно. В этом случае говорят о неоднородности высокого порядка, а пласт представляют как статически однородный, обычно, со среднегеометрическими значениями параметра. Для конусов выноса характерно постепенное изменение свойств, которое может быть выражено в виде линейного тренда. Если изменения параметров происходят в разрезе, говорят о слоистом строении пласта.

Среда называется гетерогенной, если пласт сложен породами, разбитыми крупными трещинами на блоки, которые в свою очередь трещиноватые и пористые. К гетерогенным можно отнести и песчано-глинистые слоистые пласты. Главное отличие таких пластов от однородных, гомогенных, в том, что проницаемость изменяется внутри рассматриваемого элементарного объема породы.

Коэффициент фильтрации слабопроницаемых водоупоров обозначают  $k_0$  [м/сут].

Параметры водоносных пластов характеризуют обобщенно весь пласт. К этим параметрам относятся: водопроводимость

$T = km$  (напорные) или  $T = kh$  (безнапорные) [ $\text{м}^2/\text{сут}$ ]; упругая водоотдача напорного пласта  $\mu^* = m \cdot \gamma \cdot \beta^*$ , уровеньпроводность  $a = \frac{T}{\mu}$  [ $\text{м}^2/\text{сут}$ ], пьезопроводность  $a^* = \frac{T}{\mu^*} = \frac{k}{\gamma \cdot \beta^*}$  [ $\text{м}^2/\text{сут}$ ], пара-

метр перетекания  $B = \sqrt{\frac{T \cdot m_0}{k_0}}$  [ $\text{м}$ ].

Характерные значения коэффициентов фильтрации, гравитационной и упругой водоотдачи для пород некоторых типов приведены в табл. 1.1.

**Границы области фильтрации** делятся на:

внешние, которыми область фильтрации отделяется от окружающей среды и через которые взаимодействует с этой средой (урез реки, водоупор, поверхность уровня грунтовых (безнапорных) вод);

внутренние, определяющие процессы внутри области фильтрации (границы неоднородного строения пласта, фильтры скважин).

Границы могут быть естественными (урез реки, родники, уровень грунтовых вод) и искусственными (фильтры скважин, подземные контуры инженерных сооружений, дрена, каналы, урезы водохранилищ).

Таблица 1.1

Характерные значения коэффициентов фильтрации, гравитационной и упругой водоотдачи

| Породы рыхлые                       | $k$ ,<br>м/сут | $\mu$       | $\beta^* \cdot 10^{-4}$ | Породы скальные                                                    | $k$ ,<br>м/сут | $\mu$      | $\beta^* \cdot 10^{-4}$ |
|-------------------------------------|----------------|-------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|------------|-------------------------|
| Пески средне- и крупнозернистые     | $10-10^2$      | 0,1–0,3     | 2–4                     | Известняки, песчаники сильно трещиноватые                          | $10-10^2$      | 0,02–0,05  | 1–5                     |
| Пески мелкозернистые, супеси легкие | 1–10           | 0,05–0,1    | 4–5                     | Песчаники, аргиллиты, известняки, изверженные породы, трещиноватые | 1–10           | 0,01–0,02  | 0,5–2                   |
| Суглинки, супеси                    | $10^{-3}-1$    | 0,01–0,05   | 5–10                    | Метаморфические и магматические породы, трещиноватые               | $10-10^{-2}$   | 0,005–0,01 | 0,1–1,0                 |
| Глины                               | $< 10^{-3}$    | $< 10^{-2}$ | 10–20                   | Метаморфические и магматические породы, слабо трещиноватые         | $< 10^{-2}$    | $< 0,005$  | 0,1–1,0                 |



Совершенными называют границы, обеспечивающие непосредственный контакт с пластом, при условии вскрытия ими водоносного пласта на всю мощность. К несовершенным относят границы при условии неполного вскрытия ими водоносного пласта и (или) в том случае, если между границей и водоносным пластом имеется дополнительная преграда в виде менее проницаемого слоя (рис. 1.2).

Абсолютным водоупором являются соли.

На границах области фильтрации должны быть заданы **границные условия** (ГУ). Эти условия могут быть четырех основных видов, их называют ГУ I, II, III и IV рода.

**ГУ I рода** существует на совершенной границе пласта с крупным водотоком. Это урез глубоких рек или канала, водохранилища, моря. Уровень воды на границе изменяется независимо от положения уровней внутри области фильтрации, при этом заранее известен закон изменения положения этого уровня во времени  $H = f(t)$ . Это всегда открытая граница. В частном случае  $H(t) = \text{const}$  и  $\Delta H(t) = 0$ , т.е. условие постоянства уровня воды на границе во времени.

**ГУ II рода** характеризует величину расхода воды, идущего через границу независимо от изменения уровней внутри области фильтрации, т.е.  $Q = f(t)$ . Примерами ГУ II рода являются инфильтрационное питание при глубоком залегании уровня воды, откачка воды насосом из скважины и т.п. Частный, но весьма распространенный, случай ГУ II рода – условие постоянного во времени расхода  $Q(t) = \text{const}$ ,  $W(t) = \text{const}$  или  $\Delta W(t) = 0$ . На закрытой границе пласта (водоупор, выклинивание пласта, контакт с непроницаемой породой) выполняется условие  $Q = 0$ . При отсутствии инфильтрационного питания на уровне грунтовых вод (УГВ) соблюдается условие  $W = 0$ .

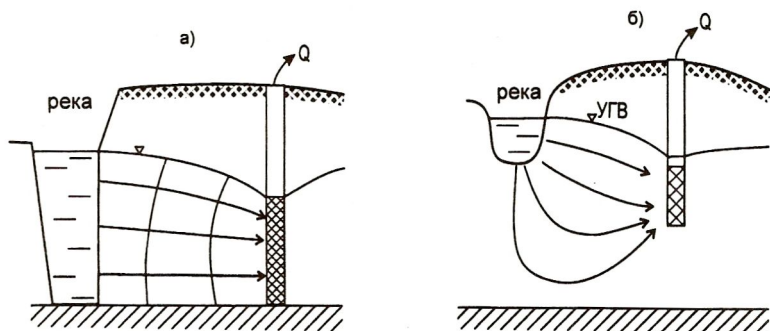


Рис. 1.2. Совершенные (а) и несовершенные (б) по степени вскрытия врез реки и фильтр скважины

ГУ III рода характеризует величину расхода воды, идущего через границу в зависимости от разности уровней на границе и в области фильтрации, т.е.  $Q = f(H_0 - H_{x,t})$ . Примерами ГУ III рода являются расход источника, величина испарения с уровня грунтовых вод, причем в этом случае  $H_0$  – отметка поверхности рельефа, водообмен подземных вод с несовершенной рекой, в русле которой залегает слой слабопроницаемых суглинков мощностью  $m_0$  и с коэффициентом фильтрации  $k_0$  (рис. 1.3). В последнем случае величина единичного расхода через русло реки определяется зависимостью  $q = \frac{k_0}{m_0}(H_{x,t} - H_0)$ , где  $H_0$  – уровень воды в реке;

$H_{x,t}$  – уровень воды в водоносном пласте, т.е. на подошве слоя суглинков. В том случае если  $H_{x,t} > H_0$ , то происходит разгрузка подземных вод в реку, если  $H_{x,t} < H_0$  – река питает водоносный пласт. Максимальные потери по речному стоку произойдут, если уровень  $H_{x,t}$  опустится ниже подошвы суглинков и будут равны  $q = \frac{k_0}{m_0}(h_0 + m_0)$ , где  $h_0$  – глубина воды в реке. При дальнейшем

снижении уровня  $H_{x,t}$  расход воды из реки в пласт останется неизменным  $q(t) = \text{const}$ . Аналогичным образом изменится расход источника, при  $H_{x,t} \leq H_0$  источник прекращает функционировать. Испарение прекращается при опускании уровня  $H_{x,t}$  ниже критической глубины от поверхности рельефа (обычно 2–4 м).

ГУ IV рода устанавливается на внутренних границах области фильтрации, обычно на границе неоднородного строения пласта.

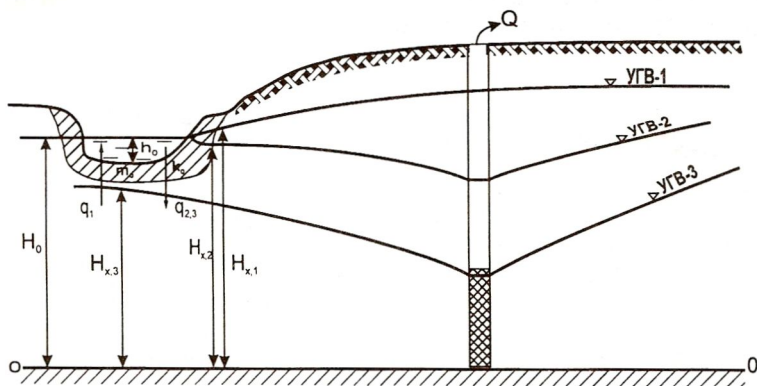


Рис. 1.3. Граничное условие III рода

Это условие характеризует неразрывность потока, т.е. равенство расходов до и после прохождения потоком этой границы  $Q_1 = Q_2$  или  $T_1 \frac{\partial H_1}{\partial x_1} = T_2 \frac{\partial H_2}{\partial x_2}$ , где все обозначения с индексом 1 характеризуют водоносный пласт с одной стороны границы, а с индексом 2 – с другой. Это ГУ используется для возможности выделения в сложно-построенной области фильтрации однородных фрагментов ( $k = \text{const}$ ,  $W = \text{const}$  и т.п.). Для каждого из этих фрагментов несложно записать уравнение, описывающее связь расхода и изменения уровня. ГУ IV рода используется как дополнительное уравнение, позволяющее соединить эти фрагменты во всей области фильтрации.

**Начальные условия**  $H(x, 0)$  представляют собой известное распределение уровней подземных вод внутри всей области фильтрации (в любой ее точке) на начальный момент времени ( $t = 0$ ) прогноза. Это распределение уровней должно отвечать стационарному режиму фильтрации и имеет смысл только при рассмотрении процессов последующего нестационарного режима на конец прогноза. Обычно начальные условия представляют собой естественное положение уровней до начала работы инженерного сооружения.

**Гидродинамические показатели процесса фильтрации** включают понятия напора над плоскостью сравнения –  $H$  [м], напорного градиента  $I$  [безразмерный], скорости фильтрации  $v$  [м/сут] и расхода воды  $Q$  [м<sup>3</sup>/сут], единичного расхода  $q$  [м<sup>2</sup>/сут].

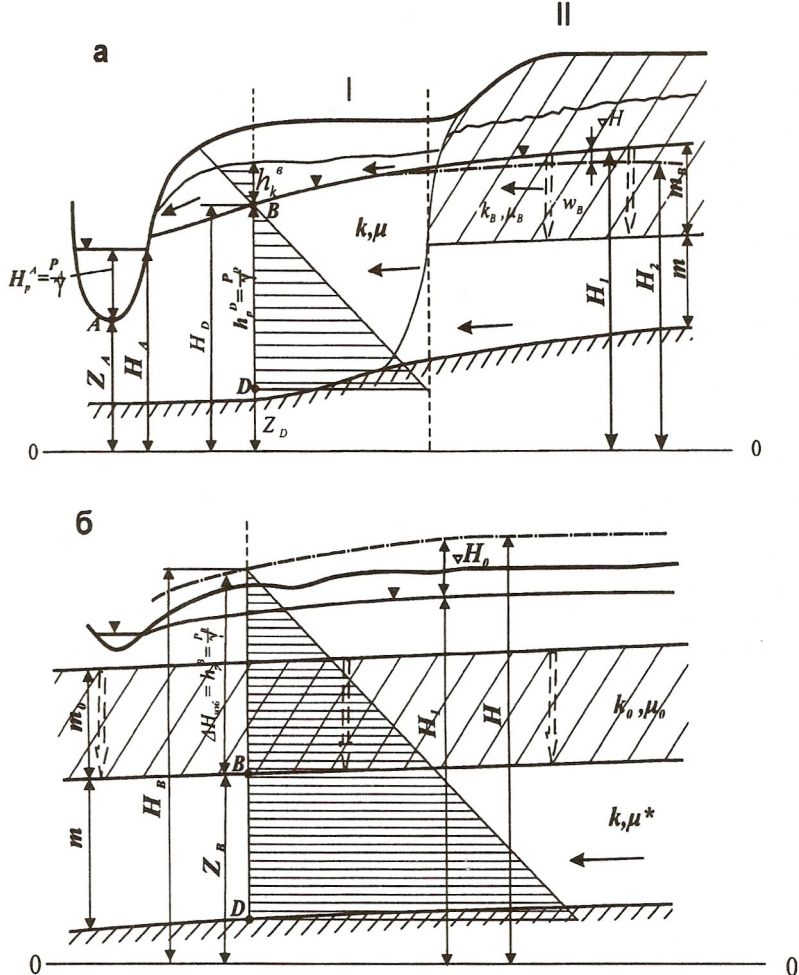
Напор подземных вод в точке  $A$  определяется по видоизменной формуле Бернулли

$$H = P_A / \gamma + z_A = h_A + z_A,$$

где  $P_A$  – давление в рассматриваемой точке  $A$  водоносного пласта;  $\gamma$  – удельный вес воды;  $z_A$  – высота точки  $A$  над горизонтальной плоскостью сравнения;  $h_A$  – пьезометрическая высота уровня воды над точкой  $A$ .

Эпюры давления для безнапорных и напорных вод разных видов и соотношение напоров в различных точках пласта показаны на рис. 1.4.

**Напорный градиент фильтрации** подземных вод равен отношению разницы напоров, измеренных в двух точках ( $H_1 - H_2$ ), к расстоянию между этими точками  $L_{1-2}$ . Для горизонтального (латерального) направления фильтрации имеем средний градиент потока  $I = \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}$ , для вертикального перетока через слабопро-



**Рис. 1.4. Гидродинамические особенности потоков (по И.К. Гавич [5]):**  
 Воды: аI – грунтовые; аII – субнапорные; б – напорные; заштрихована эпюра  
 распределения гидростатического давления в водоносном пласте и зоне капил-  
 лярной каймы

нимаемый слой имеем средний градиент  $I_z = \frac{H_A - H_B}{m_0}$ , где  $H_A$  и  $H_B$  – напоры в разных водоносных пластах, разделенных относительным водоупором мощностью  $m_0$ . Знак перед величиной напорного градиента показывает направление его действия относительно положительной оси координат.



Напорный градиент в любом сечении определяется  $I = -\frac{dH}{dx}$  или  $I = -\frac{dH}{dz}$ . Знак минус перед производной показывает, что направление градиента противоположно возрастанию  $H$ .

**Скорость фильтрации**  $v$  определяется согласно закону Дарси  $v = k \cdot I$ . Для вертикального перетока  $W_{\text{гл}} = v_z = k_0 \cdot I_z$  или  $W_{\text{гл}} = k_0 \frac{H_A - H_B}{m_0}$ . Так же, как и напорный градиент, скорость фильтрации  $v$  является вектором. Знак перед величиной  $v$  определяет направление фильтрации относительно выбранной системы координат.

Действительная скорость фильтрации  $U = \frac{v}{n_a} = \frac{k}{n_a} I$ . Учитывая, что всегда активная пористость  $n_a < 1$ , получаем  $U > v$ . Полезно помнить, что величина активной пористости  $n_a$  практически всегда равна гравитационной водоотдаче  $\mu$ , т.е.  $n_a \approx \mu$ .

**Расход фильтрационного потока** по пласту определяется как  $Q = v \cdot F = v \cdot m \cdot B$  или  $Q = v \cdot h \cdot B$ .

Используя выражение для скорости  $v$ , получаем  $Q = k \cdot I \cdot m \cdot B = T \cdot I \cdot B$ . Полный расход потока через относительный водоупор  $Q_z = W_{\text{гл}} \cdot \uparrow F = W_{\text{гл}} \cdot B \cdot L$  или, используя выражения для  $I_z$  и  $W_{\text{гл}}$ , имеем  $Q_z = k_0 \frac{H_A - H_B}{m_0} B \cdot L$ .

**Основными гидродинамическими состояниями пород** являются: водонасыщенное, неводонасыщенное, водоносное, водоупорное, относительно водоупорное. Степень водонасыщения характеризуется коэффициентом относительной влажности [1]

$$K_\theta = \frac{\theta_e}{\text{ПВ}}, \text{ где } \theta_e - \text{влажность пород, ПВ} - \text{полная влагоемкость.}$$

При водонасыщенном состоянии  $K_\theta \geq 0,9$  и влажность  $\theta$  практически равна полной влагоемкости. Такое состояние характерно для пород под уровнем грунтовых вод. При  $K_\theta < 0,9$  состояние неводонасыщенное, что свойственно породам зоны аэрации. Водонасыщенные породы по способности пропускать и отдавать гравитационную воду могут иметь три состояния: водоносное, водоупорное и относительно водоупорное. Критерии выделения этих состояний не одинаковы для горизонтального (по пласту) и вертикального (между пластами) направлений фильтрации и показаны в табл. 1.2.

Состояние пород по проницаемости и водоносности

| Состояние (характерные степени проницаемости) пород | Коэффициент фильтрации, м/сут |                           |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|                                                     | при горизонтальном движении   | при вертикальном движении |
| Водоносное (проницаемые)                            | 1–100                         | $>10^{-3}$                |
| Относительно водоупорные (слабопроницаемые)         | 0,1–1,0                       | $10^{-3}–10^{-7}$         |
| Водоупорные (практически непроницаемые)             | $<10^{-1}$                    | $<10^{-7}$                |

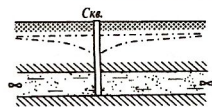
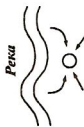
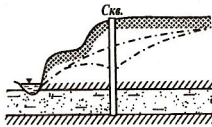
### ЗАДАЧА

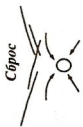
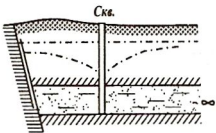
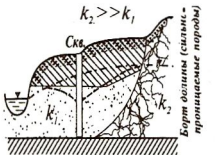
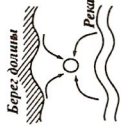
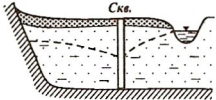
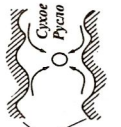
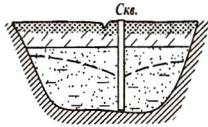
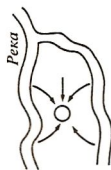
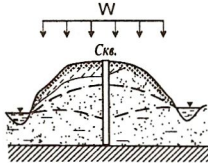
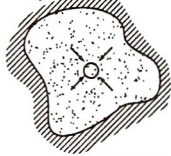
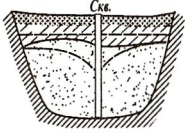
Охарактеризовать представленную в табл. 1.3 область фильтрации:

1. Выделить в качестве изучаемого объекта гидродинамическую систему, обозначить ее внешние и внутренние границы.
2. Охарактеризовать граничные условия на границах системы.
3. Определить гидравлический характер потока в пределах системы.
4. Подобрать значения параметров, характеризующих геометрические размеры области фильтрации.
5. Оценить характер неоднородности, присвоив значения параметров фильтрационных и емкостных свойств пород, пользуясь данными (см. табл. 1.1).
6. Оценить гидродинамическое состояние пород, пользуясь данными (см. табл. 1.2).

Таблица 1.3

Исходные данные вариантов задачи

| Номер варианта | Фильтрационная схема исследуемой области фильтрации                                 |                                                                                     |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                | План                                                                                | Разрез                                                                              |
| 1              |  |  |
| 2              |  |  |

| Номер<br>ва-<br>риан-<br>та | Фiltrационная схема исследуемой области фильтрации                                  |                                                                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | План                                                                                | Разрез                                                                              |
| 3                           |    |    |
| 4                           |    |    |
| 5                           |    |    |
| 6                           |    |    |
| 7                           |  |  |
| 8                           |  |  |

ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕТОК (ГДС)

**ГДС** – это совокупность линий тока (ЛТ) и линий равного напора (ЛН). ЛТ – линия, в каждой точке которой касательная является вектором скорости фильтрации. При стационарном режиме фильтрации ЛТ есть траектория движения частиц жидкости. ЛН – это линия, в каждой точке которой  $H = \text{const}$ , т.е. это – эквипотенциаль, гидроизогипса, изопьеза. По ЛН соблюдается условие  $dH/dx=0$ . Разные ЛТ, так же, как и ЛН, между собою не пересекаются. Все ЛТ и ЛН перпендикулярны друг к другу (рис. 2.1).

Две соседние ЛТ образуют ленту или трубку тока. Расход по ленте тока остается постоянным, так как ЛТ являются непроницаемыми границами, перпендикулярно к ЛТ расход равен нулю ( $q = 0$ ). ЛН проводятся через одинаковые сечения, расходы в разных лентах тока должны быть одинаковыми, т.е.  $\Delta H_j = \text{const}$

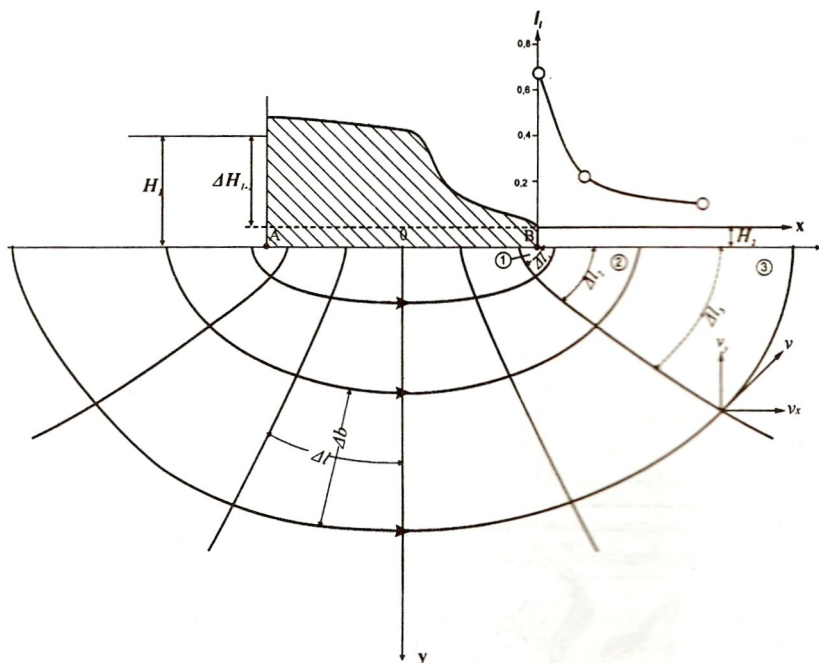


Рис. 2.1. Гидродинамическая сетка потока под плотинами (к задаче 2.2)



и  $q_i = \text{const}$ , где  $j = 1, 2, \dots, m$  – число сечений напора;  $i = 1, 2, \dots, n$  – число лент тока. Тогда общее изменение напора в области фильтрации  $\Delta H_{1-2} = m \cdot \Delta H_j$ , откуда  $\Delta H_j = \frac{\Delta H_{1-2}}{m}$ , а общая величина расхода  $Q = n \cdot q_i$ .

Две соседних ЛТ и две соседних ЛН образуют ячейку ГДС. Всего в ГДС должно быть  $m \cdot n$  ячеек. Среднее расстояние между ЛН обозначается  $\Delta l_{ji}$ , среднее расстояние между ЛТ –  $\Delta b_{ji}$ .

Величина напорного градиента фильтрации рассчитывается внутри каждой ячейки по зависимости  $I_{ji} = \frac{\Delta H_j}{\Delta l_{ji}}$ .

Для однородного пласта величина расхода по ленте тока может быть определена по любой из входящих в нее ячеек по зависимости:

для потока в плане (в плоскости  $xOy$ )

$$q_i = km \frac{\Delta H_j}{\Delta l_{ji}} \Delta b_{ji}; \quad (2.1)$$

для потока в разрезе (в плоскости  $xOz$ )

$$q_i = kB \frac{\Delta H_i}{\Delta l_{ji}} \Delta b_{ji}. \quad (2.2)$$

Из условия равенства расходов во всех ячейках ГДС для однородного пласта должно соблюдаться условие  $E = \Delta b_{ji} / \Delta l_{ji} = \text{const}$ , где  $E$  – коэффициент ГДС. Таким образом, все ячейки ГДС должны быть подобными прямоугольниками.

При построении ГДС следует соблюдать **правила построения ГДС** – определенную последовательность выполняемых действий.

1. Выделить граничные ЛН и ЛТ. Следует помнить, что все открытые границы (урезы рек, каналов, фильтр скважин, дренаи) являются ЛН, а все закрытые границы (водоупоры, выклинивание водоносных пластов, уровень грунтовых вод при  $W = 0$ ) являются ЛТ. Таким образом, вся область фильтрации может быть представлена как одна крупная ячейка ГДС.

2. Выявить наличие линии симметрии внутри области фильтрации, разделяющей область фильтрации на две равные части. При зеркальном отображении относительно этой линии все ЛТ и ЛН в одной части области фильтрации должны совпадать с такими же линиями в другой ее части. Всякая линия симметрии всегда будет либо ЛТ, либо ЛН. В сложных условиях линия симметрии отсутствует.

3. Разделить крайние ЛТ на  $m$  частей (число сечений ЛН), а

крайние ЛН на  $n$  частей (число трубок тока). Соединить противоположные точки на ЛТ и ЛН между собой. При этом следует стремиться к соблюдению условия ортогональности ЛН и ЛТ.

Проверить условие подобия ячеек ГДС, т.е. условие  $\frac{\Delta b_{ji}}{\Delta l_{ji}} = \text{const}$ . Внести необходимые исправления в конфигурацию ячеек.

**Анализ структуры потока по ГДС** выполняют следующим образом.

В междуречном массиве ЛТ параллельны друг другу, ячейки ГДС имеют вид близкий к правильным прямоугольникам. Это структура плоскопараллельного потока, фильтрация здесь линейная, область фильтрации однородная. Вблизи несовершенных урезом рек, вскрывающих водоносный пласт в верхней его части, структура потока нелинейная. Если на профиле ЛТ направлены по радиусам к урезу, тогда как ЛН имеют вид дуги окружности – это радиальная структура потока. При рассмотрении фильтрации воды к скважине на плане видим, что ЛТ направлены по радиусам к ее фильтру, а ЛН имеет вид окружностей. Фильтрация воды под плотиной в однородном пласте значительной мощности имеет радиальную структуру потока. Однако здесь ЛТ имеют вид дуг окружности, а ЛН – радиусов.

Сгущение ЛН (уменьшение  $\Delta l_{ji}$ ) свидетельствует об увеличении напорного градиента потока. В однородных пластах сгущение ЛН должно сопровождаться такими же сгущениями ЛТ, так как  $\Delta b_{ji}/\Delta l_{ji} = \text{const}$ , и является показателем увеличения плотности потока, в связи с уменьшением его ширины или мощности вблизи несовершенного уреза реки, либо вблизи скважины. В этих местах возрастают скорости движения, проходит основная часть расхода потока подземной воды (участок между рекой и водозаборной скважиной). Увеличение размеров ячеек ГДС свидетельствует об уменьшении скоростей фильтрации – это участки, откуда поступление подземных вод будет минимальным (водоразделы, закрытые границы и т.п.). В неоднородных пластах сгущение ЛН свидетельствует о переходе потока в область с более низкими значениями водопроницаемости (коэффициента фильтрации). Здесь происходит увеличение напорного градиента.

## ЗАДАЧИ

### Задача 2.1.

1. Построить ГДС потока.
2. Охарактеризовать структуру потока на различных участках области фильтрации.

3. Определить максимальные и минимальные значения напорного градиента и скорости фильтрации, указать причины изменения этих показателей на этих участках.

4. Определить величину расхода потока, идущего по одной ленте тока и в целом в пределах всей области фильтрации.

5. Варианты задачи показаны на рис. 2.2, значения параметров и гидродинамических показателей сведены в табл. 2.1.

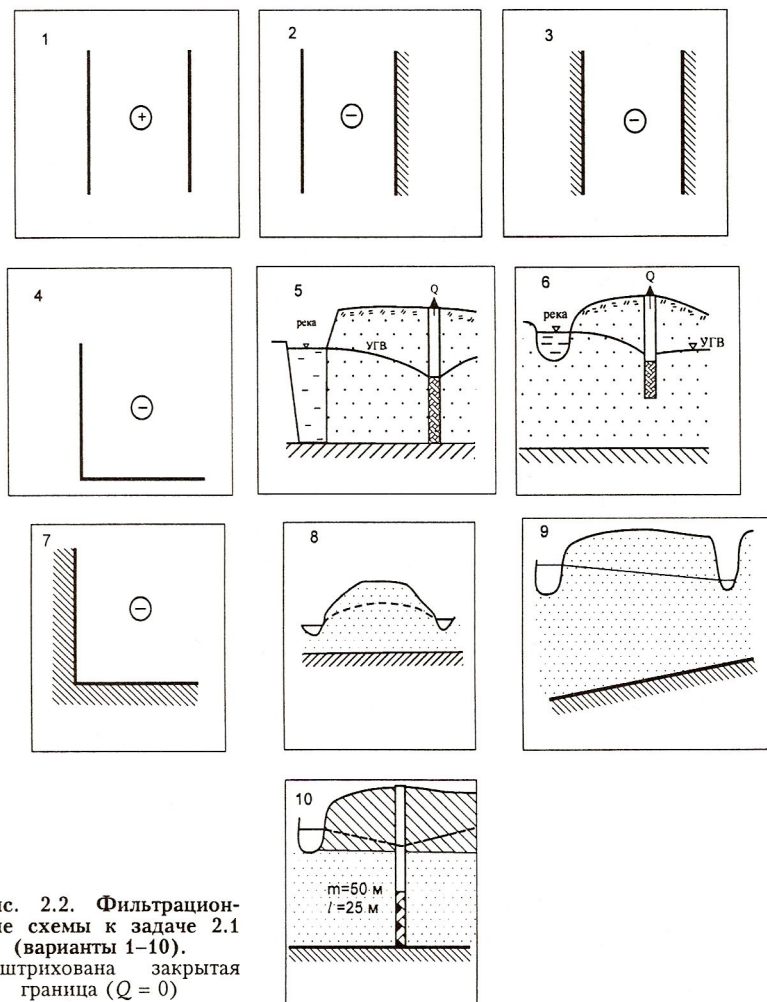


Рис. 2.2. Фильтрационные схемы к задаче 2.1 (варианты 1–10). Заштрихована закрытая граница ( $Q = 0$ )

Исходные данные вариантов задачи 2.1

| Номер варианта | $H_1$ , м | $H_2$ , м | $L$ , м | $H_c$ , м                       | $L_c$ , м              | Примечания                   |
|----------------|-----------|-----------|---------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1              | 80        | 80        | 200     | 100                             | 100                    |                              |
| 2              | 100       | –         | 200     | 70                              | 100                    |                              |
| 3              | –         | –         | 100     | 90                              | 50                     |                              |
| 4              | 100       | 100       | –       | 80                              | $x = 100$<br>$y = 100$ |                              |
| 5              | 120       | –         | –       | 80                              | 200                    |                              |
| 6              | 120       | –         | –       | 80                              | 200                    |                              |
| 7              | –         | –         | –       | 100                             | $x = 100$<br>$y = 200$ |                              |
| 8              | 50        | 70        | 120     | –                               | –                      |                              |
| 9              | –         | –         | 100*    | $H_{c1} = 90$<br>$H_{c2} = 110$ | –                      | *Расстояние между скважинами |
| 10             | 40        | 30        | 100     | –                               | –                      | Уклон водопроупора 0,005     |
| 11             | 120       | –         | –       | 100                             | 80,0                   |                              |

Примечание. Начало координат принято слева;  $L_c$  – расстояние от левой границы до оси скважин;  $H_1$  и  $H_2$  – уровни на левой и правой реках;  $H_c$  – уровень подземных вод в скважине; «+» – скважина работает как нагнетательная; «–» – скважина работает как водозаборная;  $H_n$  – отметка УГВ в точке водораздела;  $L_n$  – расстояние до водораздела.

### Задача 2.2.

1. Построить гидродинамическую сетку потока, формирующегося в песках под плотиной с плоским флютбетом длиной  $AB = 30$  м и имеющего напор в верхнем бьефе  $\Delta H_{1-2} = 12$  м. Мощность песков 100 м. Определить суммарный расход на фильтрацию под плотиной, приняв  $k = 10$  м/сут.

2. Построить эпюры распределения градиента потока в нижнем бьефе плотины и изменения напора по глубине.

*Решение.*

1. Примем число полос напора  $m = 6$ , число линий напора  $(m + 1) = 7$ . Приращение напора между двумя соседними ЛН  $\Delta H_j = \frac{\Delta H_{1-2}}{m} = \frac{12}{6} = 2,0$  м, что удобно для последующих вычислений.

Число лент тока примем равным 4, так, чтобы геометрический параметр ГДС был близок 1 ( $\Delta b_{ji} \sim \Delta l_{ji}$ ).

2. Примем линейный масштаб в 1 см 5 м (1:500) и нарисуем область фильтрации, приняв нижний бьеф за плоскость сравнения (см. рис. 2.1).

3. Граничными линиями напора являются урезы верхнего и



нижнего бьефов, где напор равен соответственно 14 и 2 м, граничная линия тока – подземный контур основания плотины (AB). Определим положение линии напора 8 м – она делит линию тока AB на две равные части. Оставшиеся линии тока и напора проводим так, чтобы получились криволинейные прямоугольники, проверяем их по условию  $\frac{l_{ij}}{b_{ij}}$ . Показаны только три

ленты тока (см. рис. 2.1).

4. По структуре поток близок к радиальному, двухмерный вектор скорости имеет две составляющие  $v_x, v_y$ .

5. Строим эпюру градиентов потока вдоль линии нижнего бьефа. Вычислим для ячеек значения  $I_{ij}$ , предварительно изменив в масштабе величины  $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_{ij}$ . Все данные заносим в табл. 2.2.

6. Приняв для градиентов вертикальный масштаб в 1 см 0,2 м, строим эпюру их распределения по линии нижнего бьефа (см. рис. 2.1).

7. Суммарный расход на фильтрацию под плотинной определяется для  $n = 4$  как  $Q = nq_i$ . Единичный расход одной ячейки  $q_i$  вычисляется по формуле (2.2) при  $B = 1$ .

Таблица 2.2

Определение суммарного расхода на фильтрацию под плотинной (к задаче 2.2)

| Номер ячеек в полосе напора | $\Delta l = \Delta b$ , м | $\Delta H_i$ | $I_i$ | $q_i$ , м <sup>2</sup> /сут | $Q_{\text{сум}}$ по всей полосе напора, $nq_i$ , м <sup>2</sup> /сут |
|-----------------------------|---------------------------|--------------|-------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1                           | 2,5                       | 2,0          | 0,80  | 20                          | 4·20 = 80                                                            |
| 2                           | 8,0                       | 2,0          | 0,25  | 20                          |                                                                      |
| 3                           | 17,0                      | 2,0          | 0,12  | 20                          |                                                                      |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### СХЕМАТИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ

#### 3.1. СХЕМАТИЗАЦИЯ И ЕЕ ЗАДАЧИ

**Схематизация гидрогеологических условий** – это их упрощение с целью построения расчетной схемы, применительно к выбранному методу решения задачи. Упрощение выполняется по-

следовательным анализом гидродинамических особенностей потока с использованием критериев, позволяющих качественно и количественно оценивать допустимость предполагаемого упрощения.

Задачи схематизации: а) выявить действующие факторы и границы, установить, какими из них в данной задаче можно пренебречь; б) уменьшить мерность и упростить структуру потока, тем самым свести пространственную фильтрацию к плановой или профильной, трех- или двухмерный поток – к одномерному; в) упростить форму границ потока и закон действующих на них граничных условий; г) неоднородное строение пласта свести к условно однородному или закономерно неоднородному; д) выявить зону активного влияния инженерного сооружения на динамику потока в плане и разрезе; е) оценить необходимость учета в расчетах вертикального водообмена (инфильтрационного питания и глубинного перетекания из соседних гидравлически связанных пластов) и форму его представления в расчетной схеме.

### 3.2. СХЕМАТИЗАЦИЯ, ЕЕ КРИТЕРИИ И ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Упрощение гидрогеологических условий ведется в следующей последовательности: 1) по условиям задачи строят гидрогеологический разрез и карту гидро- или пьезоизогипс, на которых показывают все элементы области фильтрации и гидродинамические особенности потока; 2) выбирают метод решения задачи; 3) анализируя особенности потока в порядке, указанном в табл. 3.1, устанавливают факторы, подлежащие схематизации; 4) оценивают по критериям табл. 3.2 возможность упрощения каждого фактора; 5) после выполнения схематизации устанавливают по табл. 3.1, 3.2 частное название полученной для каждого рассмотренного фактора расчетной схемы; 6) путем суммирования частных названий составляют окончательную расчетную схему, формулируют ее словесное название и рисуют ее графически.

Таблица 3.1

**Последовательность схематизации и виды потоков подземных вод**

| Но-<br>мер<br>п/п | Фактор схематизации                  | Вид потока                                      |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1                 | Гидравлическое состояние пласта      | Напорный, безнапорный, напорно-безнапорный      |
| 2                 | Вид фильтрации                       | Стационарный, квазистационарный, нестационарный |
| 3                 | Гидрогеологическая структура системы | Однопластовый, двухпластовый, многопластовый    |

| Но-<br>мер<br>п/п | Фактор схематизации                     | Вид потока                                                                                                                          |
|-------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4                 | Гидродинамическая структура по-<br>тока | Линейный, плоский (плановый, плос-<br>ко-вертикальный), пространственный,<br>радиальный, планово-радиальный                         |
| 5                 | Мерность потока                         | Одномерный, двухмерный, трехмер-<br>ный                                                                                             |
| 6                 | Вид питания и разгрузки                 | Сосредоточенный, рассеянный, сме-<br>шанный                                                                                         |
| 7                 | Тип водообмена                          | Горизонтальный, горизонтально-<br>вертикальный, вертикальный (ин-<br>фильтрационный, глубинный)                                     |
| 8                 | Уклон водоупора                         | Горизонтальный, наклонный, слож-<br>ный                                                                                             |
| 9                 | Мощность потока                         | Постоянной мощности, закономерно-<br>изменяющейся мощности, незаконо-<br>мерно изменяющейся мощности                                |
| 10                | Строение фильтрационной среды           | Однородный, закономерно-неодно-<br>родный (слоистый, двухслойный, ку-<br>сочно-однородный постепенно-меняю-<br>щийся), неоднородный |
| 11                | Влияние границ потока                   | Неограниченный, полуограниченный,<br>ограниченный                                                                                   |
| 12                | Форма границ потока                     | Пласт-квадрант, пласт-круг, слож-<br>ный, пласт-полоса, пласт-прямоуголь-<br>ник                                                    |
| 13                | Граничные условия                       | I рода, II рода, III рода, IV рода                                                                                                  |
| 14                | Степень вскрытия пласта                 | Совершенная, несовершенная                                                                                                          |

Таблица 3.2

## Последовательность схематизации и ее основные критерии

| Характеристика гидродинамиче-<br>ских условий                                                   | Критерий               | Расчетная схема                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <i>1. Тип режима фильтрации</i>                                                                 |                        |                                                                         |
| 1.1. В междуречье длиной $L$                                                                    | $t_c \geq 0,5L^2/a$    | Стационарная фильтра-<br>ция в междуречном мас-<br>сиве                 |
| 1.2. В полуограниченном пласте<br>на расстоянии $x$ от уреза                                    | $t_c \geq 100x^2/a$    | Стационарная фильтра-<br>ция в полуограниченном<br>пласте               |
| 1.3. На расстоянии $r$ от водоза-<br>борной скважины в неограни-<br>ченном изолированном пласте | $t_{кв} \geq 2,5r^2/a$ | Квазистационарная ради-<br>альная фильтрация в<br>неограниченном пласте |
| 1.4. В водозаборной скважине<br>на расстоянии $d$ от реки                                       | $t_c \geq 10d^2/a$     | Стационарная фильтра-<br>ция вблизи реки                                |



| Характеристика гидродинамических условий                                                                                                                                                                 | Критерий                                                                                        | Расчетная схема                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.5. В водозаборной скважине, в пласте с проводимостью $T$ , получающем питание из соседнего водообильного пласта, отделенного слабопроницаемым слоем мощностью $m_0$ и с коэффициентом фильтрации $k_0$ | $t_c \geq 3B^2/a$ ,<br>где $B = \sqrt{\frac{T \cdot m_0}{k_0}}$ –<br>параметр перетекания       | Стационарная фильтрация в пласте с перетеканием                                                                                                                                                       |
| 1.6. В водозаборной скважине с расходом $Q$ , в пласте, получающем дополнительное питание за счет инверсии разгрузки интенсивностью $\Delta W$                                                           | $t_c \geq \frac{2,5 \cdot Q}{\pi \cdot a \cdot \Delta W}$                                       | Стационарная фильтрация в круговом пласте с дополнительным питанием                                                                                                                                   |
| <i>2. Мерность и структура потока</i>                                                                                                                                                                    |                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                       |
| 2.1. Слоистая толща с коэффициентами фильтрации в хорошо проницаемых слоях $k_{\max}$ и слабопроницаемых $k_{\min}$                                                                                      | $\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \geq 100$                                                            | Фильтрация в хорошо проницаемых пластах только латеральная, в слабопроницаемых – только вертикальная. Замена пространственной структуры потока на плано-пространственную                              |
| 2.2. Фильтрация в междуречных пространствах в естественных и нарушенных условиях                                                                                                                         | Плановые размеры $L$ и $B$ потока значительно (более 10 раз) превышают мощность ( $h$ или $m$ ) | Предпосылка Дюпюи сохраняется, т.е. $v_{x z} = \text{const}$ . Плановая фильтрация, отсутствие вертикальной составляющей скорости $v_z = 0$                                                           |
| 2.3. Несовершенный врез реки в водоносный пласт. Несовершенство дрен в однородном пласте $\Delta L_n \leq h$ (мощность потока); в неоднородном пласте $\Delta L_n = (2 \div 3)h$                         | $\Delta L_n \leq 0,05L$<br>или<br>$\Delta L_n \leq 0,05l$                                       | Врез реки в пласт принимается совершенным                                                                                                                                                             |
| 2.4. Несовершенный врез реки в водоносный пласт                                                                                                                                                          | $\Delta L_n > 0,05L$<br>или<br>$\Delta L_n > 0,05l$                                             | Пласт с совершенным врезом реки, при этом длина области фильтрации $L'$ увеличивается на $\Delta L_n$ , т.е. $L' = L + \Delta L_n$ . В пределах всей области фильтрации сохраняется предпосылка Дюпюи |
| 2.5. Одиночная водозаборная скважина в неограниченном пласте                                                                                                                                             | Скважина совершенна (фильтр полностью вскрывает водоносный пласт)                               | Схема одномерной радиальной фильтрации по координате $r$ . Начало координат расположено в центре скважины. Радиус скважины – $r_0$                                                                    |



| Характеристика гидродинамических условий                     | Критерий                                                                 | Расчетная схема                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.6. Одиночная водозаборная скважина в неограниченном пласте | Скважина несовершенная, принимаем $\xi_{ис}$ – показатель несовершенства | Схема одномерной радиальной фильтрации по координате $r$ . Радиус скважин трансформируем в $r_{ип} = \alpha \cdot r_0$ , причем $\alpha = \ln \xi_{ис}$ , сохраняется предпосылка Дюпюи                                  |
| 2.7. Две и более скважины в ограниченных пластах             | Использование метода суперпозиции и отображения                          | Схема одномерной радиальной фильтрации по координате $r$ для учета влияния откачки из каждой скважины и каждой границы (отображенной скважины). Начало координат – в центре каждой скважины, влияние которой учитывается |

## 3. Гидравлическое состояние пласта

|                                                                                                                                              |                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.1. Осушение субнапорного пласта в пределах зоны радиуса $r^*$ с центром в водозаборной скважине в условиях напорно-безнапорной фильтрации  | $r^* \leq 0,1R_k$<br>или<br>$r^* \leq 0,01R_{вл}(t)$                                                          | Откачка из скважины в напорном водоносном пласте, безнапорной фильтрацией вблизи скважины пренебрегаем                                                                                                                              |
| 3.2. Осушение субнапорного пласта в закрытой структуре под влиянием водозабора из подземных вод в условиях напорно-безнапорной фильтрации    | $\mu^* \cdot H_{изб} \leq 0,05 \mu \cdot m$<br>$\mu^* \cdot H_{изб} \cdot \uparrow F \leq 0,1 Q \cdot t_{эк}$ | Водоотбор из скважины в безнапорном водоносном пласте с начальным уровнем, соответствующим положению кровли этого пласта                                                                                                            |
| 3.3. Эксплуатация водозабора в напорном пласте на расстоянии $l$ от границы области шириной $b$ , где пласт приобретает безнапорный характер | $t \leq \frac{l^2}{a^*}$<br>$t > \frac{l^2}{a^*}$<br>$t > 5 \frac{(\mu \cdot b)^2}{k \cdot m \cdot \mu^*}$    | Полуоткрытый пласт с граничным условием $H = \text{const}$ ( $\dot{S} = 0$ ) на линии границы напорно-безнапорных вод<br>Неограниченный напорный пласт<br>Полуограниченный пласт с закрытой границей по контуру выклинивания пласта |

## 4. Характер залегания водоупорного ложа

|                                                                                            |                |                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Условие залегания водоупорного ложа $i$ для грунтовых вод:<br>4.1. Горизонтальный водоупор | $i \leq 0,001$ | Водоупор принимается горизонтальным, залегающим на отметке $z_{ср} = 0,5(z_1 + z_2)$ , при этом $h_1 = H_1 - z_{ср}$ и $h_2 = H_2 - z_{ср}$ |
| 4.2. Наклонный водоупор                                                                    | $i \leq 0,001$ | Уклон водоупора учитывается в расчетной схеме                                                                                               |

| Характеристика гидродинамических условий                                                                                   | Критерий                                                                                                                      | Расчетная схема                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>5. Характер изменения мощности безнапорного пласта</b>                                                                  |                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Безнапорный поток с изменяющейся мощностью $\Delta H$ в зависимости от отношения к среднеарифметическому значению $h_{cp}$ | $\Delta H \leq 0,25h_{cp}$ $\Delta H > 0,25h_{cp}$                                                                            | Безнапорный поток постоянной мощности $h_{cp}$ , используются расчетные схемы для напорных вод<br>Расчетная схема безнапорного пласта, при использовании формул для напорных вод применяется напорная функция                                                             |
| <b>6. Характер строения фильтрационной среды</b>                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 6.1. Незакономерное изменение $k$ или $T$                                                                                  | $\frac{k(T)_{\max}}{k(T)_{\min}} \leq 2$                                                                                      | Однородное строение пласта                                                                                                                                                                                                                                                |
| 6.2. Слоистое строение разреза при латеральной фильтрации                                                                  | $2 < \frac{k_{\max}}{k_{\min}} \leq 20$                                                                                       | Условно-однородный пласт $k_{cp} = \frac{\sum k_i \cdot m_i}{\sum m_i}$                                                                                                                                                                                                   |
| 6.3. Кусочно-однородное строение пласта при фильтрации перпендикулярно к границе неоднородности                            | $2 < \frac{k_{\max}}{k_{\min}} \leq 20$                                                                                       | Условно-однородный пласт $k_{cp} = \frac{\sum l_i}{\sum \frac{l_i}{k_i}}$                                                                                                                                                                                                 |
| 6.4. Постепенное изменение фильтрационных свойств или мощности пласта $m$ , ширины потока $B$                              | $k_x = k_1 - \frac{k_1 - k_2}{L_{1-2}} x$ $m_x = m_1 - \frac{m_1 - m_2}{L_{1-2}} x$ $B_x = B_1 - \frac{B_1 - B_2}{L_{1-2}} x$ | Условно-однородный пласт<br>$k_{cp} = \frac{k_1 - k_2}{\ln k_1 - \ln k_2}$ $m_{cp} = \frac{m_1 - m_2}{\ln m_1 - \ln m_2}$ $B_{cp} = \frac{B_1 - B_2}{\ln B_1 - \ln B_2}$                                                                                                  |
| 6.5. Неоднородный пласт с резким изменением водопроницаемости в латеральном направлении                                    | $\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \geq 100$                                                                                          | Для инженерного сооружения, расположенного в пределах зоны с $T_{\max}$ , на границе неоднородности $Q = 0$ (закрытая граница). Для инженерного сооружения, расположенного в пределах зоны с $T_{\min}$ , на границе неоднородности $H = \text{const}$ (открытая граница) |
| <b>7. Соотношение горизонтального и вертикального водообмена</b>                                                           |                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 7.1. В безнапорных водах с инфильтрационным питанием $W$                                                                   | $\frac{W \cdot L_{1-2}}{2} \leq 0,1kh_{cp} \frac{\Delta H_{1-2}}{\Delta L_{1-2}}$                                             | $W = 0$ – только латеральная фильтрация                                                                                                                                                                                                                                   |

| Характеристика гидродинамических условий                                                                                                                                  | Критерий                                                                                                                                                                                                                                          | Расчетная схема                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                           | $\frac{W \cdot L_{1-2}}{2} \geq$ $\geq 10kh_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{1-2}}{\Delta L_{1-2}}$ $10kh_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{1-2}}{\Delta L_{1-2}} > \frac{W \cdot L_{1-2}}{2} >$ $> 0,1kh_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{1-2}}{\Delta L_{1-2}}$ | <p>Только вертикальная фильтрация, расход латеральной фильтрации равен 0</p> <p>Горизонтально-вертикальный водообмен</p>                                                                                                                                                              |
| <p>7.2. В пластах с перетеканием интенсивностью <math>W_{\text{гл}} = \frac{k_0}{m_0} \Delta H_z</math> и параметром перетекания</p> $B = \sqrt{\frac{T \cdot m_0}{k_0}}$ | $\frac{W_{\text{гл}} \cdot L_{1-2}}{2} \leq$ $\leq 0,1T \frac{\Delta H_{1-2}}{L_{1-2}}$ <p>или</p> $\frac{(L_{1-2})^2 \cdot \Delta H_z}{B^2 \cdot \Delta H_{1-2}} \leq 0,1$                                                                       | <p>Изолированный пласт</p> <p>или влиянием питающего пласта на прогноз инженерного сооружения можно пренебречь</p>                                                                                                                                                                    |
| 7.3. В пластах с перетеканием                                                                                                                                             | $\frac{(L_{1-2})^2 \cdot \Delta H_z}{B^2 \cdot \Delta H_{1-2}} \leq 10$                                                                                                                                                                           | <p>Двухпластовая система может быть представлена в виде одного пласта с суммарными значениями <math>T</math> и <math>\mu</math></p>                                                                                                                                                   |
| <i>8. Расположение границ пласта</i>                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 8.1. Междуречный массив шириной $L_{1-2}$ с однородными ( $H = \text{const}$ ) или разнородными ( $H_1 = \text{const}, Q_2 = 0$ ) границами                               | <p>Инженерное сооружение смещено к одной границе с <math>H = \text{const}</math>, причем</p> $d \leq 0,4 \cdot L_{1-2}, \text{ где}$ <p><math>d</math> – расстояние до реки</p>                                                                   | <p>Полуоткрытый пласт с <math>H = \text{const}</math>. Второй границей можно пренебречь</p>                                                                                                                                                                                           |
| 8.2. Скважина в ограниченном пласте шириной в плане $B$ и длиной $L$ с закрытыми границами ( $Q = 0$ ) или с открытыми границами ( $H = \text{const}$ )                   | $\frac{L}{B} < 3$<br><br><br>$3 \leq L/B \leq 10$<br><br>$L/B > 10$                                                                                                                                                                               | <p>Пласт-круг с закрытыми границами радиусом</p> $R = \frac{P}{2\pi} \text{ или}$ $R = \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}},$ <p>где <math>P</math> – периметр границ</p> <p>Пласт-прямоугольник шириной <math>B</math>, длиной <math>L</math></p> <p>Пласт-полоса шириной <math>B</math></p> |

| Характеристика гидродинамических условий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Критерий                                                                                          | Расчетная схема                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>9. Граничные условия</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                   |                                                                                                                         |
| 9.1. Колебания уровня воды в реке $\Delta H(0, t)$ при оценке стационарного режима фильтрации                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\Delta H(0, t) \leq 0,1\Delta H_{1-2}$ ,<br>где $\Delta H_{1-2}$ – разница уровней на междуречье | ГУ I рода: $H(0, t) = \text{const}$<br>или $\Delta H(0, t) = 0$                                                         |
| 9.2. Колебания воды в реке $\Delta H(0, t)$ при подпоре $\Delta H^0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\Delta H(0, t) \leq 0,1\Delta H^0$ ,<br>где $\Delta H^0$ – общая величина подпора уровня в реке  | ГУ I рода: $\Delta H^0 = \text{const}$<br>или $\Delta H^0 = v \cdot t$                                                  |
| 9.3. Колебания величины расхода воды из скважины $\Delta Q(t)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $\Delta Q(t) \leq 0,1Q(t)$ ,<br>где $Q(t)$ – средняя величина расхода при откачке                 | ГУ II рода: $Q(t) = \text{const}$<br>$\Delta Q(t) = 0$                                                                  |
| 9.4. Колебания величины инфильтрационного питания $\Delta W(t)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $\Delta W(t) < 0,25W(t)$ ,<br>где $W(t)$ – средняя величина инфильтрационного питания             | ГУ II рода: $W(t) = \text{const}$ ,<br>$\Delta W(t) = 0$                                                                |
| 9.5. Инверсия разгрузки источника. Начальные условия<br>$(Q_{\text{и}})^0 = \frac{H^0 - H_0}{\Phi_{\text{и}}}$ . Здесь $H^0$ – начальный уровень; $H_0$ – отметка рельефа в рассматриваемом граничном сечении; $\Phi_{\text{и}}$ – фильтрационное сопротивление разгрузки, $\Phi_{\text{и}} = \frac{m}{k_0 \cdot b \cdot l}$ ;<br>$H(t)$ – текущий уровень подземных вод в этом же сечении | $H(t) \geq (H_0)$<br><br>$H(t) < H_0$                                                             | ГУ III рода:<br>$\Delta Q = \frac{H^0 - H(t)}{\Phi_{\text{и}}}$<br>ГУ II рода:<br>$Q = (Q_{\text{и}})^0 = \text{const}$ |
| 9.6. Инверсия испарения с уровня грунтовых вод. Начальные условия $(Q_z)^0 = \frac{H^0 - H_{\text{кр}}}{\Phi_z}$ . Здесь $H_{\text{кр}}$ – отметка критической глубины уровня, ниже которого прекращается испарение; $\Phi_z$ – фильтрационное сопротивление, определяемое экспериментально, остальные обозначения прежние                                                                 | $H(t) \geq H_{\text{кр}}$<br><br>$H(t) < H_{\text{кр}}$                                           | ГУ III рода:<br>$Q = \frac{H^0 - H(t)}{\Phi_z}$<br>ГУ II рода:<br>$Q = (Q_z)^0 = \text{const}$                          |



| Характеристика гидродинамических условий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Критерий                                                                                                         | Расчетная схема                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>9.7. Взаимосвязь подземных вод с поверхностными водами реки.</p> <p>Начальные условия <math>(Q_p)^0 =</math></p> $= \frac{H^0 - H_p}{\Phi_p}.$ <p>При <math>H^0 &lt; H_p</math> подземные воды получают питание из реки. Здесь <math>H_p</math> – отметка уровня воды в реке; <math>\Phi_p</math> – фильтрационное сопротивление русловых отложений,</p> $\Phi_p = \frac{m_0}{k_0 \cdot b \cdot l};$ <p><math>h_0</math> – глубина уровня воды в реке; <math>m_0</math> и <math>k_0</math> – соответственно мощность и коэффициент фильтрации русловых отложений; <math>b</math> – ширина реки</p> | <p><math>H(t) \geq (H_p - m_0 - h_0)</math></p> <p><math>H(t) &lt; (H_p - m_0 - h_0)</math></p>                  | <p>ГУ III рода:</p> $\Delta Q = \frac{H^0 - H(t)}{\Phi_p} \text{ или}$ $Q = \frac{H_p - H(t)}{\Phi_p}$ <p>ГУ II рода:</p> $Q = k_0 \frac{H^0 - H_p + m_0 + h_0}{\Phi_p}$ <p>или <math>Q_{\text{нпв}} = \text{const}</math></p> |
| 10. Влияние внешних границ пласта (нестационарная фильтрация)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                |
| 10.1. В междуречном массиве длиной $L_{1-2}$ для плоскопараллельной фильтрации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p><math>L_{1-2} &gt; R(t)</math>, где</p> $R(t) = 4\sqrt{a \cdot t},$ <p><math>R(t)</math> – радиус влияния</p> | Полуограниченный пласт. Удаленная граница не влияет                                                                                                                                                                            |
| 10.2. Радиальная фильтрация к скважине, расположенной на расстоянии $L$ от границы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p><math>L &gt; R(t)</math>, где</p> $R(t) = 1,5\sqrt{a \cdot t}$                                                | Неограниченный пласт                                                                                                                                                                                                           |

## ЗАДАЧИ

### Задача 3.1.

Для области фильтрации (рис. 3.1) провести схематизацию гидрогеологических условий в естественных условиях в междуречье и построить расчетную схему, пользуясь последовательностью (см. табл. 3.1) и критериями (см. табл. 3.2).

*Решение.*

1. Поток грунтовых вод развит на междуречье. Примем контуры рек в плане прямолинейными, тогда все гидроизогипсы параллельны друг другу. Естественный поток будем изучать аналитическим методом, поэтому максимально упростим гидрогеологические условия.

2. Анализируем гидродинамические особенности потока со-

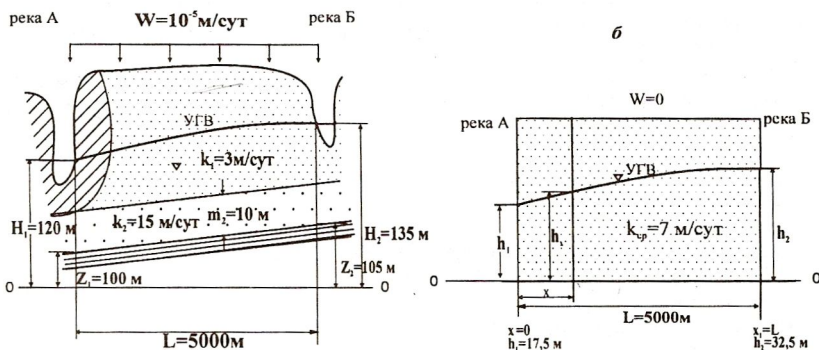


Рис. 3.1. Фильтрационная (а) и расчетная (б) схемы к задаче 3.1

гласно разделам 3.1 и 3.2. Как видно из условия задачи, изучается стационарная фильтрация грунтовых вод в слоистом неоднородном пласте с наклонным водоупором. Поток имеет инфильтрационное питание, несовершенные внешние границы (урезы рек А и Б), через слой делювия дренируется река А, тип водообмена – горизонтально-вертикальный. Схематизации подлежат: структура и мерность потока, положение водоупора, тип водообмена, строение пласта.

3. Используя критерии (см. табл. 3.2), упростим структуру и мерность потока. Пространственную фильтрацию можно свести к плоской, так как средняя мощность потока ( $h_{cp} = 25$  м) существенно меньше его длины ( $L = 5000$  м). Упростим несовершенные границы рек А и Б, заменив их совершенными границами, используя критерий (2.3). Так как  $\Delta L \approx 75$  м, критерий (2.3) выполняется ( $75 < 250$ ). Поток имеет совершенные прямолинейные границы и сводится к плоскопараллельной фильтрации с постоянной шириной в плане 1 м, т.е. фильтрация одномерная, линейная.

Вычислим уклон водоупора:  $i = (105 - 100)/5000 = 0,001$ , критерий (4.1) выполняется и  $i = 0$ . Примем отметку водоупора равной 102,5 м.

Вычислим критерий водообмена  $K_{во}$  по условию (7.1) (см. табл. 3.2). Предварительно определим  $T_{cp} = k_{cp} \cdot h_{cp}$ ; при  $k_{cp} = (15 + 3)/2 = 9$  м/сут  $T_{cp} = 9 \cdot 25 = 225$  м<sup>2</sup>/сут. Значение  $\Delta H = H_2 - H_1 = 135 - 120 = 15$  м, откуда  $k_{во} = (25 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5}) / (225 \cdot 15) = 0,07$ . Согласно критерию (7.1) пренебрегаем вертикальным водообменом, поток имеет только горизонтальный водообмен. Оценим возможность сведения среды к условно-однородной с  $k_{cp}$ . Вычислим критерий (6.2), имеем:  $k_1/k_2 = 15/3 = 5$ , что меньше 20. Движение

воды идет параллельно слоистости и по (6.2)  $k_{\text{ср}} = (3 \times 15 + 15 \cdot 10)/25 = 7,8$  м/сут (при средней отметке водоупора 102,5 м мощность потока в верхнем слое у реки Б 22,5 м, у реки А 7,5 м и  $h_{1\text{ср}} = 15$  м).

4. В результате схематизации имеем одномерную, линейную стационарную фильтрацию в условно-однородной среде с  $h_{\text{ср}} = (120 - 102,5 + 135 - 102,5)/2 = 25$  м,  $k_{\text{ср}} = 7,8$  м/сут, при  $i = 0$ ,  $W = 0$ . Полученная расчетная схема представлена на рис. 3.1, б. По этой схеме выбирается уравнение, позволяющее количественно решить поставленную задачу. Для естественных условий расчетным является уравнение Дюпюи, приведенное в лабораторной работе № 4:

$$h_x = \sqrt{h_1^2 + \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} x}.$$

Оно позволяет построить кривую депрессии в естественных условиях.

5. Оценим погрешность схематизации. Воспользуемся для этого приведенным в лаборной работе № 4 уравнением расхода потока при наличии инфильтрационного питания (4.21) и без него (4.5):

$$q_1 = k \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2L} - \frac{W \cdot L}{2}.$$

Здесь первый член характеризует расход при  $W = 0$ , второй — влияние инфильтрационного питания. Имеем

$$q_1 = 7,8 \frac{17,5^2 - 32,5^2}{1000} - \frac{10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^2}{2} = -0,58 - 0,025 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Сравнение полученных цифр показывает, что доля расхода, созданного инфильтрацией (0,025 м<sup>2</sup>/сут), составляет 5 % от расхода при  $W = 0$  и инфильтрацией можно пренебречь.

### Задача 3.2.

Для оценки естественных условий в той же области фильтрации, которая показана на рис. 3.1, провести схематизацию гидродинамических условий и построить расчетную схему, если  $W = 10^{-4}$  м/сут,  $k_2 = 0,01$  м/сут. Найти уравнение, пользуясь которым можно построить кривую депрессии.

### Задача 3.3.

Провести схематизацию гидрогеологических условий и построить расчетную схему (разрез, план) для области фильтрации, показанной на рис. 3.2. Это долина реки, где развиты пойма и надпойменная терраса, сложенные песками: пойма с  $k_1 = 2$  м/сут, терраса с  $k_2 = 10$  м/сут,  $\mu = 0,1$ .

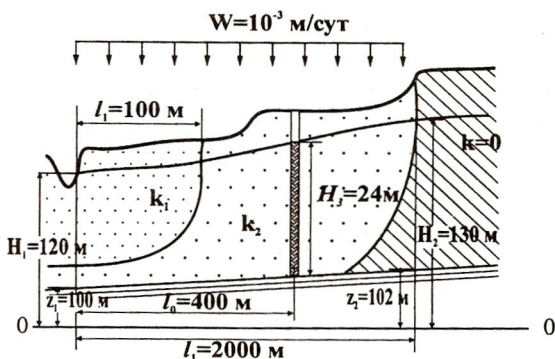


Рис. 3.2. Фильтрационная схема к задаче 3.3

### Задача 3.4.

В рассматриваемой области фильтрации (задача 3.3) планируется эксплуатация водозаборной скважины, располагающейся на расстоянии 100 м от уреза реки А с расходом  $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Охарактеризовать изменения режима фильтрации во времени и определить, какие расчетные схемы следует использовать для оценки понижения уровня в скважине на прогнозные периоды  $t_1 = 5 \text{ сут}$ ,  $t_2 = 50 \text{ сут}$ ,  $t_3 = 500 \text{ сут}$ .

#### Решение.

1. Так как скважина расположена рядом с рекой А, из которой она будет получать основное питание, размеры рассматриваемой области фильтрации могут быть существенно уменьшены (см. табл. 3.2, критерий 8.1). Достаточно рассматривать изменения режима подземных вод на расстоянии, не превышающем тройного расстояния скважины от реки, т.е. 300 м. Река Б влияния на режим работы скважины не оказывает. В пределах этой области пласт характеризуется однородным строением с коэффициентом фильтрации  $k = 2 \text{ м/сут}$ . Среднее значение мощности может быть принято  $h_{\text{ср}} = 20 \text{ м}$ .

2. Определяем величину уровнепроводности пласта по формуле

$$a = \frac{2 \cdot 20}{0,1} = 400 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

3. Величина показателя несовершенства реки  $\Delta L_{\text{н}}$  не превышает 20 м. Однако, в связи с существенным сокращением размеров области фильтрации, согласно критерию 2.4 (см. табл. 3.2), величину несовершенства следует учитывать в расчетах.





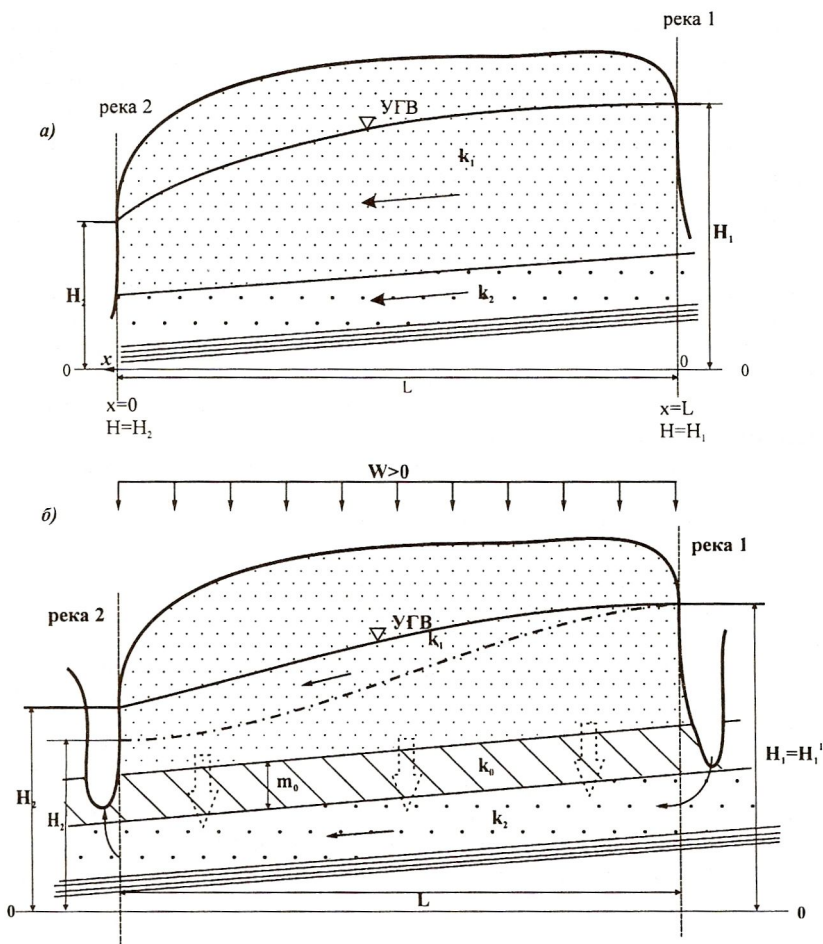


Рис. 3.4. Фильтрационные схемы к задаче 3.6

оценки подпора уровня на междуречье и фильтрационного расхода из водохранилища на периоды времени  $t_1 = 500$  сут,  $t_2 = 2000$  сут,  $t_3 = 8000$  сут.

*Решение.*

1. Влияние от повышения уровня на одной из рек распространится со временем на территорию всего междуречья. Поэтому средние значения расчетных параметров пласта определяем с учетом подпора:

$$h_{\text{ср}} = \frac{22,5 + 32,5}{2} = 27,5 \text{ м};$$

$$T_{\text{ср}} = 7,0 \cdot 27,5 = 192,5 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$a = 192,5/0,1 = 1925 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

2. Влияние реки Б на повышение уровня в междуречном массиве оцениваем по критерию 10.1 (см. табл. 3.2), полагая  $R(t) = L$ . Тогда  $t_{\text{вл}} = 0,06 \cdot 5000^2/1925 = 779$  сут, т.е. в течение 779 сут подпор будет происходить в условиях полуограниченного пласта.

3. Время наступления стационарного режима фильтрации определим согласно критерию 1.1 (см. табл. 3.2)

$$T_{\text{с}} = 0,5 \cdot 5000^2/1925 = 6494 \text{ сут или } 17,8 \text{ лет}.$$

4. Очевидно, что для периода  $t_1 = 500$  сут следует использовать расчетную схему для нестационарного подпора в полуограниченном пласте, для  $t_2 = 2000$  сут – расчетную схему нестационарного подпора в ограниченном пласте, для  $t_2 = 8000$  сут – схему стационарного подпора в ограниченном пласте.

### **Задача 3.6.**

Провести схематизацию гидрогеологических условий, показанных на рис. 3.4, так, чтобы в результате была построена одна расчетная схема: стационарная одномерная линейная фильтрация грунтовых вод в однородном ограниченном пласте-полосе при  $i = 0$ ,  $W = 0$ . Для этого следует предварительно задать на схемах (см. рис. 3.4) числовые значения всем исходным параметрам, руководствуясь критериями табл. 3.2.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

#### **4.1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

При исследовании динамики потоков подземных вод определяют их основные гидродинамические показатели –  $H$ ,  $q$ ,  $v$ ,  $I$ . Влияние различных факторов на динамику потоков устанавливается сопоставительным анализом результатов оценки их гидродинамических показателей, полученных по типовым расчетным схемам, которые отвечают различным гидрогеологическим условиям. Выявленные закономерности отображаются построением графиков, главными из которых являются  $h = f(x, t)$ ;  $q = f(x, t)$ .

При изучении динамики естественных потоков решаются следующие задачи: 1) определяется расход подземных вод как оценка естественных ресурсов; 2) строится и выявляется форма кривой уровня; 3) исследуется влияние различных факторов на динамику подземных вод и, в первую очередь, на их расход, условия питания и разгрузки, формирование кривой уровня, взаимосвязь подземных вод с поверхностными; 4) определяется показатель гидродинамического несовершенства вреза поверхностных водотоков в водоносный пласт; 5) оцениваются ошибки за счет допущений, принимаемых при схематизации гидрогеологических условий.

При изучении динамики подземных вод в зоне водохранилищ и каналов, имеющих непосредственную гидравлическую связь с подземными водами, выполняется оценка стационарного и нестационарного подпора грунтовых вод, и устанавливаются стадии его формирования во времени; определяются величины фильтрационного расхода и потерь, идущих через урез водохранилища или канала, и выявляются закономерности их формирования во времени.

Для горизонтальных дрен определяется расход потока, поступающего в дренаж (дренажный модуль); выявляется скорость и характер дренирования, т.е. снижение уровня грунтовых вод и изменение положения депрессионной кривой во времени. От формул, полученных для потоков грунтовых вод с горизонтальным водоупором ( $h^2/2$ ), можно перейти к аналогичным формулам для потоков с напорными водами или грунтовыми с наклонным водоупором ( $mH$ ), заменив функцию напора по зависимости  $u = h^2/2 = Hm$ .

#### 4.2. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ

В табл. 4.1 приведены основные расчетные зависимости для определения единичного  $q$  или полного  $Q$  расходов подземного потока, его мощности  $h$  или отметок пьезометрической кривой  $H$  в различных гидрогеологических условиях при горизонтальном  $i = 0$  и наклонном  $i \geq 0$  залегании водоупора. Формулы для определения отметок кривой депрессии  $H_x$  или мощности пласта  $h_x$  получают из равенства расходов на участке  $L_{1-2}$  и  $L_{1-x}$ , т.е.  $q_{1-2} = q_{1-x}$ .

Потоки с неоднородным строением схематизируются в условно-однородный пласт при соблюдении критерия (см. табл. 3.2, п. 6). Вначале в этом случае определяют расход на междуречье с



Расчетные зависимости для изучения потоков с однородным строением ( $W=0$ )

| Расчетная схема                                                                                     | Формулы для определения                                                                                                                                                     |                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                     | расхода потока                                                                                                                                                              | мощности или отметки пьезометрической кривой                                                                                      |
| 1. Напорный поток с постоянной мощностью (рис. 4.1, а)                                              | $q = km \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \quad (4.1)$                                                                                                                              | $H_x = H_1 - \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \cdot x \quad (4.2)$                                                                       |
| 2. Грунтовый поток с наклонным водоупором (рис. 4.1, б)                                             | $q = k \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} \quad (4.3)$                                                                                                     | $h_x = \sqrt{h_1^2 - ix \cdot (h_1 - 0,25ix) - \frac{2q}{k} \cdot x - 0,5ix} \quad (4.4)$                                         |
| 3. Грунтовый поток с горизонтальным водоупором (рис. 4.1, в)                                        | $q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} \quad (4.5)$                                                                                                                          | $h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{(h_1^2 - h_2^2) \cdot x}{L_{1-2}}} \quad (4.6)$                                                        |
| 4. Напорный поток с мощностью, меняющейся по линейному закону                                       | $q = k \cdot \frac{m_1 - m_2}{\ln m_1 - \ln m_2} \times \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}}$ $q = k \cdot \frac{m_1 - m_x}{\ln m_1 - \ln m_x} \times \frac{H_1 - H_x}{x} \quad (4.7)$ | $m_x = m_1 - \frac{m_1 - m_2}{L} \cdot x$ $H_x = H_1 - \frac{\ln m_1 - \ln m_x}{\ln m_1 - \ln m_2} \cdot (H_1 - H_2) \quad (4.8)$ |
| 5. Грунтовый поток с горизонтальным водоупором и линейно изменяющейся шириной в плане (рис. 4.1, г) | $Q = k \frac{B_1 - B_2}{\ln B_1 - \ln B_2} \times \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} \quad (4.9)$                                                                               | $h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{\ln B_1 - \ln B_x}{\ln B_1 - \ln B_2} \cdot (h_1^2 - h_2^2)} \quad (4.10)$                             |

учетом среднего значения коэффициента фильтрации  $k_{cp}$  для участка, на концах которого определены положения уровней. Если положения уровней известны на урезах рек, то среднее значение  $k_{cp1-2}$  определяется для всего междуречного массива:

$$q_{1-2} = k_{cp1-2} \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}}. \quad (4.11)$$

Здесь  $k_{cp}$  определяется согласно формулам в табл. 4.2 в зависимости от названия расчетной схемы.

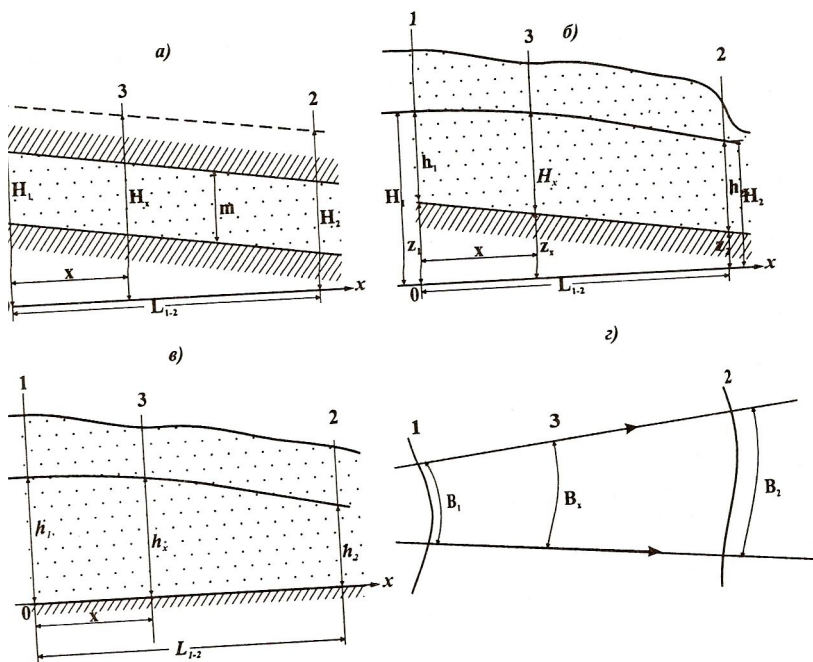


Рис. 4.1. Расчетные схемы установившейся фильтрации в однородном пласте:  
 а – напорный поток с постоянной мощностью; б – грунтовый поток с наклонным водоупором; в – грунтовый поток с горизонтальным водоупором; г – грунтовый поток с горизонтальным водоупором и линейно изменяющейся шириной в плане

Таблица 4.2

Расчетные зависимости для определения средних значений параметров фильтрации

| Номер п/п | Расчетная схема                                    | Формула для определения среднего значения                                                              |
|-----------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | Поток в кусочно-однородном пласте (рис. 4.2, а)    | $k_{cp1-2} = \frac{L_{1-2}}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{l_3}{k_3} + \dots} \quad (4.12)$ |
| 2         | Поток в слоистом пласте с $n$ слоями (рис. 4.2, б) | $k_{cp1-2} = \frac{\sum_{j=1}^n k_j m_j}{\sum_{j=1}^n m_j} \quad (4.13)$                               |

| Номер п/п | Расчетная схема                                                                                                        | Формула для определения среднего значения                                                                           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3         | Грунтовый поток в двухслойном пласте при $i = 0$ (рис. 4.2, в)                                                         | $k_{cp1-2} = \frac{k_1 \frac{h_1 + h_2}{2} + k_2 m_2}{\frac{h_1 + h_2}{2} + m_2} \quad (4.14)$                      |
| 4         | Поток с изменяющимся коэффициентом фильтрации по линейному закону<br>$k_x = k_1 - \frac{k_1 - k_2}{L} x$ (рис. 4.2, з) | $k_{cp1-2} = \frac{k_1 - k_2}{\ln k_1 - \ln k_2}$<br>$k_{cp1-x} = \frac{k_1 - k_x}{\ln k_1 - \ln k_x} \quad (4.15)$ |
| 5         | Напорный поток с изменяющейся мощностью по линейному закону (рис. 4.2, д)                                              | $m_{cp1-2} = \frac{m_1 - m_2}{\ln m_1 - \ln m_2} \quad (4.16)$                                                      |
| 6         | Поток с изменяющейся шириной в пласте по линейному закону (рис. 4.2, е)                                                | $B_{cp1-2} = \frac{B_1 - B_2}{\ln B_1 - \ln B_2} \quad (4.17)$                                                      |

Далее записывается уравнение для расхода на участке длиной  $x$  от границы, где  $x = 0$ , до сечения, в котором определяется положение уровня

$$q_{1-x} = k_{cp1-x} \frac{h_1^2 - h_x^2}{2x}, \quad (4.18)$$

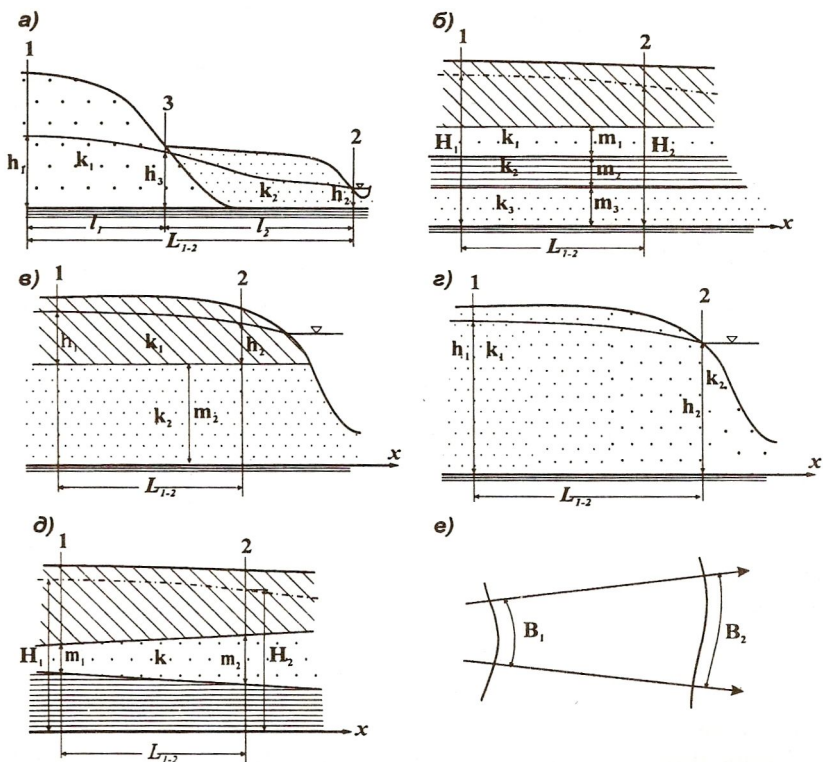
причем величина  $k_{cp1-x}$  определяется на участке длиной  $x$  по той же зависимости, что и  $k_{cp}$ , но с учетом реального строения этого участка.

Учитывая, что при отсутствии инфильтрационного питания ( $W = 0$ ) латеральный расход на всем междуречье не изменяется и  $q_{1-2} = q_{1-x}$  из (4.18) определяем мощность потока в сечении  $x$ :

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{2q_{1-2} \cdot x}{k_{cp1-x}}}. \quad (4.19)$$

Аналогичным образом следует выполнять решение для случая постепенного изменения ширины потока в плане или линейного изменения мощности напорного пласта, с учетом, что вместо  $k_{cp1-2}$  и  $k_{cp1-x}$  следует использовать  $B_{cp}$  и  $m_{cp}$  для соответствующих сечений.

Для междуречья с одной границей резкого изменения коэффициента фильтрации по потоку удобно выделить два однородных фрагмента потока: длиной  $l_1$  с коэффициентом фильтрации  $k_1$  и длиной  $l_2$  с коэффициентом фильтрации  $k_2$ . Определение мощности потока следует начать с границы фрагментов, распо-



**Рис. 4.2. Типовые схемы неоднородности строения области фильтрации:**  
 а – кусочно-однородный пласт; б – слоистый пласт; в – двухслойный пласт; г – пласт с коэффициентом фильтрации, изменяющимся по линейному закону; д – напорный поток в пласте, мощность которого изменяется по линейному закону; е – плавный поток в пласте шириной, изменяющейся по линейному закону

ложенной на расстоянии  $x = l$  от уреза реки. В этом случае здесь имеем

$$h_s = \sqrt{h_1^2 - \frac{2q_{1-2} \cdot l_1}{\kappa_1}}. \quad (4.20)$$

После этого определение мощности потока в каждом из фрагментов можно выполнить по формулам для однородного пласта, имея в виду, что уровни на границах будут  $h_1$  и  $h_s$  – для первого фрагмента и  $h_s$  и  $h_2$  – для второго.

Если река, канал, дрена являются несовершенными границами, а пласт однородным, то показатель гидродинамического



влияния этого несовершенства  $\Delta L_n$  определяется согласно п. 2.4 (см. табл. 3.2).

## ЗАДАЧИ

### Задача 4.1.

Грунтовые воды заключены в песках, слагающих междуречный массив. Пески имеют  $k = 10$  м/сут и подстилаются горизонтально залегающими глинами, отметка кровли которых  $z = 90$  м. Отметка уреза левой реки  $H_1 = 100$  м, правой  $H_2 = 118$  м. Ширина междуречья  $L = 3000$  м (табл. 4.3, вариант 1). Инфильтрационное питание  $W = 0$ .

Требуется: 1) построить расчетную схему и проверить степень гидродинамического несовершенства левой реки, определив  $\Delta L_n$  по табл. 3.2; 2) определить расход  $q$ ; 3) определить положение кривой уровня, вычислив мощность потока  $h_x$  на расстоянии  $x = 500$  м от уреза левой реки; 4) исследовать изменение мощности и величины расхода потока в междуречном массиве при различных схемах неоднородности, в которых коэффициент фильтрации меняется: а) по закону прямой линии от  $k_1 = 1$  м/сут на урезе левой реки до  $k_2 = 10$  м/сут на урезе правой реки; б) резко по направлению движения и имеет на участке длиной  $l_1 = 500$  м от уреза левой реки  $k_1 = 1$  м/сут, на остальной части междуречья  $k_2 = 10$  м/сут; в) пласт имеет двухслойное строение (нижний слой  $k_1 = 10$  м/сут,  $m = 10$  м, верхний  $k_2 = 0,1$  м/сут).

Таблица 4.3

Исходные данные вариантов задач 4.1, 4.2, 4.3

| Номер варианта | Длина потока $L_{1-2}$ , м | Коэффициент фильтрации, м/сут | Пьезометрические отметки, м |       | Абсолютные отметки кровли водопора, м |       | Расстояние до сечения $x$ , м | Инфильтрация $W$ , м/сут |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|---------------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------|
|                |                            |                               | $H_1$                       | $H_2$ | $z_1$                                 | $z_2$ |                               |                          |
| 1              | 2                          | 3                             | 4                           | 5     | 6                                     | 7     | 8                             | 9                        |
| 1              | 3000                       | 10                            | 100                         | 118   | 90                                    | 90    | 500                           | $2,7 \cdot 10^{-4}$      |
| 2              | 10000                      | 15                            | 150                         | 180   | 130                                   | 130   | 1000                          | $2,4 \cdot 10^{-4}$      |
| 3              | 2000                       | 5                             | 111                         | 120   | 80                                    | 82    | 500                           | $2,7 \cdot 10^{-4}$      |
| 4              | 1500                       | 7                             | 117,4                       | 114,9 | 90,4                                  | 90,4  | 500                           | $2,3 \cdot 10^{-4}$      |
| 5              | 5000                       | 5                             | 120                         | 130   | 90                                    | 90,0  | 1000                          | $2,7 \cdot 10^{-4}$      |
| 6              | 6000                       | 8                             | 100                         | 120   | 90                                    | 95    | 1500                          | $2,0 \cdot 10^{-4}$      |
| 7              | 4000                       | 4                             | 150                         | 165   | 120                                   | 120   | 1000                          | $2,8 \cdot 10^{-4}$      |
| 8              | 7000                       | 6                             | 140                         | 120   | 104                                   | 99    | 2000                          | $2,2 \cdot 10^{-4}$      |
| 9              | 2500                       | 4                             | 160                         | 150   | 130                                   | 130   | 500                           | $3 \cdot 10^{-4}$        |
| 10             | 8000                       | 8                             | 80                          | 110   | 65                                    | 58    | 2000                          | $2 \cdot 10^{-4}$        |

### Решение.

1. Исходная расчетная схема отвечает однородному пласту при  $i = 0$  (см. рис. 4.1, в) и описывается уравнением Дюпюи. Проверим несовершенство левой границы. Из табл. 4.3 для варианта 1 имеем  $H_1 = 100$  м,  $z = 90$  м. Согласно п. 2.3 табл. 3.2  $\Delta L_n \approx h$ ,  $h_1 = H_1 - z = 100 - 90 = 10$  м. Критерий  $\Delta L_n < 0,05 L_{1-2}$  выполняется ( $10 < 150$ ), следовательно границу считаем совершенной.

2. Определим расход потока по формуле (4.5), считав начало координат слева. Предварительно вычислим значения уровней как  $h = H - z$ . Имеем  $q = 10 \frac{10^2 - 28^2}{6000} = -1,14$  м<sup>2</sup>/сут на 1 м ширины. Знак минус показывает, что расход направлен против оси  $x$ . Это естественные ресурсы водоносного горизонта.

3. Определим мощность  $h_3$  потока на расстоянии  $x = 500$  м от левой реки по формуле (4.6), с учетом, что начало координат слева:  $h_3 = \sqrt{10^2 - \frac{10^2 - 28^2}{3000} 500} = 14,6$  м. Кривая депрессии выпуклая и определяется уравнением параболы.

4. Выполним исследования. Рассмотрим последовательно указанные три расчетные схемы неоднородного строения. Первая отвечает линейному изменению и соответствует рис. 4.2, г. Проверим возможность осреднения по критерию п. 6.3 (см. табл. 3.2):

$\frac{k_2}{k_1} = \frac{10}{1} < 20$ , условие выполняется. Выполним расчет значения  $k_x$

$$= k_1 - \frac{k_1 - k_2}{L} x = 1 - \frac{1 - 10}{3000} 500 = 2,5 \text{ м/сут.}$$

Средний коэффициент фильтрации на участке  $l_{1-x}$  по формуле (4.15)

$$k_{\text{ср}1-x} = \frac{1 - 2,5}{\ln 1 - \ln 2,5} = 1,6 \text{ м/сут.}$$

Соответственно для всего потока  $k_{\text{ср}1-2} = \frac{1 - 10}{\ln 1 - \ln 10} = 3,9 \text{ м/сут.}$   
Расход потока определим по формуле (4.5)

$$q_{1-2} = 3,9 \frac{10^2 - 28^2}{6000} = -0,44 \text{ м}^2 / \text{сут.}$$

Формулу для построения кривой  $h_x$  найдем по методу фрагментов, используя гидродинамическую особенность потока  $q_{1-2} = q_{1-x}$ .

Отсюда  $h_x = \sqrt{10^2 - \frac{2(-0,44) \cdot 500}{1,6}} = 19,3$  м. Сравниваем полученные данные со схемой однородного пласта: расход потока сокра-

тился в 2,5 раза (уменьшились его естественные ресурсы). Мощность потока в сечении  $h_x$  возросла от 14,6 до 19,3 м, что свидетельствует об увеличении градиента потока вследствие уменьшения здесь коэффициента фильтрации от 10 до 1 м/сут.

5. Вторая схема отвечает рис. 4.2, а (кусочно-однородное строение). Средний коэффициент фильтрации находим по формуле (4.15):

$$k_{\text{ср1-2}} = \frac{3000}{\frac{500}{1} + \frac{2500}{10}} = 4 \text{ м/сут};$$

расход потока – по формуле (4.5):

$$q_{1-2} = 4 \frac{10^2 - 28^2}{2 \cdot 3000} = -0,456 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Формулу для определения  $h_x$  находим по методу фрагментов из равенства  $q_{1-x} = q_{1-2}$  (формула (4.19)):

$$h_x = \sqrt{10^2 - \frac{2(-0,456) \cdot 500}{1}} = 23,6 \text{ м}.$$

Полученные характеристики свидетельствуют, что в схеме кусочно-однородного строения наличие вблизи уреза левой реки относительно слабопроницаемого слоя пород с  $k = 1$  м/сут почти в 3 раза уменьшает расход потока, а на границе раздела слоев происходит резкое преломление кривой уровня. Об этом свидетельствует слабое уменьшение мощности пласта на участке длиной 2500 м от правой реки до сечения  $x$  (от 28 до 23,6 м) и значительное на участке длиной всего 500 м от сечения  $x$  до левой реки (от 23,6 до 10 м).

6. Третья схема отвечает рис. 4.2, в. Определим расход потока по формуле (4.11), имея в виду, что  $k_{\text{ср1-2}}$  определяется по формуле (4.14). С учетом того, что мощности  $h$  отсчитываются от границы раздела слоев и, следовательно, уменьшаются на величину  $m = 10$  м, получим

$$q = \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot k_1 \cdot \frac{\Delta h}{L} + m \cdot k_2 \cdot \frac{\Delta h}{L} = \frac{0 + 18}{2} \cdot 0,1 \cdot \frac{18}{3000} + 10 \cdot 10 \cdot \frac{18}{3000} = 0,005 + 0,6 = 0,6 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Весь расход потока идет через нижний слой ( $0,6 \text{ м}^2/\text{сут}$ ), а верхний ( $0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$ ) играет практически роль водоупора. Этот вывод можно получить из соотношения коэффициентов фильтрации:  $\frac{k_2}{k_1} = \frac{10}{0,1} = 100$ , критерий 2.1 (см. табл. 3.2) выполняется и



указывает на то, что в верхнем слое движение приобретает вертикальное направление, т.е. существует перетекание. Пользоваться формулой (4.11) не имеет смысла. Практически грунтовые воды в таких условиях становятся субнапорными и расход определяется по выражению (4.1). Кривая депрессии такого потока определяется формулой (4.2), отметка уровня в сечении  $x = 500$  м:

$$H_x = 100 - \frac{100 - 118}{3000} 500 = 103,0 \text{ м.}$$

7. Выполненное исследование показывает, что изменения строения пласта (геолого-структурный фактор), а также фильтрационных свойств водоносных пород (литолого-фациальный фактор) оказывают существенное влияние на гидродинамические характеристики потока и его естественные ресурсы.

### **Задача 4.2.**

Используя условие задачи 4.1, провести аналогичные исследования для вариантов 2–10 и сделать выводы о влиянии гидрогеологических условий на динамику потока. Данные для исходной схемы однородного строения приведены в табл. 4.3 (столбцы 1–8), для схем неоднородного строения в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Исходные данные вариантов задач 4.1, 4.2, 4.5, 4.6**

| Номер<br>варианта | Изменчивость коэффициента фильтрации по схеме |       |                     |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |
|-------------------|-----------------------------------------------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|
|                   | линейного<br>закона                           |       | кусочно-однородного |       |       |       |       |       | слоистой толщи |       |       |       |       |
|                   | $k_1$                                         | $k_2$ | $k_1$               | $l_1$ | $k_2$ | $l_2$ | $k_3$ | $l_3$ | $k_1$          | $k_2$ | $m_2$ | $k_3$ | $m_3$ |
| 1                 | 2                                             | 3     | 4                   | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10             | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 1                 | 1                                             | 10    | 1                   | 500   | 10    | 2500  | –     | –     | 0,1            | 10    | 10    | –     | –     |
| 2                 | 1,5                                           | 15    | 1,5                 | 5     | 15    | 9980  | 1,5   | 15    | 1,5            | 15    | 20    | –     | –     |
| 3                 | 0,5                                           | 5     | 0,2                 | 15    | 5     | 1975  | 1     | 10    | 0,5            | 5     | 5     | 10    | 15    |
| 4                 | 0,4                                           | 6     | 0,4                 | 500   | 6     | 1000  | –     | –     | 0,4            | 6     | 20    | –     | –     |
| 5                 | 1                                             | 5     | 0,5                 | 5     | 5     | 4980  | 0,5   | 15    | 1              | 5     | 10    | 10    | 5     |
| 6                 | 0,5                                           | 8     | 0,5                 | 1000  | 8     | 5000  | –     | –     | 0,2            | 8     | 15    | –     | –     |
| 7                 | 0,2                                           | 4     | 0,2                 | 20    | 4     | 3970  | 0,2   | 10    | 0,1            | 4     | 20    | 10    | 10    |
| 8                 | 0,5                                           | 6     | 0,5                 | 1500  | 6     | 5500  | –     | –     | 0,5            | 6     | 10    | –     | –     |
| 9                 | 0,4                                           | 4     | 0,4                 | 10    | 4     | 2470  | 0,4   | 20    | 0,2            | 4     | 5     | 10    | 5     |
| 10                | 1                                             | 8     | 1                   | 2000  | 8     | 6000  | –     | –     | 0,5            | 8     | 5     | –     | –     |



### 4.3. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ИНФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПИТАНИЕМ

Поток грунтовых вод с инфильтрационным вертикальным водообменом ( $W_a$ ) характеризуется в общем случае изменяющимся расходом по пути его движения, наличием подземного водораздела и, как следствие, разным направлением фильтрации на междуречья. Все это требует на расчетной схеме строгой ориентированности начала координат. Во всех рассматриваемых ниже случаях оно принимается слева, при этом расход потока слева направо имеет положительный знак (так как движение его совпадает с направлением координатной оси), в противоположном направлении – отрицательный.

При исследовании потока решаются следующие задачи:

1. Определяется наличие подземного водораздела по соотношению расходов  $q_1$  на левом ( $x = 0$ ) и  $q_2$  на правом ( $x = L$ ) урезах междуречья. Если  $q_1$  и  $q_2$  имеют одинаковые знаки (направлены в одну сторону), то водораздела на междуречье нет, если разные знаки – то водораздел существует.

2. Определяется положение подземного водораздела ( $0 \leq a \leq L$ ), т.е. расстояние до него от левой границы.

3. Строится кривая уровня подземных вод на основе выполнения определений  $h_x$  в 4–5 различных сечениях.

4. Устанавливается величина расхода в любом сечении междуречья. Учитывая, что  $q_x = q_1 + Wx$ , очевидно, что график  $q_x$  от  $x$  имеет вид прямой линии, отсекающий в сечении  $x = 0$  ординату, равную  $q_1$ . В сечении  $x = L$  величина ординаты графика равна  $q_2$ . Угол наклона графика увеличивается при возрастании инфильтрации  $W$ . При  $W = 0$  этот график параллелен оси абсцисс.

Расчетные зависимости для определения характеристик потока в однородном пласте имеют вид:

1) расход потока в начальном ( $x = 0$ ) сечении

$$q_1 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} - \frac{WL_{1-2}}{2}; \quad (4.21)$$

2) расход потока в любом  $x$  сечении

$$q_x = q_1 + Wx; \quad (4.22)$$

3) расход потока в конечном ( $x = L$ ) сечении

$$q_2 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_{1-2}} + \frac{WL_{1-2}}{2}; \quad (4.23)$$

4) расстояние до водораздела

$$a = \frac{L}{2} - \frac{k}{W} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}; \quad (4.24)$$

5) мощность потока в любом сечении  $x$

$$h_x = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L}x + \frac{W}{k}(L - x)x}. \quad (4.25)$$

При  $W > 0$  кривая уровня выпуклая, при  $W < 0$  кривая уровня вогнутая (происходит испарение с уровня грунтовых вод).

Если на междуречье известно положение уровня в трех сечениях ( $h_1$ ,  $h_x$  и  $h_2$ ), то возможно решение обратной задачи – определение величины инфильтрационного питания при однородном строении пласта по зависимости

$$W = k \left[ \frac{h_1^2 - h_2^2}{(L - x)L} - \frac{h_1^2 - h_x^2}{(L - x)x} \right]. \quad (4.26)$$

Для потоков в неоднородных пластах задача решается методом фрагментов. В пределах междуречного массива выделяются фрагменты с однородным строением. Для каждого фрагмента длиной  $l_j$  и коэффициентом фильтрации  $k_j$  могут быть записаны уравнения типов (4.21) и (4.23), характеризующие расходы воды на левой и правой его границах. Согласно ГУ IV рода расходы воды на границах любых двух смежных фрагментов должны быть одинаковыми. Тогда, например, для междуречья, состоящего из фрагментов 1 и 2, можно записать

$$k_1 \frac{h_1^2 - h_s^2}{2l_1} + \frac{Wl_1}{2} = k_2 \frac{h_s^2 - h_2^2}{2l_2} - \frac{Wl_2}{2}. \quad (4.27)$$

Из уравнения (4.27) может быть определено  $h_s$ , а затем рассчитаны значения  $q_x$  и  $h_x$  для каждого из фрагментов по формулам для однородного пласта.

Аналогичный способ решения следует использовать и в том случае, если в пределах междуречья на различных участках длиной  $l_1$  и  $l_2$  задано неодинаковое инфильтрационное питание  $W_1$  и  $W_2$ .

При большом числе границ количество уравнений типа (4.27) пропорционально возрастает, так как увеличивается число однородных фрагментов. Образующаяся система из  $n$  уравнений всегда разрешима, так как содержит  $n$  неизвестных  $h_{sj}$ , где  $(n + 1)$  – число однородных участков, а  $n$  – число границ неоднородности.

## Задача 4.3.

Использовать условия задачи 4.1 (см. табл. 4.3, вариант 1) и выявить влияние вертикального водообмена на положение и форму депрессионной кривой и величину расхода потока. Для этого решить следующие задачи: а) определить мощность потока  $h_x$  в сечении на расстоянии  $x = 500$  м при  $W = 2,7 \cdot 10^{-4}$  м/сут (см. табл. 4.3, столбец 9); б) определить расход потока  $q_1$  в сечении  $x = 0$ ,  $q_2$  при  $x = L$  и расход потока на расстоянии  $x$ ; в) найти положение водораздела  $a$ ; г) определить при какой отметке уровня воды на урезе левой реки ( $x = 0$ ) начнется фильтрация через междуречье в правую реку.

*Решение.*

1. Мощность потока  $h_x$  найдем по формуле (4.25):

$$h_x = \sqrt{10^2 - \frac{10^2 - 28^2}{3000} 500 + \frac{2,7 \times 10^{-4}}{10} (3000 \cdot 500 - 500^2)} = 16 \text{ м.}$$

2. Расход потока  $q_1$  в сечении  $x = 0$  найдем по формуле (4.21):

$$q_1 = \left( 10 \frac{10^2 - 28^2}{6000} \right) - \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 3000}{2} = -1,54 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Расходы  $q_x$  и  $q_2$  вычислим по формулам (4.22) и (4.23):

$$q_x = -1,5 + 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 500 = -1,40 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$q_2 = -1,15 + 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^3 = -0,73 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Знак минус показывает, что все расходы потока направлены в сторону, противоположную направлению оси  $x$ , т.е. идет фильтрация из правой реки в левую.

3. Найдем расстояние до водораздела  $a$  по формуле (4.24):

$$a = \frac{3000}{2} - \frac{10}{2,7 \cdot 10^{-4}} \frac{10^2 - 28^2}{6000} = 5775 \text{ м.}$$

Так как  $a > L$ , то водораздела на междуречье не существует.

4. Чтобы началась фильтрация воды через междуречье из левой реки в правую, расход  $q_1 \geq 0$ . Из этого условия найдем значение

$$h_1 = \sqrt{h_2^2 + \frac{WL^2}{\kappa}} = \sqrt{28^2 + \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^6}{10}} \geq 32 \text{ м.}$$

5. Выявим влияние вертикального водообмена на динамику потока: наличие инфильтрации приводит к возрастанию мощности потока. В данном случае она увеличилась с 14,8 (задача 4.1) до 16 м. Кривая депрессии становится более выпуклой. Расход



потока увеличивается по направлению движения от 0,73 до 1,54 м<sup>2</sup>/сут на 1 м ширины потока и на 35 % превышает расход потока при отсутствии питания (вместо 1,14 составляет 1,54 м<sup>2</sup>/сут). Однако интенсивность питания невелика и водораздела в пределах исследуемого междуречья нет.

#### **Задача 4.4.**

Используя задание задачи 4.3, провести аналогичные исследования для вариантов 2–10 (см. табл. 4.3, столбец 9) и сделать выводы о влиянии вертикального водообмена на динамику потока, сравнив полученные результаты с данными задачи 4.2 для схем однородного строения.

#### **Задача 4.5.**

Используя задание задачи 4.2, провести аналогичные исследования для вариантов 2–10 при следующих схемах неоднородного строения (см. табл. 4.4): линейное изменение коэффициента фильтрации и слоистая толща. Полученные результаты сравнить с данными задачи 4.2 для тех же схем однородного строения.

#### **Задача 4.6.**

Используя метод фрагментов, вывести расчетные зависимости для определения  $q_1$ ,  $q_x$ ,  $h_x$  при наличии инфильтрационного питания для схем линейного изменения коэффициента фильтрации и кусочно-однородного строения пласта (см. рис. 4.2, а, з).

Примечание. Вначале следует составить два уравнения расхода  $q_s$  для сечения  $x = s$ , рассмотрев каждый участок как самостоятельный поток, затем приравняв  $q_s$  справа и слева, определить  $h_s$ .

#### **Задача 4.7.**

Определить величину инфильтрационного питания, если отметки уровня  $H_x$  для вариантов 1–10 (см. табл. 4.3) составляют соответственно: 120, 185, 128, 120, 137, 125, 170, 145, 162, 115 м. Воспользоваться формулой (4.26).

#### **Задача 4.8.**

Использовать результаты решения задач 4.3 и 4.4 и определить, можно ли при схематизации гидрогеологических условий пренебречь величиной инфильтрационного питания.

#### **Решение.**

1. Воспользуемся данными задачи 4.3 и рассмотрим составляющие расхода  $q_1$  по формуле (4.21). Первый член, равный  $q_r = 1,14$  м<sup>2</sup>/сут, характеризует часть потока, формирующегося под влиянием соотношения уровней на его внешних границах (когда  $W = 0$ ), второй –  $q_b = 0,4$  м<sup>2</sup>/сут, отвечает существующей величине инфильтрационного питания и составляет 25 % от общего расхода, или 30 % от горизонтального. В этом случае коэффициент вертикального водообмена  $K_{во} = 0,35$  (см. табл. 3.2, п. 7) и пренебрегать вертикальным обменом нельзя.



2. Аналогичным образом рассмотреть результаты решения задачи 4.4.

#### 4.4. ПОДПОР ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ПОВЫШЕНИИ УРОВНЯ В РЕКЕ

В результате повышения уровня на урезе поверхностного водотока (водохранилище, река, канал), имеющего тесную гидравлическую связь с грунтовыми водами, в последних развивается подпор уровней (рис. 4.3, а). Некоторое время подпор происхо-

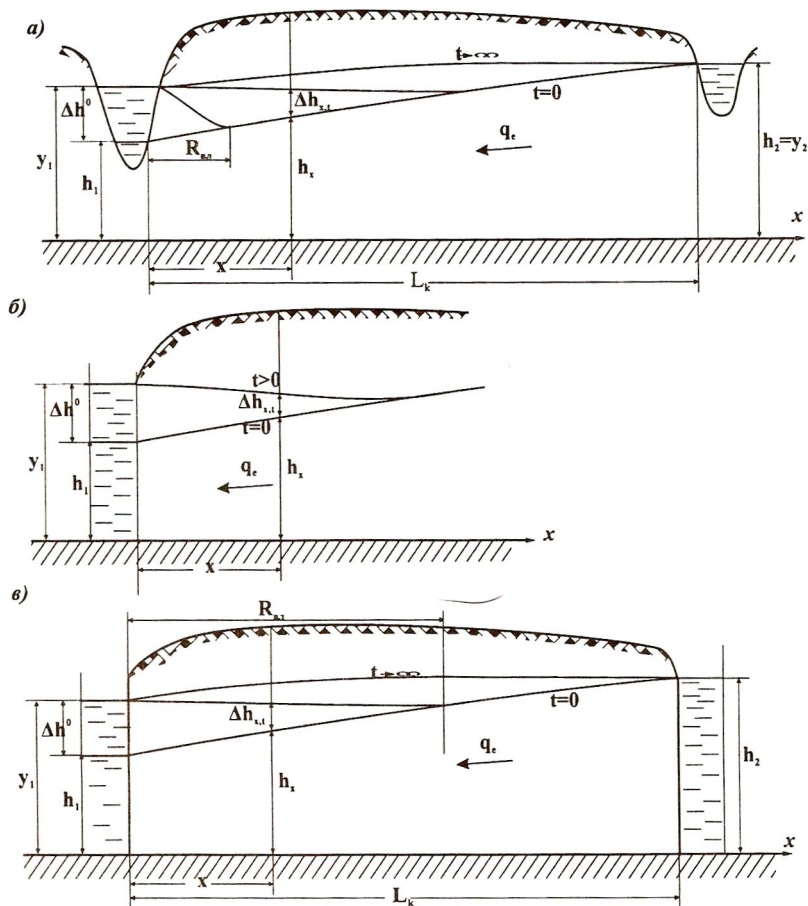


Рис. 4.3. Подпор грунтовых вод:

а – природные условия; б – расчетная схема полуограниченного пласта (при  $L_k > R_{B,1}$ ); в – расчетная схема ограниченного пласта ( $L_k < R_{B,1}$ )

дит в условиях нестационарного режима, затем сменяется стационарным. Период нестационарной фильтрации  $t$  ориентировочно определяется из соотношения п. 1.1 (см. табл. 3.2)

$$t < 0,5 t_c = 0,5 \frac{L^2}{a},$$

здесь  $t_c$  – период стабилизации;  $L$  – длина междуречья;  $a = kh_{cp}/\mu$ ;

$$h_{cp} = \frac{2y_1 + h_1}{3}, \quad (4.28)$$

где  $h_1, y_1$  – мощности полубесконечного грунтового потока на урезе  $x = 0$  соответственно до и после подпора.

Для потоков с инфильтрационным питанием  $W$  и весьма значительной протяженности ( $L_k \geq 10$  км) вместо  $L$  следует подставлять

$$L_w = \sqrt{2 \frac{kh_{cp}\Delta h_0}{W}}, \quad (4.29)$$

где  $\Delta h_0$  – изменение уровня на урезе водохранилища, м.

В начальный период в ограниченном пласте длиной  $L$  нестационарный подпор развивается как в условиях полуограниченного пласта (рис. 4.3, б). Зона этого влияния определяется согласно п. 10.1 (см. табл. 3.2):  $R_{в.л} \approx 4\sqrt{at}$ .

Начиная с некоторого времени  $t_k$ , подпор развивается в условиях ограниченного пласта (см. рис. 4.3, в). Это время находится по зависимости

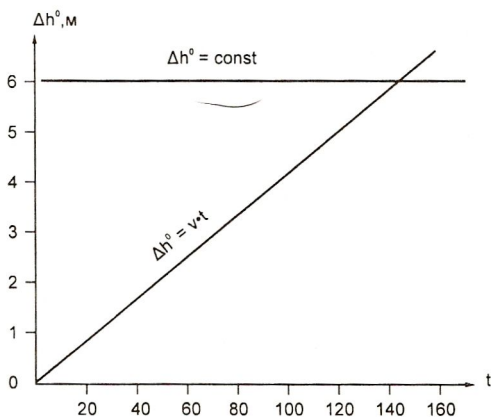


Рис. 4.4. Изменение граничных условий на урезе водохранилища ( $x = 0$ ) во времени

$$t_k = \frac{0,06L^2}{a}. \quad (4.30)$$

По характеру изменения уровня на урезе водохранилища или канала, где  $x = 0$ , выделяем две расчетные схемы (рис. 4.4): а) мгновенное повышение уровня  $\Delta h^0 = \text{const}$ ; б) постепенное повышение уровня по линейному закону  $\Delta h^0 = v \cdot t$ .

Расчетные зависимости для типовых схем оценки подпора сведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Формулы для оценки подпора при повышении уровня в реке

| Искомые показатели                                             | Полуограниченный пласт<br>(см. рис. 4.3, б),<br>граничные условия       |                                                                                   | Ограниченный пласт<br>(см. рис. 4.3, в)                                                             |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                | $\Delta h^0 = \text{const}$                                             | $\Delta h^0 = v \cdot t$                                                          | $\Delta h_0 = \text{const}$                                                                         |
| Подпор уровня воды в любом сечении $\Delta h_{x,t}$ , м        | <i>Нестационарный режим фильтрации</i>                                  |                                                                                   |                                                                                                     |
|                                                                | $\Delta h^0 [\text{erfc}(\lambda)] \quad (4.31)$                        | $\Delta h^0 \cdot R(\lambda) \quad (4.32)$                                        | $\Delta h^0 \left[ \frac{L-x}{L} - S\left(\tau, \frac{x}{L}\right) \right] \quad (4.33)$            |
| Расход воды на урезе $x = 0$ , $q_{0,t}$ , м <sup>2</sup> /сут | $\frac{\kappa h_{cp} \Delta h^0}{\sqrt{\pi a t}} \quad (4.34)$          | $\frac{2 \kappa h_{cp} \Delta h^0}{\sqrt{\pi a t}} \quad (4.35)$                  | $\kappa h_{cp} \frac{\Delta h^0}{L} [S_q(\tau) + 1] \quad (4.36)$                                   |
| Фильтрационные потери (объем воды) $V$ , м <sup>3</sup>        | $\frac{2 \kappa h_{cp} \Delta h^0}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{t} \quad (4.37)$ | $\frac{4}{3} \frac{\kappa h_{cp} \Delta h^0}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{t} \quad (4.38)$ | $\frac{\kappa h_{cp} \Delta h^0}{L} \left( t + \frac{2L^2 S_V(\tau)}{a \pi^2} \right) \quad (4.39)$ |
| Приращение уровня в любом сечении, м                           | <i>Стационарный режим фильтрации</i>                                    |                                                                                   |                                                                                                     |
|                                                                | $\Delta h_{x,\infty} = \Delta h^0 \quad (4.40)$                         |                                                                                   | $\Delta h_{x,\infty} = \Delta h \frac{L-x}{L} \quad (4.41)$                                         |
| Расход потока на урезе $x = 0$ , м <sup>2</sup> /сут           | $q_{0,\infty} = q_c \quad (4.42)$                                       |                                                                                   | $q_{0,\infty} = \kappa h_{cp} \frac{\Delta h^0}{L} \quad (4.43)$                                    |

В формулах табл. 4.5:

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (4.44)$$

где  $x$  — расстояние от начала координат до сечения, в котором определяется подпор на время  $t$ ;

$$\tau = at/L^2. \quad (4.45)$$

Функции  $\operatorname{erfc}(\lambda)$  и  $R(\lambda)$  приведены в приложении 1,  $S_q(\tau)$  – в приложении 2,  $S_V(\tau)$  – в приложении 3, а  $S\left(\tau \frac{x}{L}\right)$  – на графике (рис. 4.5).

В зависимости от соотношения величин подпора  $\Delta h_{x,t}$  и начальной мощности пласта  $h_{x,0}$  рассматриваем два вида расчетных схем:

а)  $\Delta h_{x,t} \leq 0,25h_{x,0}$ , мощность грунтовых вод считается постоянной и определяется по формулам (см. табл. 4.5), при этом

$$\Delta h_0 = y_1 - H_1. \quad (4.46)$$

Отметки уровня воды  $y_{x,t}$  определяются:

при  $i > 0$

$$y_{x,t} = H_{x,0} + \Delta h_{x,t}; \quad (4.47)$$

при  $i = 0$

$$y_{x,t} = h_{x,0} + \Delta h_{x,t}; \quad (4.48)$$

б)  $\Delta h_{x,t} > 0,25h_{x,0}$ , мощность грунтовых вод существенно изменяется при подпоре и в формулах (см. табл. 4.5) при условии  $i = 0$  надо полагать

$$h_{cp} \cdot \Delta h^0 = y_1^2 - h_1^2, \quad (4.49)$$

а отметка уровня воды  $y_{x,t}$  определяется выражением

$$y_{x,t} = \sqrt{h_{x,0}^2 + \Delta h_{x,t}^2}. \quad (4.50)$$

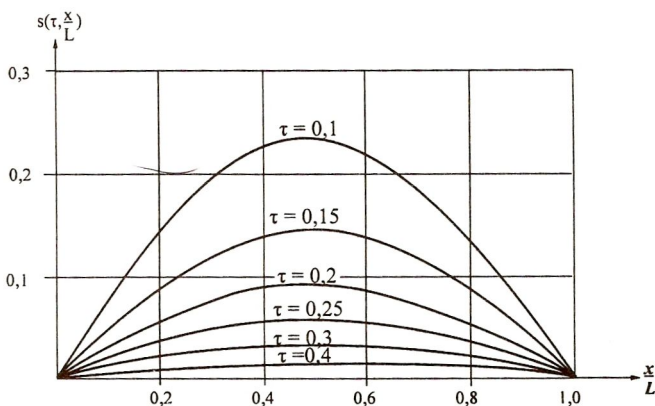


Рис. 4.5. График функции  $S(\tau, x/L)$



Например, для полуограниченного пласта получим

$$y_{x,t} = \sqrt{h_{x,t}^2 + (y_{0,t}^2 - h_{0,0}^2) \cdot \operatorname{erfc}(\lambda)}. \quad (4.50a)$$

Если  $t > 0,5t_c$ , то по критерию (см. табл. 3.2, п. 1.1) нестационарный подпор практически переходит в стационарный, и последний для однородных пластов рассчитывается по уравнениям (см. табл. 4.5). Если уровень воды  $h_2$  на второй границе потока изменяется до  $y_2$ , используют следующую зависимость для грунтовых вод:

$$y_x^2 = h_x^2 + \frac{y_1^2 - h_1^2}{L}(L - x) + \frac{y_2^2 - h_2^2}{L}x, \quad (4.51)$$

где  $h_1, h_2, h_x$  – уровни до подпора;  $y_1, y_2, y_x$  – в этих же сечениях уровни после подпора.

В случае неоднородного строения пласта или наличия инфильтрационного питания расчет стационарного подпора следует вести по формулам разделов 4.2 и 4.3, заменяя в них уровни на границах соответственно при условии  $i = 0$  –  $h_1$  на  $y_1$  и  $h_2$  на  $y_2$ , при  $i > 0$  –  $H_1$  на  $y_1$  и  $H_2$  на  $y_2$ , в искомом сечении  $x$  –  $h_x$  на  $y_x$  или  $H_x$  на  $y_x$ .

При исследовании подпора грунтовых вод решают следующие задачи:

а) для различных гидрогеологических условий определяют стационарное положение кривой депрессии и отвечающий ей фильтрационный расход;

б) исследуют формирование нестационарного подпора, определяя при различных  $x$  и  $t$  приращение  $\Delta h_{x,t}$  и строя графики  $h_{x,t} = f(x)$ , характеризующие развитие подпора по длине потока, и графики, характеризующие развитие подпора во времени в каждом сечении  $\Delta h_{x,t} = f(t)$ ;

в) изучают закономерности формирования единичного фильтрационного расхода, определяя последний по формуле

$$q_{06,t} = \Delta q_{0,t} \pm q_e, \quad (4.52)$$

где  $q_e$  – естественный расход потока до подпора для различных начальных гидрогеологических условий (см. разделы 4.2 и 4.3); строят графики  $\Delta q_{0,t} = f(t)$  и  $q_{06,t} = f(t)$  (рис. 4.6);

г) выявляют влияние различных факторов ( $k, m, W, l$ ) на формирование стационарной кривой подпора;

д) изучают стадии формирования нестационарного подпора, выделяя их по числу и характеру действующих факторов, используя для этого формулу (4.30) и критерии (см. табл. 3.2).

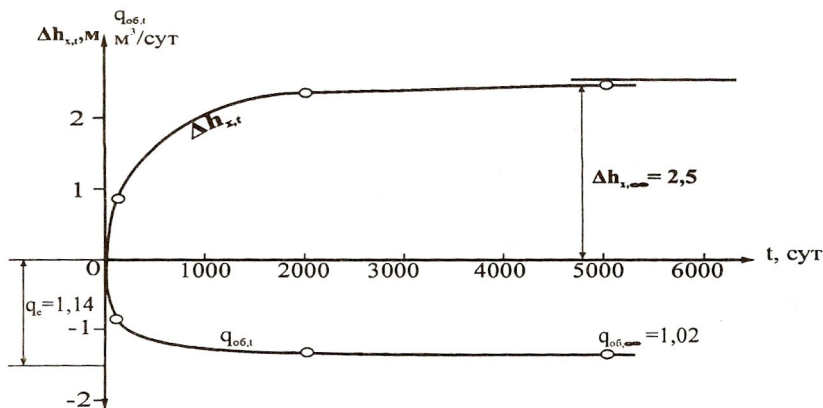


Рис. 4.6. Изменение во времени уровня грунтовых вод и общего фильтрационного расхода на урезе водохранилища

## ЗАДАЧИ

### Задача 4.9.

Используя исходные данные задачи 4.4 (см. раздел 4.3, вариант 1, табл. 4.3 и 4.6), исследовать развитие подпора уровня грунтовых вод и оценить величину фильтрационных потерь при сооружении на левой реке водохранилища протяженностью  $B = 3000$  м с мгновенным подъемом уровня  $\Delta h^0 = 3$  м (см. рис. 4.3, а). На расстоянии  $x = 500$  м от уреза проектируемого водохранилища располагается поселок. Глубина до уровня грунтовых вод здесь составляет  $h_0 = 5,0$  м, глубина заложения фундаментов зданий  $h_{ос} = 1,5$  м. Среднегодовой расход реки составляет  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Необходимо оценить возможность подтопления зданий поселка и определить потери воды из водохранилища. Для этого рассчитать величины подпора  $\Delta h_{x,t}$  при  $x = 500$  м и фильтрационного расхода  $\Delta q_{0,t}$ ,  $q_{об,t}$  на 100, 2000, 5000 сут, вычислить суммарные фильтрационные потери из водохранилища в течение первых 2000 сут подпора, рассчитать стационарный подпор, построить графики изменения  $\Delta h_{x,t}$  и  $q_{об,t}$  от времени, выявить закономерности в развитии подпора и установить стадии формирования подпора.

*Решение.*

1. Определим при  $\Delta h^0 = 3$  м значения мощности водоносного горизонта на урезе реки  $y_1$ , средней мощности при подпоре  $h_{ср}$  по формуле (4.28), величину уровнепроводности  $a$ , период стабилизации подпора  $t_c$  и период, в течение которого подпор развива-

Исходные данные вариантов задач 4.9, 4.10

| Но-<br>мер<br>ва-<br>ри-<br>ан-<br>та | Характеристика<br>границных условий                                                   | Числовые значения показателей |       |                                |                                 |                          |             |                |      |       |       |       |       |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------|----------------|------|-------|-------|-------|-------|
|                                       |                                                                                       | $k$ ,<br>м/сут                | $\mu$ | $h_1$<br>(левая<br>река),<br>м | $h_2$<br>(правая<br>река),<br>м | $W$ ,<br>м/сут $10^{-4}$ | $L$ ,<br>км | $\Delta h^0$ м | $x$  | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_0$ |
| 1                                     | Водохранилище на<br>левой реке при мгно-<br>венном повышении<br>уровня воды в реке    | 10                            | 0,1   | 10                             | 28                              | 2,7                      | 3           | 3              | 500  | 100   | 2000  | 5000  | 2000  |
| 2                                     |                                                                                       | 15                            | 0,02  | 20                             | 50                              | 2,4                      | 10          | 5              | 1000 | 200   | 800   | 6000  | 2500  |
| 3                                     |                                                                                       | 5                             | 0,1   | 30                             | 39                              | 2,7                      | 2           | 7,5            | 500  | 100   | 300   | 2000  | 1500  |
| 4                                     |                                                                                       | 7                             | 0,1   | 27                             | 24,5                            | 2,3                      | 1,5         | 8              | 300  | 100   | 300   | 1500  | 500   |
| 5                                     |                                                                                       | 5                             | 0,05  | 30                             | 40                              | 2,7                      | 5           | 10             | 400  | 100   | 800   | 6000  | 400   |
| 6                                     | Водохранилище на<br>правой реке при<br>мгновеном повыше-<br>нии уровня воды в<br>реке | 10                            | 0,05  | 10                             | 28                              | 0                        | 6           | 6              | 500  | 150   | 500   | 300   | 300   |
| 7                                     |                                                                                       | 15                            | 0,02  | 20                             | 50                              | 0                        | 4           | 4              | 500  | 50    | 400   | 250   | 250   |
| 8                                     |                                                                                       | 5                             | 0,01  | 30                             | 39                              | 0                        | 7           | 7              | 500  | 125   | 500   | 150   | 1500  |
| 9                                     |                                                                                       | 7                             | 0,1   | 27                             | 24,5                            | 0                        | 2,5         | 5              | 500  | 120   | 300   | 50    | 500   |
| 10                                    |                                                                                       | 5                             | 0,05  | 30                             | 40                              | 0                        | 8           | 10             | 1000 | 250   | 1000  | 400   | 400   |

ется в условиях неограниченного пласта,  $t_k$  по (4.30):  $h_1 = 10$  м;  $y_1 = 10 + 3 = 13$  м;  $h_{cp} = 12$  м;  $a = 1200$  м<sup>2</sup>/сут;  $t_c = 3750$  сут;  $t_k = 450$  сут.

2. Для первого расчетного периода времени  $t_1 = 100$  сут, учитывая, что  $t_1 < t_k$ , используем схему полуограниченного пласта (см. рис. 4.3). Для времени  $t_2 = 2000$  сут, учитывая, что  $t_k < t_2 < t_c$ , применяем расчетную схему ограниченного пласта в условиях нестационарной фильтрации (см. рис. 4.3, а) и для  $t_3 = 5000$  сут, учитывая, что  $t_3 > 0,5 t_c$ , – расчетную схему стационарной фильтрации при условии, что  $y_2 = h_2$  (справа на границе уровень не изменяется).

3. Рассчитываем изменение уровня воды в сечении  $x = 500$  м.

Для  $t_1 = 100$  сут по формулам (4.44) и (4.31) находим

$$\lambda = \frac{500}{2\sqrt{1200 \cdot 100}} = 0,72,$$

по приложению 1:  $\operatorname{erfc}(\lambda) = 0,31$ ;

$$\Delta h(500, 100) = 3 \cdot 0,31 = 0,9 \text{ м.}$$

Для  $t_2 = 2000$  сут по формуле (4.33) находим аргументы функций

$$\frac{x}{L} = \frac{500}{3000} = 0,16; \quad \tau = \frac{1200 \cdot 2000}{9 \cdot 10^6} = 0,26.$$

По графику (см. рис. 4.5) определяем функцию  $S(\tau, \frac{x}{L}) = 0,03$ ; величина подпора

$$\Delta h(500, 2000) = 3 \left( \frac{3000 - 500}{3000} - 0,03 \right) = 2,4 \text{ м.}$$

Для  $t_3 = 5000$  сут по формуле (4.41) находим стационарный подпор

$$\Delta h(500, 5000) = 3 \frac{3000 - 500}{3000} = 2,5 \text{ м.}$$

Таким образом, глубина до уровня грунтовых вод под поселком уменьшится до  $5 - 2,5 = 2,5$ , но останется больше нормы осушения. Подтопления не будет.

4. Рассчитаем единичный фильтрационный расход в сечении  $x = 0$  на 1 м длины водохранилища (ширина потока) для  $t_1 = 100$  сут. Используя для этого формулу (4.35)

$$\Delta q(0, 100) = \frac{10 \cdot 12,0 \cdot 3}{\sqrt{3,14 \cdot 1200 \cdot 100}} = 0,58 \text{ м}^2/\text{сут.}$$



Для  $t_2 = 2000$  сут по формуле (4.36) имеем при  $\tau = 0,26$  (согласно приложению 2)  $S_q = 0,17$ , а расход

$$\Delta q(0, 2000) = 10 \cdot 12,0 \cdot \frac{3}{3000} (0,17 + 1) = 0,14 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Для  $t_3 = 5000$  сут по формуле (4.43) как для стационарных условий имеем

$$\Delta q(0, 5000) = 10 \cdot 12,0 \cdot \frac{3}{3000} = 0,12 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

5. Фильтрационные потери на 1 м ширины потока в течение первых 2000 сут подпора рассчитываем для схемы ограниченного пласта по формуле (4.39). Для  $\tau = 0,26$  из приложения 3 находим  $S_v(\tau) = 1,53$ .

Тогда

$$V = \frac{10 \cdot 12,0 \cdot 3}{3000} (2000 + \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^6 \cdot 1,53}{1200 \cdot 9,9}) = 523 \text{ м}^3.$$

Общие потери по всей длине водохранилища  $V_{\text{общ}} = VB = 523 \cdot 3000 = 1,57 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ . Среднесуточные потери составляют  $1,57 \cdot 10^6 : 2000 = 785 \text{ м}^3/\text{сут}$  или 9 л/с, т.е. менее 1 % расхода реки.

6. Общий фильтрационный расход на урезе водохранилища на 1 п.м его длины определяем по формуле (4.52) с учетом вычисленного ранее (см. задачу 4.1) естественного расхода до подпора  $q_e = -1,14 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Он составляет для 100, 2000 и 5000 сут, соответственно  $q_{\text{об, 100}} = 0,58-1,54 = -0,94 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $q_{\text{об, 2000}} = 0,14-1,14 = -1,00 \text{ м}^2/\text{сут}$  и  $q_{\text{об, 5000}} = 0,12-1,14 = -1,02 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Знак минус показывает, что расход направлен в сторону водохранилища (против положительного направления оси  $x$ ).

7. Устанавливаем стадии формирования подпора и их продолжительность. Первая стадия характеризуется повышением уровня грунтовых вод за счет фильтрации воды из водохранилища  $q_t$  и естественного притока грунтовых вод со стороны водораздела  $q_e$ . Продолжительность этой стадии определяется приравниванием фильтрационного расхода из водохранилища, определяемого выражением (4.34), естественному расходу потока до подпора:  $\frac{10 \cdot 12,0 \cdot 3}{\sqrt{3,14 \cdot 1200 \cdot t}} = 1,54$ , откуда  $t = 15$  сут.

Во вторую стадию формирование подпора грунтовых вод происходит только за счет притока со стороны водораздела. Время завершения этой стадии соответствует наступлению стационарной фильтрации в междуречном массиве и определяется

$$t = \frac{0,5 \cdot 3000^2}{1200} = 3750 \text{ сут.}$$

#### **Задача 4.10.**

Используя задание задачи 4.9 и числовые значения показателей, приведенных на рис. 4.3, а, в табл. 4.3 и 4.5, исследовать подпор грунтовых вод, рассмотрев 2-10 варианты задачи. Решение каждой задачи начать с построения расчетной схемы.

#### **Задача 4.11.**

Используя данные задач 4.9 и 4.10, рассчитать подпор  $\Delta h(x, t)$  для указанных в табл. 4.6 моментов времени в сечениях  $(0,25x, 0,5x, x, 2x)$  и фильтрационные потери из водохранилища в моменты времени  $(0,25t_v, t_v, 2t_v)$ . Построить графики  $\Delta h(x, t) = f(x)$  и  $V = f(t)$ . Сопоставить полученные результаты и сделать выводы о развитии подпора.

#### **Задача 4.12.**

Определить время после заполнения водохранилища, через которое величина подпора в сечении  $x$  достигнет  $0,7\Delta h_0$ .

#### **Задача 4.13.**

Подземные воды залегают в песках на междуречье длиной  $L = 3000$  м. Пески подстилаются глинами на отметке  $z = 100$  м. Уровни в реках располагаются на отметках  $H_1 = 120$  м и  $H_2 = 130$  м. Коэффициент фильтрации песков  $k = 5$  м/сут, водоотдача  $\mu = 0,1$ . На урзе левой реки построено водохранилище с подпором  $\Delta H^0 = 8$  м. Наполнение водохранилища происходит равномерно в течение года, т.е.  $t_0 = 365$  сут, после чего уровень остается неизменным. Величина инфильтрационного питания на междуречье  $W = 2 \cdot 10^{-4}$  м/сут.

Необходимо рассчитать подпор уровня на расстоянии  $x_1 = 200$  и  $x_2 = 500$  м от уреза и фильтрационный расход на урзе для разных периодов: 100, 200, 400, 1000, 3000, 10000 сут. Построить кривые уровня – естественную и на разные периоды подпора, график изменения расхода во времени.

*Решение.*

1. Определяем положение уровня в естественных условиях в сечениях  $x_1$  и  $x_2$  и расход воды на урзе левой реки, используя формулы (4.25) и (4.21).

Имеем:

$$hx_1 = \sqrt{20^2 - \frac{20^2 - 30^2}{3000} 200 + \frac{2 \cdot 10^{-4}}{5} (3000 - 200) \cdot 200} = 21,3 \text{ м;}$$

$$q_e = 5 \frac{20^2 - 30^2}{2 \cdot 3000} - \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 3000}{2} = -0,72 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

2. Определяем величину урвнeпрoвoднoсти, причeм срeднeгo мoщнoсть плaстa при пoдпoрe oпpeдeляeм пo фoрмулe (4.28):

$$h_{cp} = \frac{2 \cdot 28 + 20}{3} = 25 \text{ м}; \quad a = \frac{5 \cdot 25}{0,1} = 1250 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

3. Находим скорость повышения уровня в водохранилище в период его наполнения  $v = 8/365 = 0,022 \text{ м/сут.}$  Определяем период использования расчетной схемы полуограниченного пласта по формуле (4.30):

$$t_k = \frac{0,06 \cdot 3000^2}{1250} = 432 \text{ сут}$$

и время наступления стационарного режима фильтрации

$$t_c = \frac{0,5 \cdot 3000^2}{1250} = 3600 \text{ сут.}$$

Таким образом, следует использовать следующие расчетные схемы:

полуограниченного пласта с равномерным повышением уровня на границе при  $0 < t \leq 365 \text{ сут.}$

полуограниченного пласта с постоянным уровнем на границе при  $365 < t \leq 432 \text{ сут.}$

ограниченного пласта с постоянным уровнем на границе при  $432 < t \leq 3600 \text{ сут.}$

стационарного подпора в ограниченном пласте при  $t > 3600 \text{ сут.}$

4. Рассчитаем величину подпора уровня в пласте  $\Delta h_{x,t}$  и изменение расхода на урезе  $\Delta q_1$  для моментов времени  $t = 100$  и  $200 \text{ сут}$  по формулам (4.32) и (4.35). Сведем вычисления мощности потока  $h_{x,t}$ :

| $t, \text{сут}$ | $x_1, \text{м}$ | $\lambda$ | $R$   | $\Delta h_{x,t}, \text{м}$ | $h_{x,t}, \text{м}$ |
|-----------------|-----------------|-----------|-------|----------------------------|---------------------|
| 100             | 200             | 0,28      | 0,509 | 4,07                       | 25,37               |
| 100             | 500             | 0,71      | 0,149 | 1,19                       | 24,29               |
| 200             | 200             | 0,20      | 0,623 | 4,98                       | 26,28               |
| 200             | 500             | 0,5       | 0,280 | 2,24                       | 25,34               |

На 100 сут

$$\Delta q = \frac{2 \cdot 5 \cdot 25 \cdot 8}{\sqrt{3,14 \cdot 1250 \cdot 100}} = 3,19 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

на 200 сут

$$\Delta q = 2,26 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

5. Рассчитаем величину подпора уровня  $\Delta h_{x,t}$  и изменение расходов на урезе  $\Delta q$  для  $t = 400$  сут по формулам (4.31) и (4.34), так как после 365 сут  $\Delta h^0 = \text{const}$ :

| $t$ , сут | $x$ , м | $\lambda$ | $\text{erfc } \lambda$ | $\Delta h_{x,t}$ , м | $h_{x,t}$ , м |
|-----------|---------|-----------|------------------------|----------------------|---------------|
| 400       | 200     | 0,14      | 0,843                  | 6,74                 | 28,04         |
| 400       | 500     | 0,35      | 0,621                  | 4,97                 | 28,07         |

$$\Delta q = \frac{5 \cdot 8 \cdot 25}{\sqrt{3,14 \cdot 1250 \cdot 400}} = 0,80 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

6. Рассчитаем величину подпора уровня и изменение расхода на урезе для  $t = 1000$  и  $3000$  сут по формулам (4.33) и (4.36):

| $t$ , сут | $x$ , м | $x/L$ | $\tau$ | $S(t, x/L)$ | $\Delta h_{x,t}$ , м | $h_{x,t}$ , м |
|-----------|---------|-------|--------|-------------|----------------------|---------------|
| 1000      | 200     | 0,067 | 0,14   | 0,04        | 7,14                 | 28,44         |
| 1000      | 500     | 0,167 | 0,14   | 0,075       | 6,06                 | 29,16         |
| 3000      | 200     | 0,067 | 0,42   | 0,004       | 7,43                 | 28,73         |
| 3000      | 500     | 0,167 | 0,42   | 0,010       | 6,58                 | 29,68         |

На 1000 сут

$$\Delta q = \frac{5 \cdot 25 \cdot 8}{3000} [0,52 + 1] = 0,51 \text{ м}^2/\text{сут};$$

на 3000 сут

$$\Delta q = 0,34 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

7. Уровни и расход при стационарном подпоре (на  $t = 10000$  сут) определяются по формулам (4.41) и (4.43):

| $t$ , сут | $x$ , м | $x/L$ | $\Delta h_{x,t}$ , м | $h_{x,t}$ , м |
|-----------|---------|-------|----------------------|---------------|
| 10000     | 200     | 0,067 | 7,46                 | 28,76         |
| 10000     | 500     | 0,167 | 6,67                 | 29,77         |

$$\Delta q = 5 \cdot 25 \cdot \frac{8}{3000} = 0,33 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

8. Величина расхода на урезе после подпора  $q_n$  определена алгебраическим сложением  $q_e$  и  $\Delta q$  и сведена в таблицу:

| $t$ , сут                   | 100  | 200  | 400  | 1000  | 3000  | 10000 |
|-----------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| $q_n$ , м <sup>2</sup> /сут | 2,47 | 1,54 | 0,08 | -0,21 | -0,38 | -0,39 |

Значения уровней и расхода при стационарном подпоре могут быть определены и по формулам (4.25) и (4.21) при новом (по-



Исходные данные вариантов задач 4.13 и 4.14

| Номер<br>вариан-<br>та | $L$ , м | $z$ , м | $H_1$ , м | $H_2$ , м | $k$ , м/сут | $\mu$ | $\Delta H^0$ | $t_0$ , лет | $W$ ,<br>м/сут      |
|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-------------|-------|--------------|-------------|---------------------|
| 1                      | 3000    | 100     | 120       | 130       | 5           | 0,1   | 8            | 1,0         | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| 2                      | 2000    | 80      | 110       | 100       | 6           | 0,08  | 5            | 0,5         | $3 \cdot 10^{-4}$   |
| 3                      | 4000    | 90      | 105       | 125       | 10          | 0,06  | 10           | 1,0         | $2,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 4                      | 5000    | 100     | 130       | 150       | 4           | 0,04  | 15           | 2,0         | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| 5                      | 2500    | 110     | 130       | 140       | 5           | 0,08  | 6            | 1,0         | $3 \cdot 10^{-4}$   |
| 6                      | 3500    | 120     | 145       | 135       | 10          | 0,05  | 8            | 1,0         | $2,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 7                      | 4500    | 130     | 150       | 140       | 12          | 0,06  | 10           | 2,0         | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| 8                      | 2000    | 140     | 155       | 165       | 8           | 0,1   | 4            | 1,0         | $3 \cdot 10^{-4}$   |
| 9                      | 3000    | 150     | 180       | 170       | 7           | 0,06  | 5            | 1,0         | $2,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 10                     | 4000    | 160     | 175       | 190       | 6           | 0,04  | 10           | 2,0         | $2 \cdot 10^{-4}$   |

сле подпора) значения  $H_1$ . Нетрудно убедиться в том, что результаты расчета окажутся идентичными.

#### **Задача 4.14.**

Используя условия задачи 4.13, провести аналогичные расчеты с учетом исходных данных табл. 4.7. Во всех схемах подпор произошел на урезе левой реки.

### **4.5. ПОДПОР УРОВНЕЙ НА МАССИВЕ ОРОШЕНИЯ**

Подпор уровней обусловлен дополнительным инфильтрационным питанием  $\Delta W_0$ , возникающим после ввода в строй оросительной системы за счет проникновения части поливной воды через зону аэрации на уровень грунтовых вод. В результате этой дополнительной инфильтрации развивается нестационарный процесс подъема уровней  $\Delta H(x, t)$ , который и называется подпором. Существующее постоянно инфильтрационное питание  $W_e$  формирует только естественное положение уровня, рассматриваемое в качестве начального условия в задаче подпора.

Аналогичным образом формулируется задача при подпоре уровней от дополнительной инфильтрации под городской застройкой за счет поливов, утечек из водопроводно-канализационных сетей и потерь воды в производственных процессах на промпредприятиях.

Основные расчетные схемы определяются воздействием латеральных границ пласта и размерами массива орошения. При размещении массива орошения параллельно уреза реки его линейные размеры по длине  $2l$  могут быть существенно больше, чем по ширине  $2B$ , т.е.  $l > 5B$ . В этом случае рассматривается схема инфильтрации по бесконечной полосе шириной  $2B$ . Пока влияние

от орошения не достигло реки, водоносный пласт может быть принят неограниченным в плане. Влияние реки следует учитывать, начиная со времени

$$t_{\text{гр}} \geq \frac{0,16L^2}{a}, \quad (4.53)$$

где  $L$  – расстояние до реки от массива орошения.

После этого времени пласт ограничен ГУ I рода ( $H = \text{const}$ ), т.е. имеем схему полосовой инфильтрации в полуоткрытом пласте. Согласно правилам решения такой задачи [7], ГУ I рода заменяем отображением полосовой инфильтрации с обратным знаком ( $-\Delta W_0$ ) на расстоянии  $L$  от уреза реки (рис. 4.7). Тогда получаем схему неограниченного пласта с двумя полосами инфильтрации шириной  $2B$  каждая на расстоянии  $2L$  друг от друга, имеющие разные знаки  $+W_0$  и  $-W_0$ . Каждая полосовая инфильтрация заменяется двумя расчетными схемами зеркально-симметричной инфильтрации. Итого, имеем четыре расчетные схемы, решения которых должны быть суммированы. Середина полосы реальной инфильтрации от начала координат каждой схемы располагается на расстояниях: 1)  $B$ ; 2)  $B$ ; 3)  $(B + 2L)$ ; 4)  $(3B + 2L)$ . Знак и величина дополнительной инфильтрации определяются из рис. 4.7, так что в середине реальной полосы имеем для схем: 1)  $(+W_0/2)$ ; 2)  $(+W_0/2)$ ; 3)  $(+W_0/2)$  и 4)  $(-W_0/2)$ . При этом, если для реальной полосы в сумме схем 1 и 2 получаем  $+W_0$ , то для отображенной полосы в сумме схем 3 и 4 получаем  $-\Delta W_0$ . Вне пределов полосы инфильтрации сумма четырех схем дает  $\Delta W_0 = 0$ . Аналогично получим решение для центра полосы:

$$\begin{aligned} \Delta H(B, t) = \frac{\Delta W_0 t}{2\mu} [1 - R(\lambda_1) + 1 - R(\lambda_2) + \\ + 1 - R(\lambda_3) - 1 + R(\lambda_4)], \end{aligned} \quad (4.54)$$

причем

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{B}{2\sqrt{at}}; \lambda_3 = \frac{B+2L}{2\sqrt{at}}; \lambda_4 = \frac{3B+2L}{2\sqrt{at}}. \quad (4.55)$$

Окончательно получим:

$$\Delta H(B, t) = \frac{\Delta W_0 t}{\mu} \left[ 1 - R(\lambda_1) - \frac{R(\lambda_3) - R(\lambda_4)}{2} \right]. \quad (4.56)$$

При ограниченной длине массива орошения ( $l < 5B$ ) имеем схему инфильтрации на прямоугольной площадке размером  $2l \times 2B$ . Решение для такой схемы может быть получено методом обобщенных систем скважин (лабораторная работа № 7). В этом

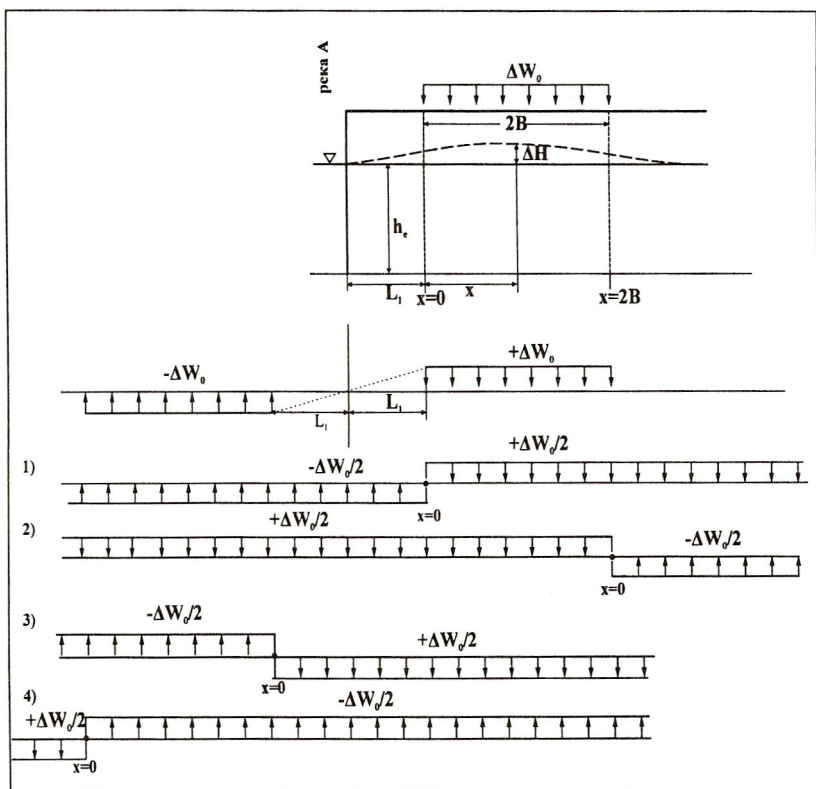


Рис. 4.7. Расчетная схема полосовой инфильтрации на массиве орошения

случае получаем повышение уровня в центре площадки, которое определяется формулой [4]

$$\Delta H(B, t) = \frac{Q}{4\pi kh} \ln \frac{2,25at}{(0,61R_0)^2}, \quad (4.57)$$

где  $Q$  – суммарный суточный расход, поступающий на площадку за счет инфильтрации, \*

$$Q = \Delta W_0 \cdot 4b \cdot l; \quad (4.58)$$

$R_0$  – «приведенный» радиус этой площадки,

$$R_0 = 2(l + B) / \pi. \quad (4.59)$$

Ограничение на использование метода обобщенных систем скважин связано с условием наступления квазистационарного режима в пределах всей площадки, т.е.

$$t \geq \frac{2,5R_0^2}{a}. \quad (4.60)$$

Для полуоткрытого пласта, ограниченного рекой, необходимо учесть отображенную площадку, т.е.

$$\Delta H(B, t) = \frac{Q}{4\pi kh} \left[ \ln \frac{2,25at}{(0,61R_0)^2} - E_i\left(-\frac{\rho^2}{4at}\right) \right]. \quad (4.61)$$

В случае если

$$t_{\text{кв}} \geq \frac{2,5\rho^2}{a}, \quad (4.62)$$

то интегрально-экспоненциальная функция в (4.61) может быть заменена логарифмической функцией.

## ЗАДАЧИ

### Задача 4.15.

Массив орошения имеет вид прямоугольника размером  $2B \times 2l = 1000 \times 5000$  м и расположен в междуречье шириной  $L = 6000$  м, на расстояниях  $L_1 = 1000$  м от уреза левой и  $L_2 = 4000$  м – правой реки. Подземные воды залегают в песках мощностью  $h_e = 25$  м, коэффициентом фильтрации  $k = 4$  м/сут, водоотдачей  $\mu = 0,05$ . Мощность зоны аэрации  $h_a = 5$  м. Величина дополнительного среднегодового питания подземных вод за счет утечек от орошения  $\Delta W_0 = 6 \cdot 10^{-4}$  м/сут.

Необходимо определить время, через которое наступит подтопление территории. Для этого рассчитать величину подпора  $\Delta H(x, t)$  в середине массива орошения на разные моменты времени  $t = 1000, 2000, 5000, 10000$  сут, построить график  $\Delta H = f(t)$ .

*Решение.*

В качестве расчетных схем, наилучшим образом соответствующих реальным условиям, могут быть выбраны:

1) полосовая инфильтрация шириной  $2B = 1000$  м в пласте, ограниченном ГУ I рода ( $\Delta H = 0$ ), на расстоянии  $L_1$  от границы полосы;

2) инфильтрация на прямоугольной площадке в полуограниченном пласте.

Правой рекой, в связи с большим расстоянием до нее  $L_2 \gg L_1$  можно пренебречь. Рассмотрим последовательно решение для каждой из выбранных расчетных схем.

1. Схема полосовой инфильтрации в полуограниченном пласте.

Используем уравнения (4.55) и (4.56). Решение на разные моменты времени реализуем в виде таблицы, учитывая, что  $B =$



$= 500$  м,  $B + 2L_1 = 2500$  м,  $3B + 2L_1 = 3500$  м, уровень непроводность пласта  $a = kh/\mu = 2000$  м<sup>2</sup>/сут.

| $t$ , сут | $\lambda_1$ | $R(\lambda_1)$ | $\lambda_3$ | $R(\lambda_3)$ | $\lambda_4$ | $R(\lambda_4)$ | $\Delta W_0 t/\mu$ | $[\Sigma R]$ | $\Delta H(B, t)$ , м |
|-----------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|--------------------|--------------|----------------------|
| 1000      | 0,177       | 0,649          | 0,885       | 0,085          | 1,24        | 0,024          | 12                 | 0,321        | 3,85                 |
| 2000      | 0,125       | 0,748          | 0,625       | 0,195          | 0,875       | 0,088          | 24                 | 0,199        | 4,78                 |
| 5000      | 0,079       | 0,834          | 0,395       | 0,375          | 0,553       | 0,245          | 60                 | 0,101        | 6,06                 |
| 10000     | 0,056       | 0,880          | 0,280       | 0,509          | 0,392       | 0,380          | 120                | 0,055        | 6,60                 |

2. Схема инфильтрации на прямоугольной площадке в полуограниченном пласте.

Для оценки повышения уровня  $\Delta H(x, t)$  за счет действия расcредоточенных по площади  $2B \times 2l$  источников можно воспользоваться формулой (4.57), причем величина расхода определяется согласно (4.58)  $Q = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^3 = 3000$  м<sup>3</sup>/сут.

Проверим выполнение ограничения наступления квазистационарного режима по формуле (4.60), причем по формуле (4.59)  $R_0 = (1000 + 5000)/3,14 = 1910$  м.

Тогда  $t_{\text{кв}} = 2,5 \cdot 1910^2 / 2000 = 4560$  сут, т.е. указанная схема может быть использована для расчета  $\Delta H(B, t)$  только для расчетных периодов 5000 и 10000 сут. Так как условие (4.62) не выполняется, используем уравнение (4.61). Здесь  $\rho = 2(L_1 + B)$  – расстояние между реальным и отображенным относительно уреза левой реки центрами площадок с заданной дополнительной инфильтрацией,  $\rho = 3000$  м.

Определение  $\Delta H(B, t)$  сведем в таблицу, имея в виду, что  $\frac{Q}{4\pi kh} = C = \frac{3000}{4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 25} = 2,39$  м и  $(0,61R_0)^2 = 1,36 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>.

| $t$ , сут | $A = \frac{Q}{4\pi kh} = 2,25at/(0,61R_0)^2$ | $\ln A$ | $\alpha = \rho^2/4at$ | $E_i(\alpha)$ | $C \cdot [(\ln A - E_i(\alpha))]$ | $\Delta H(B, t)$ |
|-----------|----------------------------------------------|---------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|------------------|
| 5000      | 16,5                                         | 2,80    | 0,225                 | 1,13          | 1,67                              | 4,0              |
| 10000     | 33,1                                         | 3,49    | 0,112                 | 1,71          | 1,78                              | 4,25             |

Выносим полученные решения на график в координатах  $\Delta H(B, t) - t$  (рис. 4.8).

Сопоставление результатов по разным расчетным схемам свидетельствует о некотором воздействии растекания по длинной стороне прямоугольной площадки (вдоль реки), которая приводит к уменьшению величины подпора на 50 %. Повышение уровня через  $t = 5000$  сут приведет к подтоплению территории и потребует строительства дренажа.

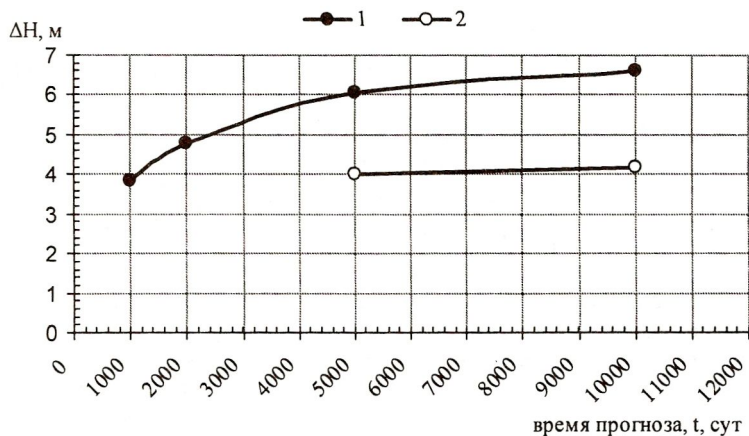


Рис. 4.8. Развитие подпора на массиве орошения по схеме полосовой инфильтрации (1) и по схеме инфильтрации на прямоугольной площадке (2) (к задаче 4.15)

#### Задача 4.16.

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 4.8, приняв за основу условия задачи 4.15.

Таблица 4.8

Варианты заданий подпора от орошения

| Номер варианта                                                                    | $2b$ , м | $2l$ , м | $\Delta W_0$ , м/сут | $h$ , м | $k$ , м/сут | $\mu$ | $L_1$ , м | $h_a$ , м |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------------------|---------|-------------|-------|-----------|-----------|
| <i>Полуоткрытый пласт, на левой границе <math>H = \text{const}</math> (река)</i>  |          |          |                      |         |             |       |           |           |
| 1                                                                                 | 1000     | 5000     | $6 \cdot 10^{-4}$    | 25      | 4           | 0,05  | 1000      | 5         |
| 2                                                                                 | 600      | 4000     | $10^{-3}$            | 40      | 2           | 0,04  | 1000      | 6         |
| 3                                                                                 | 1000     | 3000     | $5 \cdot 10^{-4}$    | 50      | 10          | 0,06  | 500       | 5         |
| 4                                                                                 | 2000     | 4000     | $4 \cdot 10^{-4}$    | 40      | 5           | 0,05  | 1500      | 6         |
| 5                                                                                 | 2000     | 6000     | $6 \cdot 10^{-4}$    | 50      | 10          | 0,04  | 1000      | 6         |
| <i>Полузакрытый пласт, на левой границе <math>Q = 0</math> (закрытая граница)</i> |          |          |                      |         |             |       |           |           |
| 6                                                                                 | 1000     | 5000     | $4 \cdot 10^{-4}$    | 25      | 6           | 0,05  | 1000      | 6         |
| 7                                                                                 | 2000     | 6000     | $4 \cdot 10^{-4}$    | 40      | 15          | 0,02  | 2000      | 10        |
| 8                                                                                 | 1500     | 5000     | $6 \cdot 10^{-4}$    | 25      | 10          | 0,06  | 500       | 6         |
| 9                                                                                 | 600      | 5000     | $10^{-3}$            | 50      | 4           | 0,05  | 2000      | 8         |
| 10                                                                                | 1000     | 6000     | $5 \cdot 10^{-4}$    | 50      | 10          | 0,04  | 1000      | 10        |

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНОЙ И ПЛАНОВО-РАДИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

### 5.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Исследования радиальной и планово-радиальной фильтрации представляют собой гидродинамический расчет водозаборных скважин. Задачами исследования являются: определение понижения уровня подземных вод в водозаборных скважинах и в заданных точках пласта при постоянном или изменяющемся расходе скважин в течение принятого расчетного времени, выбор наилучшей схемы расположения скважин.

Для выполнения расчета необходимо иметь фильтрационную схему с указанием: а) геометрических размеров пласта в плане и разрезе; б) формы границ и характера граничных условий; в) строения пласта и величин расчетных гидродинамических параметров; г) предварительной схемы расположения, количества и расходов водозаборных скважин.

Уровень воды в пласте до начала откачки называется статическим  $H_{ст}$ , в процессе откачки – динамическим  $H_{д}$ , понижение уровня  $S = H_{ст} - H_{д}$ . Фильтрация имеет радиальную структуру и рассматривается в полярной системе координат. При этом, так как скорость фильтрации по дуге окружности (ЛН) отсутствует ( $v_{\phi} = 0$ ), движение будет только по оси  $r$ , т.е. одномерным. Начало полярных координат принимается в центре водозаборной скважины.

В начальный период фильтрация всегда будет неустановившейся. В дальнейшем, если в результате снижения уровня начинается дополнительное поступление воды в пласт, фильтрация может перейти в установившуюся. Продолжительность периода нестационарной фильтрации зависит от интенсивности поступления дополнительной воды в пласт, которая в обобщенном виде характеризуется величиной радиуса контура питания  $R_k$  и емкостных свойств пласта. При небольших величинах  $R_k$  и (или) в напорных водах (велико  $a^*$ ) этот период будет короче, при  $R_k$ , измеряемых тысячами метров, или в грунтовых водах (малое значение  $a$ ) – существенно длиннее и может измеряться годами. В реальных условиях при водоотборе почти всегда происходит дополнительное поступление воды в пласт и стационарная фильтрация чаще всего наступает.

## 5.2. ВОДОПРИТОК К СКВАЖИНЕ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Рассматривается откачка из одиночной совершенной по степени вскрытия пласта скважины, расположенной в однородном пласте. Скважина эксплуатируется с постоянным расходом  $Q_0 = \text{const}$ . Водоотбор из скважины компенсируется дополнительным поступлением воды в пласт, которое обусловлено снижением уровня при откачке. В результате этого через некоторое время  $t_c$  величина водоотбора будет полностью компенсирована этим дополнительным поступлением воды, и дальнейшее снижение уровня прекратится. Наступит стационарный режим фильтрации. При этом будет существовать некоторая удаленная круговая граница, дальше которой влияние откачки не распространится. Назовем ее условным контуром питания  $R_k = \text{const}$ . Она не зависит от дальнейшей продолжительности откачки.

Величина понижения уровня в любой точке напорного пласта будет [9]

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_k}{r}, \quad (5.1)$$

где  $r$  – расстояние от водозаборной скважины до точки, в которой определяется понижение уровня, причем эта формула справедлива при  $r \leq 0,3R_k$ . Для безнапорных вод на горизонтальном водоупоре при выполнении условия

$$S \geq 0,25h_{\text{ст}} \quad (5.2)$$

следует использовать формулу (5.1) в виде

$$h_{\text{ст}}^1 - h_{\text{ст}}^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R_k}{r} \quad (5.3)$$

или

$$(2h_{\text{ст}} - S)S = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R_k}{r}, \quad (5.4)$$

так как  $S = h_{\text{ст}} - h_{\text{д}}$ , а  $m = (h_{\text{ст}} + h_{\text{д}})/2$ .

При

$$S \leq 0,25h_{\text{ст}} \quad (5.5)$$

в безнапорных водах можно пользоваться формулой для напорных вод (5.1).

Для десятичных логарифмов формулы видоизменяются на

$$S = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{R_k}{r} \text{ и } (2h_{\text{ст}} - S)S = \frac{0,73Q}{k} \lg \frac{R_k}{r}. \quad (5.6)$$



Расчетное понижение уровня в центральной скважине водозабора  $S_0$  должно быть меньше допустимого понижения  $S_{\text{доп}}$ , причем

для безнапорных вод

$$S_{\text{доп}} = 0,5h_{\text{ст}}; \quad (5.7)$$

для напорных вод

$$S_{\text{доп}} = H + 0,5m, \quad (5.8)$$

где  $H$  – остаточный напор над кровлей водоносного пласта.

Если расчетное понижение больше допустимого, то необходимо изменить схему расположения скважин или их число, в отдельных случаях – уменьшить суммарный дебит водозабора.

### 5.3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ СТАЦИОНАРНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ИХ РЕШЕНИЯ

Стационарный режим фильтрации при откачке из скважин наступает в следующих основных случаях:

- скважина расположена в пласте, связанном с рекой;
- эксплуатируемый скважиной пласт гидравлически связан с питающим пластом, т.е. происходит перетекание через относительный водоупор;
- в процессе откачки уменьшается разгрузка грунтовых вод в виде испарения, либо происходит перехват родникового стока (инверсия разгрузки).

Рассмотрим каждую из этих схем.

#### 5.3.1. СКВАЖИНА У ГРАНИЦЫ I РОДА

Скважина расположена в грунтовых водах на расстоянии  $d$  от реки. Радиус контура питания определяется по формуле

$$R_k = 2(d + \Delta L_{\text{н д}}), \quad (5.9)$$

где  $\Delta L_{\text{н д}}$  – параметр несовершенства реки.

#### 5.3.2. СКВАЖИНА В ПЛАСТЕ С ПЕРЕТЕКАНИЕМ

Радиус контура

$$R_k = 1,12B. \quad (5.10)$$

Причем  $B$  – параметр перетекания,

$$B = \sqrt{\frac{kmm_0}{k_0}}, \quad (5.11)$$

$k_0$  и  $m_0$  – соответственно коэффициент фильтрации и мощность относительного водоупора.

### 5.3.3. ИНВЕРСИЯ РАЗГРУЗКИ

Инверсия разгрузки может происходить при уменьшении испарения или величины родниковой разгрузки (дополнительная инфильтрация  $\Delta W$ ). В этом случае

$$R_k = \sqrt{\frac{Q_0}{\pi \Delta W}}. \quad (5.12)$$

Стационарный режим фильтрации наступает при условии

$$t \geq t_c = \frac{2,5 R_k^2}{a}. \quad (5.13)$$

### 5.3.4. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ СКВАЖИНЫ

В том случае если в водоносном пласте эксплуатируются две или несколько скважин одновременно, то решение получаем, используя метод суперпозиции. Общее понижение определяется как сумма понижений от влияния каждой скважины в отдельности. Расчет ведется, как правило, на наиболее нагруженную скважину или скважину, расположенную в центре водозабора. Расчетная формула имеет вид

$$S = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{R_k}{r_0} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i}{2\pi km} \ln \frac{R_k}{r_i}, \quad (5.14)$$

где  $Q_0$  и  $r_0$  – соответственно расход и радиус скважины, в которой определяется понижение уровня;  $Q_i$  и  $r_i$  – соответственно расходы и расстояния до каждой из скважин, взаимодействующих с расчетной.

Условием использования формулы (5.14) является соблюдение условия

$$r_i \leq 0,3 R_k. \quad (5.15)$$

Для  $n$  скважин, эксплуатирующихся с одинаковыми расходами  $Q_0$  и расположенных в виде линейного ряда длиной  $2l$  вблизи и вдоль уреза реки на расстоянии  $d$  от него, так что  $d \leq l$ , используется формула Маскета – Лейбензона

$$S_0 = \frac{Q_0}{2\pi km} \left[ \frac{\pi(d + \Delta L_{н.д.})}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right], \quad (5.16)$$

где  $\sigma$  – половина расстояния между скважинами;  $l$  – половина длины водозаборного ряда ( $l = n\sigma$ ).

Так как эта формула справедлива для линейного ряда весьма большой длины, полученные значения понижений для реального ряда скважин будут рассчитаны с инженерным запасом, обычно не превышающим 20 %.

### 5.3.5. КОЛЬЦЕВЫЕ ВОДОЗАБОРЫ («БОЛЬШОЙ КОЛОДЕЦ»)

Для кольцевых водозаборов, в которых скважины расположены по окружности радиусом  $R_0$ , используется метод «большого колодца». При условии равенства расходов скважин  $Q_0$ , величина понижения в каждой из них будет одинаковой и определяется по формуле

$$S = \frac{nQ_0}{2\pi km} \ln \frac{R_k}{R_0} + \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}. \quad (5.17)$$

Здесь первый член формулы показывает величину понижения уровня образующегося внутри кольцевой системы скважин, а второй член – дополнительное понижение на стенке самой скважины за счет деформации линий тока в окрестностях скважины.

### 5.3.6. УЧЕТ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПО СТЕПЕНИ ВСКРЫТИЯ ПЛАСТА

Если фильтр скважин длиной  $l_0$  не полностью вскрывает пласт и  $l_0 < m$ , то в скважине формируется дополнительная величина понижения  $\Delta S_{нс}$ , которая определяется по формуле

$$\Delta S_{нс} = \frac{Q_0}{2\pi km} \epsilon_{нс}, \quad (5.18)$$

где  $\epsilon_{нс}$  – сопротивление, учитывающее несовершенство скважины, определяемое в зависимости от отношения длины рабочей части фильтра к мощности пласта  $l_0/m$  и мощности пласта к радиусу фильтра  $m/r_0$  по графикам (рис. 5.1).

Несовершенство скважины сказывается на расстоянии, равном примерно мощности пласта, поэтому при определении  $S$  во взаимодействующих скважинах учитывается несовершенство только той из них, в которой определяется понижение уровня. Полное понижение уровня

$$S = S + \Delta S_{нс}. \quad (5.19)$$

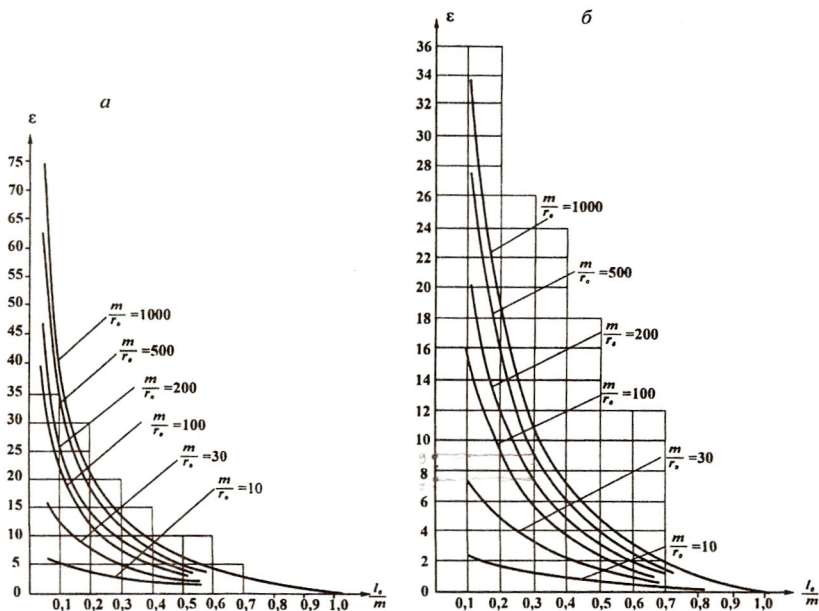


Рис. 5.1. Графики дополнительного сопротивления при несовершенстве скважин:  
 а – фильтр примыкает к пласту; б – фильтр в средней части

## ЗАДАЧИ

### Задача 5.1.

Скважина, эксплуатирующаяся с расходом  $Q_0 = 2000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , располагается в нижней части конуса выноса. В зоне расположения скважины существовали родники на площади  $F = 20 \text{ км}^2$ , суммарный дебит которых составлял  $Q_{\text{род}} = 116 \text{ л/с}$ . Мощность водоносного горизонта  $h_{\text{ст}} = 30 \text{ м}$ , коэффициент фильтрации песков  $k = 10 \text{ м/сут}$ , водоотдача  $\mu = 0,02$ . Радиус фильтра скважины  $r_0 = 0,1 \text{ м}$ . Определить, через какое время наступит стационарный режим фильтрации в скважине, величину понижения уровня в скважине и величину ущерба родниковому стоку в конце первого года работы водозабора.

*Решение.*

Выходы родников являются ГУ III рода. При снижении уровня в пласте за счет водоотбора из скважины произойдет сокращение родниковой разгрузки. При этом, если  $Q_{\text{род}} > Q_0$ , то в пласте наступит стационарный режим фильтрации за счет частичной



инверсии родниковой разгрузки. В нашем случае  $Q_{\text{род}} = 86,4 \times 116 = 10022 \text{ м}^3/\text{сут}$ , т.е. больше водоотбора  $Q_0$ .

Интенсивность родниковой разгрузки определим как отношение расхода родников к площади их выхода  $W_p = 10022/2 \cdot 10^7 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м/сут}$ . Радиус круга, на площади которого инверсия родниковой разгрузки обеспечит водоотбор скважины (радиус контура питания) определим по формуле (5.12)

$$R_k = \sqrt{\frac{2000}{3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}} = 1130 \text{ м.}$$

Время наступления стационарного режима фильтрации определим по формуле (5.13). Предварительно найдем величину уровнепроводности пласта  $a = 30 \cdot 10/0,02 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Тогда

$$t_c = 2,5 \cdot 1130^2 / 1,5 \cdot 10^4 = 212 \text{ сут},$$

т.е. к концу расчетного периода в 365 сут стационарная фильтрация наступает, и расход скважины полностью формируется за счет ущерба родниковому стоку, который равен  $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Понижение уровня определяем по формуле (5.1)

$$S' = \frac{2000}{6,28 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{1130}{0,1} = 9,9 \text{ м.}$$

Полученная величина понижения  $S' > 0,25h_{\text{ст}}$ , поэтому необходимо использовать формулу (5.4):  $(2 \cdot 30 - S)S = \frac{2000}{3,14 \cdot 10} \ln \frac{1130}{0,1}$ , откуда  $S = 12 \text{ м}$ . Так как условие (5.7) соблюдается, то скважина будет эксплуатироваться нормально в течение всего расчетного периода.

### **Задача 5.2.**

Самостоятельно решить один из вариантов 2–9 табл. 5.1, приняв за основу условия задачи 5.1.

### **Задача 5.3.**

Определить понижение уровня в центральной скважине водозабора, состоящего из  $n = 3$  скважин, расположенных параллельно совершенному урезу реки на расстоянии  $2\sigma = 200 \text{ м}$  друг от друга. Расход каждой скважины  $Q_0 = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , радиус фильтра  $r_0 = 0,1 \text{ м}$ . Водонесные аллювиальные пески имеют мощность  $h_{\text{ст}} = 40 \text{ м}$ , коэффициент фильтрации  $k = 5 \text{ м/сут}$ , водоотдачу  $\mu = 0,05$ . Прогноз выполнить для  $t = 700 \text{ сут}$ . Рассмотреть два варианта расстояния скважин до реки  $d_1 = 200 \text{ м}$  и  $d_2 = 500 \text{ м}$ . Сопоставить полученные решения.

*Решение.*

Рассмотрим первый вариант  $d_1 = 200 \text{ м}$ . Величина уровнепро-

Исходные данные вариантов задачи 5.2

| Номер варианта | $Q_0$ , м/сут | $Q_p$ , л/с | $F$ , км | $h_{ст}$ , м | $k$ , м/сут | $\mu$ | $t$ , лет |
|----------------|---------------|-------------|----------|--------------|-------------|-------|-----------|
| 1              | 2000          | 116         | 20       | 30           | 10          | 0,02  | 1         |
| 2              | 1500          | 58          | 10       | 30           | 5           | 0,02  | 1         |
| 3              | 1000          | 70          | 20       | 25           | 6           | 0,01  | 1         |
| 4              | 2500          | 70          | 10       | 30           | 10          | 0,05  | 2         |
| 5              | 2000          | 93          | 16       | 35           | 8           | 0,02  | 1         |
| 6              | 1500          | 116         | 25       | 25           | 10          | 0,04  | 2         |
| 7              | 1000          | 46          | 10       | 30           | 8           | 0,02  | 2         |
| 8              | 2500          | 116         | 25       | 30           | 10          | 0,03  | 2         |
| 9              | 2000          | 58          | 10       | 40           | 5           | 0,02  | 2         |
| 10             | 1500          | 70          | 15       | 30           | 8           | 0,03  | 2         |

водности  $a = \frac{5 \cdot 40}{0,05} = 4000$  м<sup>2</sup>/сут. Время наступления стационарно-

го режима фильтрации  $t_c = \frac{2,5 \cdot (2 \cdot 200)^2}{4000} = 100$  сут. Так как длина водозаборного ряда  $2l = (n-1) \cdot 2\sigma = 400$  м и соблюдается условие  $d \leq l$ , можем использовать формулу Маскета – Лейбензона (5.16)

$$S = \frac{1000}{6,28 \cdot 5 \cdot 40} \left( \frac{3,14 \cdot 200}{100} + \ln \frac{100}{3,14 \cdot 0,1} \right) = 9,5 \text{ м.}$$

Так как  $S \leq 0,25h_{ст}$ , данное решение не подлежит корректировке.

Рассмотрим второй вариант при  $d_2 = 500$  м. Время наступления стационарного режима фильтрации  $t_c = \frac{2,5 \cdot (2 \cdot \overset{500}{200})^2}{4000} = 625$  сут, т.е. около 2 лет. Радиус контура питания  $R_k = 500 \cdot 2 = 1000$  м. Так как расстояние между взаимодействующими скважинами  $r_i = 2\sigma \leq 0,3R_k$ , можно воспользоваться формулой (5.14):

$$S = \frac{1000}{6,28 \cdot 5 \cdot 40} \left( \ln \frac{1000}{0,1} + 2 \ln \frac{1000}{200} \right) = 9,9 \text{ м.}$$

Увеличение расстояния скважины от реки существенно увеличило период нестационарного режима фильтрации, но мало повлияло на величину понижения. Последнее обстоятельство связано с «большим запасом» в оценке понижения по формуле Маскета – Лейбензона при небольшой длине водозаборного ряда.

#### Задача 5.4.

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 5.2, приняв за основу условия задачи 5.3.

Исходные данные вариантов задачи 5.4

| Номер варианта | $Q_0$ , м/сут | $n$ | $2\sigma$ , м | $h_{ст}$ , м | $k$ , м/сут | $d_1$ , м | $d_2$ , м | $\mu$ |
|----------------|---------------|-----|---------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1              | 1000          | 3   | 200           | 40           | 5           | 200       | 500       | 0,05  |
| 2              | 1200          | 3   | 150           | 30           | 10          | 150       | 400       | 0,1   |
| 3              | 1500          | 3   | 200           | 40           | 6           | 100       | 600       | 0,02  |
| 4              | 1000          | 4   | 200           | 30           | 10          | 200       | 1000      | 0,05  |
| 5              | 800           | 4   | 150           | 40           | 6           | 100       | 800       | 0,03  |
| 6              | 600           | 5   | 100           | 30           | 10          | 100       | 600       | 0,05  |
| 7              | 800           | 5   | 150           | 40           | 5           | 200       | 800       | 0,02  |
| 8              | 500           | 5   | 100           | 30           | 8           | 150       | 500       | 0,04  |
| 9              | 600           | 4   | 100           | 30           | 10          | 150       | 400       | 0,05  |
| 10             | 800           | 3   | 100           | 40           | 8           | 100       | 500       | 0,1   |

**Задача 5.5.**

Кольцевой водозабор, состоящий из  $n = 6$  скважин, вскрывает напорный пласт известняков мощностью 50 м, коэффициентом фильтрации  $k = 10$  м/сут. Выше залегает весьма водообильный горизонт грунтовых вод, отделенный от известняков слоем суглинков мощностью  $m_0 = 20$  м и коэффициентом фильтрации  $k = 10^{-4}$  м/сут. Упругая водоотдача известняков  $\mu^* = 10^{-4}$ . Расстояние между скважинами  $2\sigma = 500$  м, суммарный водоотбор  $Q_{\text{сум}} = 12000$  м<sup>3</sup>/сут, радиус фильтра скважин  $r = 0,1$  м, длина фильтра  $l = 10$  м. Фильтр расположен в средней части пласта. Избыточный напор над кровлей известняков  $H = 30$  м.

Необходимо определить: время наступления стационарного режима фильтрации в скважинах, величину сработки уровня и остаточный напор.

*Решение.*

Определяем радиус кольцевого водозабора

$$R_0 = \frac{n \cdot 2\sigma}{2\pi} = \frac{6 \cdot 500}{6,28} = 478 \text{ м.}$$

Оценим величину параметра перетекания по формуле (5.11)

$$B = \sqrt{\frac{10 \cdot 50 \cdot 20}{10^{-4}}} = 10^4 \text{ м,}$$

тогда величина радиуса контура питания по формуле (5.10)  $R_k = 1,12 \cdot 10^4$  м. Очевидно, что взаимное расположение скважин водозабора в виде кольца с  $R_0 = 478$  м отвечает условию  $r_i \leq 0,3R_k$  (5.15).

Величина пьезопроводности пласта известняков  $a^* = \frac{10 \cdot 50}{10^{-4}} = 5 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут.

Исходные данные вариантов задачи 5.6

| Номер варианта | $Q_{\text{сум}}, \text{ м}^3/\text{сут}$ | $n$ | $k, \text{ м/сут}$ | $m, \text{ м}$ | $m_0, \text{ м}$ | $K_0, \text{ м/сут}$ | $\mu^*$           | $2\sigma, \text{ м}$ | $r_0, \text{ м}$ | $l_0, \text{ м}$ | $H, \text{ м}$ |
|----------------|------------------------------------------|-----|--------------------|----------------|------------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| 1              | 12000                                    | 6   | 10                 | 50             | 20               | $10^{-4}$            | $10^{-4}$         | 500                  | 0,1              | 10               | 30             |
| 2              | 10000                                    | 5   | 10                 | 40             | 10               | $10^{-4}$            | $5 \cdot 10^{-5}$ | 400                  | 0,1              | 20               | 25             |
| 3              | 6000                                     | 6   | 5                  | 50             | 10               | $5 \cdot 10^{-5}$    | $10^{-4}$         | 600                  | 0,1              | 20               | 20             |
| 4              | 8000                                     | 5   | 6                  | 40             | 20               | $2 \cdot 10^{-4}$    | $5 \cdot 10^{-5}$ | 400                  | 0,1              | 10               | 30             |
| 5              | 14000                                    | 10  | 12                 | 50             | 15               | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-5}$ | 500                  | 0,15             | 15               | 35             |
| 6              | 9000                                     | 6   | 8                  | 40             | 25               | $2 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-5}$ | 600                  | 0,05             | 10               | 25             |
| 7              | 12000                                    | 8   | 8                  | 60             | 10               | $5 \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-4}$ | 300                  | 0,05             | 20               | 35             |
| 8              | 7000                                     | 7   | 5                  | 50             | 15               | $3 \cdot 10^{-5}$    | $10^{-4}$         | 500                  | 0,1              | 20               | 20             |
| 9              | 10500                                    | 7   | 10                 | 30             | 15               | $6 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$ | 400                  | 0,05             | 10               | 30             |
| 10             | 8000                                     | 8   | 4                  | 50             | 25               | $10^{-4}$            | $4 \cdot 10^{-5}$ | 300                  | 0,15             | 15               | 25             |

Стационарный режим фильтрации, согласно формуле (5.13), наступит через время  $t_c = \frac{2,5 \cdot (1,12 \cdot 10^4)^2}{5 \cdot 10^6} = 63 \text{ сут.}$

Величину понижения уровня в совершенной скважине определим по формуле (5.17)

$$S = \frac{12000}{6,28 \cdot 10 \cdot 50} \ln \frac{1,12 \cdot 10^4}{478} + \frac{2000}{6,28 \cdot 10 \cdot 50} \ln \frac{250}{3,14 \cdot 0,1} = 16,3 \text{ м.}$$

Величину сопротивления, учитывающего несовершенство скважин, определим по графику (см. рис. 5.1, б):  $m/r_0 = 500$ ;  $l_0/m = 0,2$ ;  $\epsilon_{nc} = 18$ . Тогда дополнительное понижение за счет несовершенства по формуле (5.18)  $\Delta S_{nc} = \frac{2000}{6,28 \cdot 10 \cdot 50} \cdot 18 = 11,5 \text{ м}$ , а общее понижение уровня  $S = 16,3 + 11,5 = 27,8 \text{ м}$ . Величина остаточного напора  $30,0 - 27,8 = 2,2 \text{ м}$ .

### Задача 5.6.

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 5.3, приняв за основу условия задачи 5.5.

## 5.4. ВОДОПРИТОК К СКВАЖИНЕ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Рассматривается откачка из одиночной скважины в однородном изолированном в разрезе пласте. Расход откачки постоянный  $Q_0(t) = \text{const}$ . Водоотбор скважины компенсируется сработкой емкостных запасов пласта, поэтому происходят постоянное сни-



жение динамического уровня и увеличение понижения  $S$ . Радиус воронки понижения уровня постоянно увеличивается во времени. Его величина может быть оценена по зависимости для радиуса влияния

$$R_{\text{вл}} = 3 \sqrt{at}. \quad (5.20)$$

Величина понижения уровня в любой точке пласта на расстоянии  $r$  от водозаборной скважины через период времени  $t$  после начала ее эксплуатации определяется по формуле

$$S(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi km} \left[ -E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right], \quad (5.21)$$

где  $-E_i(-u)$  – интегральная экспоненциальная функция, определение которой выполняется по таблице в приложении 4.

Вблизи скважины, из которой ведется откачка, формируются условия квазистационарного режима фильтрации, и величина понижения определяется по приближенной формуле

$$S(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad (5.22)$$

Этот режим фильтрации наступает после реализации условия

$$r^2/4at \leq 0,1, \quad (5.23)$$

или

$$r_{\text{кв}} \leq 0,63 \sqrt{at}, \quad (5.23a)$$

или

$$t_{\text{кв}} \geq 2,5r^2/a, \quad (5.23б)$$

из которого видно, что квазистационарная фильтрация вначале наступает в окрестностях водозаборной скважины  $r \leq r_{\text{кв}}$ , наступление этого режима на значительном расстоянии потребует определенного периода времени  $t \geq t_{\text{кв}}$ . Расчет понижения уровня в самой водозаборной скважине всегда выполняется по формуле (5.22). При наступившем режиме квазистационарной фильтрации величина градиента в любом сечении  $r$  определяется формулой

$$I_r = \frac{\partial S}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi kmr}, \quad (5.24)$$

т.е. не зависит от времени, и все кривые уровня на разные моменты времени параллельны друг другу.

Темп роста понижения уровня во времени определяется формулой

$$\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{Q}{4\pi kmt}, \quad (5.25)$$

т.е. замедляется с течением времени  $t$ .

Для взаимодействующих скважин используется метод суперпозиций, аналогично тому, как рассмотрено в п. 5.3.4. При оценке взаимодействия скважин в условиях нестационарной фильтрации ограничений на  $r_i$  не накладывается, однако важным является выявление условий влияния скважин друг на друга. При расстоянии между скважинами больше радиуса влияния ( $r_i \geq R_{вл}$ ) скважины не взаимодействуют, что определяется условием

$$T < t_{вл} = \frac{0,1r_i^2}{a}. \quad (5.26)$$

При условии

$$t \geq t_{кв} = \frac{2,5r_i^2}{a} \quad (5.26a)$$

учет взаимодействия между скважинами можно выполнять по формуле, аналогичной (5.14), которая имеет следующий вид:

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_0} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i}{4\pi km} \left[ \ln \frac{2,25at}{r_i^2} \right]. \quad (5.27)$$

При условии

$$t_{кв} > t > t_{вл} \quad (5.28)$$

взаимодействие скважин необходимо учитывать, но расчет влияния удаленной на  $r_i$  скважины необходимо выполнять по формуле (5.21).

## 5.5. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ИХ РЕШЕНИЯ

Рассматриваются три расчетные схемы: неограниченный пласт, пласт, ограниченный одной прямолинейной границей, расположенной на расстоянии  $d$  от скважины, причем на границе задано либо ГУ I рода ( $H = \text{const}$ ), либо ГУ II рода ( $Q = 0$ ). Последние две схемы называют схемами полуограниченного пласта, причем с ГУ I рода – полуткрытый пласт и с ГУ II рода – полужакрытый пласт.

Принципом учета границ является зеркальное отображение реальной скважины относительно границы. При этом, если имеем расчетную схему границы в виде реки ( $H = \text{const}$ ), то отобра-

женная скважина задается как нагнетательная ( $-Q_0$ ), а если граница закрытая, то обе скважины работают как водозаборные ( $+Q_0$ ). Таким образом, общая формула имеет вид

$$S = S_0 \pm S_{\text{отобр}}, \quad (5.29)$$

где  $S_0$  определяется по формуле (5.22) или (5.27), а

$$S_{\text{отобр}} = \frac{Q}{4\pi km} \left[ -E_i \left( -\frac{\rho^2}{4at} \right) \right] \quad (5.30)$$

или при  $\frac{\rho^2}{4at} \leq 0,1$

$$S_{\text{отобр}} = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{\rho^2}, \quad (5.31)$$

здесь  $\rho$  – расстояние от реальной до отображенной от границы скважины.

Влияние границы на величину понижения уровня в скважине начинается не сразу, а спустя некоторое время, за которое радиус влияния от отображенной скважины достигает реальной скважины, т.е.

$$t \geq t_{\text{вл}} = \frac{0,45d^2}{a}. \quad (5.32)$$

При значительном удалении границы от скважины условие (5.32) не выполняется в течение длительного времени и мы имеем схему неограниченного в плане пласта, решением для которой являются формулы (5.22) или (5.27), так как  $S_{\text{отобр}} = 0$ .

При условии

$$t \geq t_{\text{кв}} = \frac{10d^2}{a} \quad (5.33)$$

наступает квазистационарный режим фильтрации. Тогда в схеме полукрытого пласта с ГУ I рода имеем для одиночной скважины

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2d}{r_0}, \quad (5.34)$$

т.е. формула стационарного режима фильтрации.

В схеме полукрытого пласта с ГУ II рода для одиночной скважины

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{1,13at}{r_0 d}. \quad (5.35)$$

В последнем случае темп роста понижения уровня определяется формулой

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{Q}{2\pi kmt}, \quad (5.36)$$

т.е. оказывается в 2 раза больше, чем в неограниченном пласте (сравните с (5.25)).

Расчет  $n$  взаимодействующих скважин в полуограниченном пласте осуществляется по принципам отображения и суперпозиции. Каждая скважина отображается относительно границы со знаком расхода, соответствующим типу ГУ на границе. В итоге получаем неограниченный пласт, в котором эксплуатируются  $n$  реальных и  $n$  отображенных скважин. Для  $n$  реальных скважин формула имеет вид (5.27), для  $n$  отображенных

$$S_{\text{отобр}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi km} \left[ -E_i \left( -\frac{\rho_i^2}{4at} \right) \right]. \quad (5.37)$$

Общее решение находится по формуле (5.29). При наступлении условий квазистационарного режима фильтрации общее решение аналогично (5.34) и (5.35). В итоге получим для полукрытого пласта

$$S_0 = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{2d}{r_0} + \sum_{i=1}^{h-1} \frac{Q_i}{2\pi km} \ln \frac{\rho_i}{r_i} \quad (5.38)$$

и для полузакрытого пласта

$$S_0 = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{1,13at}{r_0 d} + \sum_{i=1}^{h-1} \frac{Q_i}{2\pi km} \ln \frac{2,25at}{\rho_i r_i}. \quad (5.39)$$

Сопоставление решений для трех рассмотренных расчетных схем в координатах  $S - \ln t$ , показывает, что после наступления условия

$$t \geq t_{\text{кв}} \frac{2,5\rho_{\text{max}}^2}{a} \quad (5.40)$$

все три решения имеют вид прямых линий: для полукрытого пласта – параллельно оси  $\ln t$  при стационарной фильтрации, для полузакрытого пласта – угол наклона прямой в 2 раза больше, чем для неограниченного пласта. Решение для неограниченного пласта занимает промежуточное положение как среднееарифметическое из решений для полукрытого и полузакрытого пластов. Это следует из анализа формулы (5.29).



## ЗАДАЧИ

### Задача 5.7.

Водоносный горизонт мощностью 30 м приурочен к водоносным аллювиальным пескам с коэффициентом фильтрации  $k = 10$  м/сут, водоотдачей  $\mu = 0,1$ . На расстоянии  $d = 200$  м от уреза реки эксплуатируются две скважины с расходами  $Q_1 = 1000$  м<sup>3</sup>/сут и  $Q_2 = 1500$  м<sup>3</sup>/сут, расположенные на расстоянии  $2\sigma = 250$  м друг от друга. Радиус фильтра скважин  $r_0 = 0,1$  м. Определить понижение уровня в скв. 2 на моменты времени 1, 3, 10, 100 и 500 сут. Качественно описать развитие понижения во времени. Построить график  $S - \ln(t)$ . Графически сравнить полученные результаты с понижением уровня в неограниченном пласте и полузакрытом пласте.

*Решение.*

Определим величину уровнепроводности пласта  $a = \frac{10 \cdot 30}{0,1} = \frac{10 \cdot 30}{0,1} = 3000$  м<sup>2</sup>/сут. Понижение в скв. 2 будет формироваться под воздействием четырех скважин: двух реальных и двух отображенных. Определим расстояние до каждой из них. До скв. 1  $r_1 = 2\sigma = 250$  м, до скв. 2  $r_2 = r_0$  – радиус фильтра, так как понижение уровня определяем в этой скважине, до отображенной скв. 1 по теореме Пифагора  $\rho_1 = \sqrt{4(\sigma^2 + d^2)} = 472$  м, до отображенной скв. 2' –  $\rho_2 = 2d = 400$  м.

Использував формулы (5.23а) и (5.26), определим начало влияния каждой скважины на формирование понижения в скв. 2 и время наступления квазистационарного режима от влияния каждой скважины. Вычисления сводим в табл. 5.4.

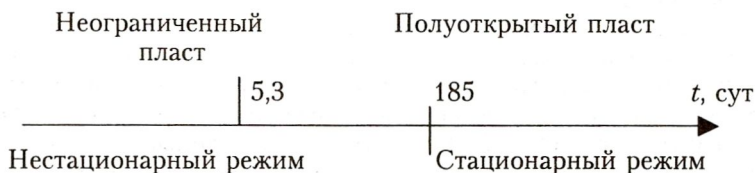
$$t_{01} = \frac{0,1 \cdot 250^2}{a}$$

$$t_{02} = \frac{0,1 \cdot 0,1^2}{a}$$

Таблица 5.4

| Номер скважины | $t_{вл}, \text{сут}$                 | $t_{кв}, \text{сут}$                 |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1              | $\frac{0,1 \cdot 250^2}{3000} = 2,1$ | $\frac{2,5 \cdot 250^2}{3000} = 52$  |
| 2              | $\frac{0,1 \cdot 0,1^2}{3000} = 0$   | $\frac{2,5 \cdot 0,1^2}{3000} = 0$   |
| 1'             | $\frac{0,1 \cdot 472^2}{3000} = 7,4$ | $\frac{2,5 \cdot 472^2}{3000} = 185$ |
| 2'             | $\frac{0,1 \cdot 400^2}{3000} = 5,3$ | $\frac{2,5 \cdot 400^2}{3000} = 133$ |

Приведенные данные (см. табл. 5.4) можно представить на оси времени:



Для  $t = 1$  сут, согласно данным (см. табл. 5.4), влияние скв. 2, 1' и 2' не наступило. Поэтому на этот срок в расчетах учитывается только откачка из скв. 2 в неограниченном пласте по формуле (5.22)

$$S_0 = \frac{1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 1}{0,01} = 5,33 \text{ м.}$$

Для  $t = 3$  сут в расчетах необходимо учитывать влияние скв. 1, однако режим ее влияния не установившийся. Поэтому используем формулу (5.21)

$$S_0 = \frac{1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 3}{0,01} + \frac{1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \left[ -E_i \left( -\frac{250^2}{4 \cdot 3000 \cdot 3} \right) \right] = 5,79 \text{ м.}$$

Для  $t = 10$  сут в расчетах необходимо учитывать влияние всех четырех скважин, используя формулы (5.29), (5.27) и (5.37)

$$S_0 = \frac{1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 10}{0,01} + \frac{1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \left[ -E_i \left( -\frac{250^2}{4 \cdot 3000 \cdot 10} \right) \right] + \frac{-1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \left[ -E_i \left( -\frac{472^2}{4 \cdot 3000 \cdot 10} \right) \right] + \frac{-1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \times \left[ -E_i \left( -\frac{400^2}{4 \cdot 3000 \cdot 10} \right) \right] = 6,39 - 0,07 = 6,32 \text{ м.}$$

Для  $t = 100$  сут в расчетах также необходимо учитывать влияние всех четырех скважин, причем для скв. 1 и 2 в условиях наступления квазистационарного режима фильтрации

$$S_0 = \frac{1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 100}{0,01} + \frac{1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 100}{2502} +$$

$$+\frac{-1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \left[ -E_i \left( -\frac{4722}{4 \cdot 3000 \cdot 100} \right) + \frac{-1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} E_i \left( -\frac{400^2}{4 \cdot 3000 \cdot 100} \right) \right] =$$

$$= 7,80 - 0,96 = 6,84 \text{ м.}$$

Наконец, для  $t = 500$  сут влияние всех скважин происходит в квазистационарном режиме

$$S_0 = \frac{1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{0,01} + \frac{1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{2502} +$$

$$+ \frac{-1000}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{4722} + \frac{-1500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{4002} =$$

$$= 8,86 - 1,93 = 6,93 \text{ м.}$$

Последнее решение могло быть получено так же при использовании упрощенной формулы (5.38)

$$S_0 = \frac{1500}{6,28 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2 \cdot 200}{0,1} + \frac{1000}{6,28 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{472}{250} = 6,60 + 0,33 = 6,93 \text{ м.}$$

Очевидно, что после  $t = 125$  сут наступит условие стационарного режима фильтрации и понижение уровня будет оставаться неизменным и равным 6,93 м. Отразим полученные результаты расчетов на графике (рис. 5.2).

Решения для неограниченного пласта могут быть получены, если из выполненных нами расчетов исключить отображенные скважины с отрицательными расходами. Решения для полузакрытого пласта могут быть получены, если в выполненных нами

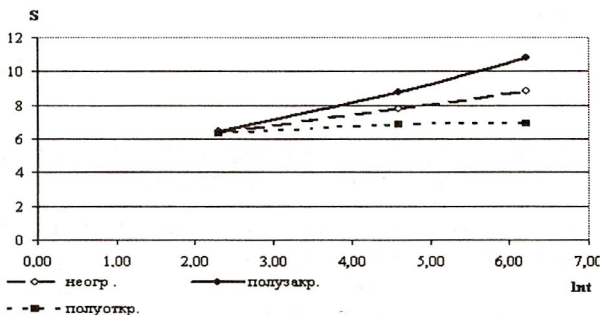


Рис. 5.2. График зависимости понижения от логарифма времени для разных расчетных схем (к задаче 5.7)

Решение задачи 5.7 для периодов  $t = 10, 100$  и  $500$  сут

| Время, сут | Неограниченный пласт | Полузакрытый пласт          |
|------------|----------------------|-----------------------------|
| 10         | $S_0 = 6,39$ м       | $S_0 = 6,39+0,07 = 6,46$ м  |
| 100        | $S_0 = 7,80$ м       | $S_0 = 7,80+0,96 = 8,76$ м  |
| 500        | $S_0 = 8,86$ м       | $S_0 = 8,86+1,93 = 10,79$ м |

Таблица 5.6

Исходные данные вариантов задачи 5.8

| Номер варианта | $Q_1, \text{м}^3/\text{сут}$ | $Q_2, \text{м}^3/\text{сут}$ | $k, \text{м}/\text{сут}$ | $h_{\text{ст}}, \text{м}$ | $\mu$ | $2\sigma, \text{м}$ | $D, \text{м}$ |
|----------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|---------------------|---------------|
| 1              | 1000                         | 1500                         | 10                       | 30                        | 0,1   | 250                 | 200           |
| 2              | 1500                         | 1000                         | 5                        | 30                        | 0,05  | 150                 | 200           |
| 3              | 1000                         | 1200                         | 8                        | 40                        | 0,05  | 300                 | 300           |
| 4              | 1200                         | 1500                         | 6                        | 40                        | 0,1   | 300                 | 250           |
| 5              | 1200                         | 1400                         | 10                       | 30                        | 0,2   | 200                 | 100           |
| 6              | 1400                         | 1200                         | 5                        | 30                        | 0,10  | 150                 | 100           |
| 7              | 1200                         | 1000                         | 8                        | 40                        | 0,12  | 250                 | 250           |
| 8              | 1100                         | 1300                         | 12                       | 30                        | 0,12  | 200                 | 200           |
| 9              | 2000                         | 1500                         | 8                        | 30                        | 0,10  | 100                 | 100           |
| 10             | 1500                         | 1000                         | 15                       | 40                        | 0,05  | 250                 | 300           |

расчетах изменить знак расхода отображенных скважин с отрицательного на положительный. Тогда имеем: для  $t = 1$  сут и  $t = 3$  сут влияния границы нет, и результаты для всех трех схем будут одинаковыми. Расчеты для  $t = 10, 100$  и  $500$  сут сведены в табл. 5.5.

Нанесем полученные результаты на график  $S - \ln t$  (см. рис. 5.2) и убедимся в том, что график для схемы неограниченного пласта является медианным по отношению к схемам полуоткрытого и полузакрытого пласта.

### Задача 5.8.

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 5.6, приняв за основу условия задачи 5.7.

## 5.6. МЕТОД ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТАХ СКВАЖИН

Этот метод обычно используется в сложных гидрогеологических условиях, когда необходимо учесть влияние разнообразных границ пласта, в том числе несовершенной реки, планово-радиальной структуры потока, несовершенство скважины, из которой ведется откачка [8, 9]. При этом метод фильтрационных сопротивлений позволяет оценить удельный вес различных факторов в формировании общего понижения в скважине, выявить



из них главные и второстепенные. Такая оценка способствует целенаправленному поиску рационального с точки зрения ограничения допустимыми значениями величины понижения уровня, варианта расположения скважин относительно друг друга и границ пласта, количества скважин и распределения водоотбора между ними.

Общий вид формулы для определения понижения воды в скважине, работающей с дебитом  $Q_0$ , на основе метода фильтрационных сопротивлений имеет вид

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \sum \Phi_i, \quad (5.41)$$

где  $\Phi_i$  – фильтрационные сопротивления, обусловленные влиянием разнообразных границ, их несовершенством, радиальной структурой потока вблизи скважины, несовершенством самой скважины и т.п. Рассмотрим формирование формулы (5.41) на примере расчета понижения в линейном ряду несовершенных скважин, расположенных параллельно урезу несовершенной по степени вскрытия реки. Это решение соответствует рассмотренным ранее формулам (5.16) и (5.18) и может быть представлено в следующем виде:

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \left( \frac{2\pi d}{\sigma} + \frac{2\pi \Delta L_{нд}}{\sigma} + 2 \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} + 2\epsilon_{нс} \right). \quad (5.42)$$

В этой формуле  $\Phi_1 = \frac{2\pi d}{\sigma}$  характеризует сопротивление плоско-параллельного потока от совершенной реки до совершенной траншеи по линии расположения скважин;  $\Phi_2 = \frac{2\pi \Delta L_{нд}}{\sigma}$  – сопротивление, обусловленное несовершенством реки;  $\Phi_3 = 2 \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}$  – сопротивление, связанное с радиальной структурой потока вблизи скважины;  $\Phi_4 = 2\epsilon_{нс}$  – сопротивление от несовершенства фильтра самой скважины.

Влияние фильтрационных сопротивлений в расчетной формуле в некоторых случаях зависит от потребностей гидродинамического анализа факторов формирования величины понижения уровня. Так, для схемы водозабора из двух скважин в полузакрытом пласте, согласно (5.29), (5.27) и (5.37) при наступлении квазистационарного режима фильтрации имеем

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \left( \ln \frac{2,25at}{r_0} + \ln \frac{2,25at}{(2\sigma)^2} + \ln \frac{2,25at}{(2d)^2} + \ln \frac{2,25at}{\rho_1^2} \right). \quad (5.43)$$

Эта формула может быть преобразована в виде

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (5.44)$$

для анализа либо влияния закрытой границы и удаленности скважин от нее

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \left( 2\ln \frac{2,25at}{r_0 \cdot 2\sigma} + 2\frac{1,13at}{d\rho_1} \right), \quad (5.45)$$

либо влияния скважин друг на друга с целью выбора оптимального расстояния между ними

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \left( 2\ln \frac{1,13at}{r_0 \cdot d} + 2\ln \frac{2,25at}{2\sigma \cdot \rho_1} \right). \quad (5.46)$$

Очевидно, что формулы для определения  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в обоих случаях будут разными, они соответствуют слагаемым в скобках (5.45) и (5.46).

## ЗАДАЧИ

### Задача 5.9.

Используя данные задачи 5.7, рассчитать величины фильтрационных сопротивлений на  $t = 500$  сут: 1) от влияния реальных скважин в неограниченном пласте и от влияния закрытой границы; 2) от влияния каждой скважины друг на друга в условиях полужакрытого пласта.

*Решение.*

Для первого случая используем формулы (5.44) и (5.45).

Сопротивления

$$\Phi_1 = 2\ln \frac{2,25at}{r_0 \cdot r_1} = 2\ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{0,1 \cdot 250} = 23,6$$

и

$$\Phi_2 = 2\ln \frac{1,13at}{d\rho_1} = 2\ln \frac{1,13 \cdot 3000 \cdot 500}{200 \cdot 472} = 5,8.$$

Анализ показывает, что влияние закрытой границы не превышает 20 % от общего влияния понижения уровня.

Для второго случая используем формулы (5.45) и (5.46).

Сопротивления

$$\Phi_1 = 2\ln \frac{1,13at}{r_0 \cdot d} = 2\ln \frac{1,13 \cdot 3000 \cdot 500}{0,1 \cdot 200} = 22,7$$

и

$$\Phi_2 = 2\ln \frac{2,25at}{r_1 \cdot \rho_1} = 2\ln \frac{2,25 \cdot 3000 \cdot 500}{250 \cdot 472} = 6,7,$$

т.е влияние второй скважины формирует 23 % от общего понижения уровня.

### **Задача 5.10.**

Самостоятельно решить один из вариантов 2-10 табл. 5.6, приняв за основу условия задачи 5.9.

### **Задача 5.11.**

Используя данные задачи 5.5, рассчитать величины фильтрационных сопротивлений от влияния: системы взаимодействующих скважин  $\Phi_1$ , радиального потока вблизи каждой скважины  $\Phi_2$ , несовершенство скважины  $\Phi_3$ .

*Решение.*

Определяем последовательно

$$\Phi_1 = 2 \ln \frac{R_K}{R_0} = 2 \ln \frac{11200}{478} = 6,3;$$

$$\Phi_2 = 2 \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} = 2 \ln \frac{250}{3,14 \cdot 0,1} = 13,4;$$

$$\Phi_3 = 2\varepsilon_{nc} = 2 \cdot 18 = 36.$$

Очевидно, что наибольший вклад в формирование понижения уровня оказывает несовершенство скважины (65 %).

### **Задача 5.12.**

Самостоятельно решить один из вариантов 2-10 табл. 5.3, приняв за основу условия задачи 5.11.

## **5.7. УЧЕТ СКАЧКООБРАЗНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА СКВАЖИНЫ**

Рассмотрим случай резкого изменения величины водоотбора из одиночной скважины с  $Q_1$  на  $Q_2$  в момент времени  $t_1$  от начала ее эксплуатации (рис. 5.3).

Понижение уровня в неограниченном изолированном напорном пласте определяется по методу суперпозиции по следующей формуле:

$$S_0 = \frac{Q_1}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_0^2} + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi km} \ln \frac{2,25a(t - t_1)}{r_0^2}. \quad (5.47)$$

При последующих скачкообразных изменениях расхода с  $Q_2$  на  $Q_3$  в момент времени  $t_2$  и т.п. в формуле (5.47) добавляются слагаемые, учитывающие эти изменения. После прекращения водоотбора расчет понижения в период восстановления уровня после откачки выполняется по формуле (5.47) при условии  $Q_2 = 0$ . Тогда имеем после сокращений

$$S_0 = \frac{Q_1}{4\pi km} \ln \frac{t}{t - t_0}, \quad (5.48)$$

где  $t_0$  — продолжительность откачки с расходом  $Q_1$ .

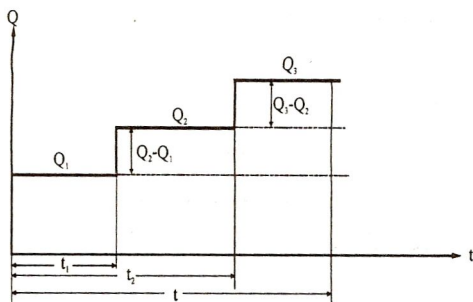


Рис. 5.3. График скачкообразного изменения дебита водозаборной скважины

Изменение дебита в каждой из взаимодействующих скважин учитывается по принципу формулы (5.47).

Если  $n$  взаимодействующих скважин начинают работать не одновременно, например, первая с момента  $t_1$ , вторая — со времени  $t_2$ , то понижение в любой точке пласта  $S_M$ , от действия этих скважин на конец расчетного периода времени  $t > t_i$  при условии (5.23) определяется следующей формулой

$$S_M = \frac{1}{4\pi km} \sum_{i=1}^n Q_i \ln \frac{2,25a(t - t_i)}{r_i^2}, \quad (5.49)$$

где  $t_i$  — момент пуска  $i$ -й скважины в работу;  $(t - t_i)$  — время работы этой скважины;  $Q_i$  — расход этой скважины;  $r_i$  — расстояние этой скважины до точки М.

## ЗАДАЧИ

### Задача 5.13.

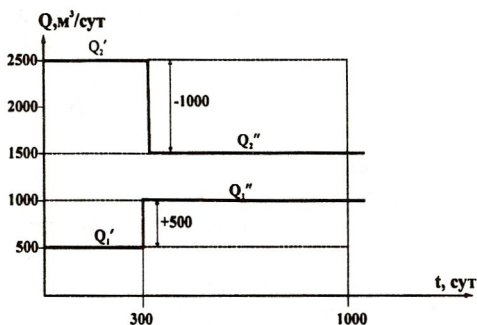
Водозабор из двух скважин работает в напорном неограниченном в плане пласте известняков с  $k = 10$  м/сут, мощностью  $m = 30$  м, упругой водоотдачей  $\mu^* = 10^{-4}$ . Остаточный напор на начало эксплуатации  $H = 20$  м. Расходы скважин изменяются во времени. Первые  $t_1 = 300$  сут скв. 1 эксплуатируется с расходом  $Q'_1 = 500$  м<sup>3</sup>/сут, а скв. 2 —  $Q'_2 = 2500$  м<sup>3</sup>/сут, затем  $Q''_1 = 1000$  и  $Q''_2 = 1500$  м<sup>3</sup>/сут. Скважины расположены на расстоянии  $2\sigma = 1500$  м друг от друга. Скважины совершенные по степени вскрытия пласта,  $r_0 = 0,1$  м. Определить понижение уровня в скв. 2 спустя  $t = 1000$  сут после начала работы этой скважины (рис. 5.4).

*Решение.*

Определяем величину пьезопроводности пласта  $a^* = \frac{km}{\mu^*} = \frac{10 \cdot 30}{10^{-4}} = 3 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут. Находим время наступления квазиста-



Рис. 5.4. График изменения дебита взаимодействующих водозаборных скважин (к задаче 5.13)



ционарного режима фильтрации для системы из двух скважин по формуле (5.236)

$$t_{\text{кв}} = \frac{2,5 \cdot 1500^2}{3 \cdot 10^6} = 2 \text{ сут},$$

т.е. к расчетному времени режим можно считать квазистационарным даже с учетом изменения расхода  $(t-t_1)$  и использовать формулы (5.27) и (5.47). Для скв. 2 имеем

$$S_2 = \frac{500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 1000}{1500^2} + \frac{1000 - 500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \times \\ \times \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^6 (1000 - 300)}{1500^2} + \frac{2500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 1000}{0,1^2} + \\ + \frac{1500 - 2500}{12,56 \cdot 10 \cdot 30} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^6 (1000 - 300)}{0,1^2} = 13,0 \text{ м},$$

т.е. меньше остаточного напора.

### Задача 5.14.

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 5.7, приняв за основу условия задачи 5.13.

Таблица 5.7

Исходные данные вариантов задачи 5.14

| Номер варианта | $Q_1'$ ,<br>м³/сут | $Q_1''$ ,<br>м³/сут | $Q_2'$ ,<br>м³/сут | $Q_2''$ ,<br>м³/сут | $t$ , сут | $t_1$ , сут | $k$ ,<br>м/сут | $2\sigma$ , м |
|----------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------|-------------|----------------|---------------|
| 1              | 500                | 1000                | 2500               | 1500                | 1000      | 300         | 10             | 1500          |
| 2              | 2000               | 3000                | 1500               | 1000                | 500       | 100         | 15             | 1000          |
| 3              | 1500               | 2000                | 3000               | 1000                | 1500      | 500         | 5              | 1300          |
| 4              | 1000               | 1500                | 2000               | 1000                | 2000      | 500         | 10             | 1200          |
| 5              | 1000               | 2000                | 2500               | 1000                | 1500      | 1000        | 6              | 2000          |
| 6              | 2000               | 1000                | 1500               | 3000                | 1000      | 700         | 12             | 800           |
| 7              | 3000               | 1500                | 1000               | 2000                | 1500      | 500         | 8              | 1800          |
| 8              | 2500               | 1000                | 2000               | 3000                | 2000      | 1500        | 15             | 1400          |
| 9              | 1500               | 1000                | 500                | 2500                | 500       | 300         | 20             | 1000          |
| 10             | 3000               | 2000                | 1500               | 3000                | 1500      | 700         | 25             | 900           |

### ЗАДАЧИ

#### Задача 5.15.

Скважина эксплуатирует водоносный горизонт с расходом  $Q = 2000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Водопроницаемость пласта  $T = 100 \text{ м}^2/\text{сут}$ , радиус контура питания  $R_k = 1600 \text{ м}$ . До начала эксплуатации естественный поток подземных вод характеризовался градиентом  $I_e = 10^{-2}$ , отметка уровня воды в скважине до начала водоотбора  $H_e^0 = 100 \text{ м}$ .

Необходимо:

1. Рассчитать понижение уровня  $S$  в пласте. Построить график зависимости  $S - \lg r$ . Определить расстояния, на которых понижения уровня имеют целочисленные значения.

2. Построить ГДС для естественного потока, наложить на нее линии равных понижений уровня при водоотборе из скважины, построить ГДС нарушенного потока.

3. Выявить положение нейтральной линии тока (НЛТ), определить ширину зоны захвата водозаборной скважины.

*Решение.*

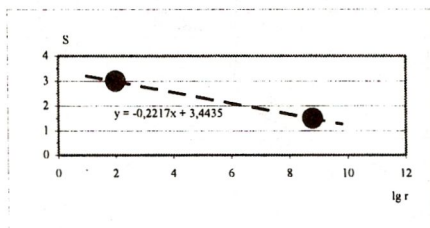
1. Определяем положение уровня в пласте на расстоянии 100 и 1000 м от скважины, используя формулу (5.6):

$$S_{100} = \frac{0,366 \cdot 2000}{100} \lg \frac{1600}{100} = 8,81 \text{ м};$$

$$S_{1000} = \frac{0,366 \cdot 2000}{100} \lg \frac{1600}{1000} = 1,49 \text{ м}.$$

2. Учитывая, что зависимость  $S - \lg r$  прямолинейная, строим график  $S - \lg r$  по двум полученным точкам (рис. 5.5). По графику определяем расстояния, на которых величина  $S$  имеет целочисленные значения. Определения сводим в табл. 5.8.

Определить расстояния с заданными значениями  $S$  можно



**Рис. 5.5.** Вспомогательный график для определения расстояний  $r$ , на которых понижение имеет целочисленные значения

Расстояния, на которых  $S$  имеет целочисленные значения

| $S, \text{ м}$ | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\lg r$        | 3,06 | 2,92 | 2,79 | 2,65 | 2,52 | 2,38 | 2,24 | 2,10 | 1,96 |
| $r, \text{ м}$ | 1150 | 840  | 620  | 450  | 330  | 240  | 175  | 125  | 90   |

также, воспользовавшись формулой (5.6) и переписав ее относительно  $r$

$$r = 10 \left( \lg R_k - \frac{S_r km}{0,366} \right), \quad (5.50)$$

или применительно к решаемой задаче:

$$r = 10^{3,2-0,14S_r}$$

В водозаборной скважине при  $r_0 = 0,1$  м понижение составит 30,7 м (см. рис. 5.5, уравнение прямой  $S - \lg r$ ). При этом отметка динамического уровня  $H_c = 69,2$  м.

3. Для естественного потока подземных вод все линии напора (ЛН) и линии тока (ЛТ) параллельны, и поэтому ячейки ГДС имеют вид правильных прямоугольников. Учитывая величину  $I_e = 10^{-2}$ , определяем при сечении через 1 м расстояния между линиями напора, равными 100 м. Тогда приемлемый масштаб будет 1:10000 или 100 м в 1 см. Проставляем значения уровней возле каждой линии напора, имея в виду, что в скважине  $H_e = 100$  м, а увеличение  $x$  соответствует увеличению  $H$ .

Линии равных понижений уровня  $S$  при водоотборе в пласте с  $I_e = 0$  имеют вид концентрических окружностей с центром в скважине, радиусы которых определены в табл. 5.8.

Для построения ГДС нарушенного потока осуществляем вычитание значения понижения  $S$  из отметки естественного уровня  $H_e$  в местах пересечения соответствующих линий напора. Проставляем полученную разность возле точек пересечения.

Соединяя одинаковые значения расчетных уровней, строим линии напора, отвечающие нарушенному водоотбором потоку подземных вод. Перпендикулярно к полученным линиям напора будут располагаться линии тока (рис. 5.6).

4. На некотором расстоянии от скважины перпендикулярно к потоку находим линию тока, которая проходит, минуя скважину. Ближе к скважине проходит граничная линия тока, замыкающая поток воды, поступающий к скважине. Это и есть нейтральная линия тока (НЛТ). Аналогичная НЛТ располагается симметрич-





Варианты заданий к задаче 5.16

| Номер варианта | $Q$ , м <sup>3</sup> /сут | $T$ , м <sup>2</sup> /сут | $R_k$ , м | $I_e$             | $H_e^0$ , м |
|----------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-------------------|-------------|
| 1              | 2000                      | 100                       | 1600      | $10^{-2}$         | 100         |
| 2              | 3000                      | 200                       | 2000      | $10^{-2}$         | 120         |
| 3              | 2500                      | 150                       | 1800      | $8 \cdot 10^{-3}$ | 150         |
| 4              | 1500                      | 80                        | 1700      | $10^{-2}$         | 200         |
| 5              | 2000                      | 150                       | 2500      | $5 \cdot 10^{-3}$ | 100         |
| 6              | 3200                      | 400                       | 2500      | $4 \cdot 10^{-3}$ | 110         |
| 7              | 2500                      | 300                       | 1800      | $5 \cdot 10^{-3}$ | 120         |
| 8              | 2000                      | 200                       | 2000      | $8 \cdot 10^{-3}$ | 80          |
| 9              | 3000                      | 500                       | 3000      | $4 \cdot 10^{-3}$ | 140         |
| 10             | 2200                      | 250                       | 1800      | $8 \cdot 10^{-3}$ | 130         |

$$y_0 = \frac{Q}{4kmI_e} = 500 \text{ м.}$$

Определяем и корректируем на схеме ширину области захвата

$$B = 2y_\infty = \frac{2Q}{2kml_b} = 2000 \text{ м.}$$

### **Задача 5.16.**

Самостоятельно решить один из вариантов 2–10 табл. 5.9, приняв за основу условия задачи 5.15. Масштаб ГДС выбрать самостоятельно.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ**

#### **6.1. ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Наиболее распространенным видом опытно-фильтрационных работ (ОФР) являются опытные откачки. ОФР подразделяются на одиночные и кустовые откачки. При кустовых откачках имеются наблюдательные скважины, располагающиеся, как правило, по лучу от центральной скважины, из которой ведется откачка, на разных расстояниях от нее (рис. 6.1). Основным техническим требованием к опытной откачке является постоянство расхода, отбираемого из центральной скважины.

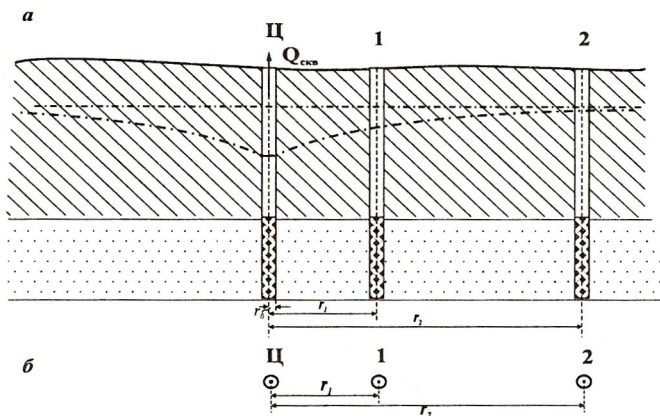


Рис. 6.1. Схема расположения скважин при опытной кустовой откачке:  
 а – разрез; б – план; Ц – скважина центральная, из которой производится откачка; 1, 2 – наблюдательные скважины

По данным ОФР определяют параметры пород ( $k$ ,  $\mu$ ), пласта ( $T$ ,  $a$ ,  $\mu^*$ ,  $B$ ,  $\Delta L$ ,  $W$ ) и скважины ( $r_{пр}$ ,  $\xi_{нс}$ ). Для расчета параметров требуется определить тип расчетной схемы.

Точность и достоверность определения параметров зависит от правильности выполненной схематизации гидрогеологических условий района откачки и оценки соответствия процесса фильтрации при откачке принятой расчетной схеме, а также от случайных ошибок измерения показателей, входящих в формулы.

Исходные уравнения преобразуются для определения параметров. По способу преобразования выделяют методы: подбора, эталонных кривых и прямолинейной анаморфозы [3, 5, 6]. Способы прямолинейной анаморфозы основаны на использовании исходных уравнений квазистационарной и стационарной фильтрации, которые приводятся к виду логарифмической прямой в координатах  $S - \ln t$ ,  $S - \ln r$  или  $S - \ln(t/r^2)$ , отвечающей уравнениям

$$S = C_t \ln t + A_t; \quad S = A_r - C_r \ln r; \quad S = A_k - C_k \ln(t/r^2), \quad (6.1)$$

где  $A$ ,  $C$  – коэффициенты прямой, на основе которых и выполняется определение искомых параметров ( $T$ ,  $a$ ,  $r_{пр}$ ,  $r_{нс}$ ,  $\xi_{нс}$  и др.).

Ниже рассмотрены методы определения параметров применительно к обработке данных откачек из напорных вод. Все приемы обработки сохраняются для откачек из грунтовых вод, только в

исходных уравнениях на основе понятия «напорная функция», производится замена  $S$  на  $(2h_e - S)S$ , а множитель  $\frac{Q}{2\pi k m}$  записывается как  $\frac{Q}{\pi k}$ .

## 6.2. ПРИНЦИПЫ ДИАГНОСТИКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

**Расчетная схема откачки** – упрощенная математическая модель участка пласта, отражающая наиболее характерные его гидродинамические особенности, которые определяют закономерности режима фильтрации, создаваемого откачкой (нестационарного, квазистационарного, стационарного).

Особенность расчетных схем откачек – их изменчивость в процессе опыта, возможность несовпадения с расчетными схемами этого же объекта для прогнозных расчетов водозаборов. Поток может менять свою структуру в зависимости от продолжительности и интенсивности опыта, положения опытных скважин относительно границ исследуемого объекта.

**Индикаторные кривые** – это типовые графики, характеризующие особенности изменения понижения уровня воды в центральной и наблюдательных скважинах во времени, в зависимости от типа расчетной схемы и других факторов. Основными индикаторными кривыми являются графики временного  $(S - \ln t)$ , площадного  $(S - \ln r)$ , комбинированного  $\left(S - \ln \frac{t}{r^2}\right)$  прослеживания и эталонные кривые, построенные в специальной системе координат.

**Интерпретация** – это анализ опытных индикаторных графиков с целью выявления особенностей протекания реального процесса откачки и установления наличия типовых участков (периодов) формирования кривых депрессий, отвечающих действию определенной расчетной схемы. Для этого кроме индикаторных графиков необходимо иметь детальные гидрогеологические разрезы по лучам и району опытного куста, карту гидроизогипс участка, данные бурения скважин и их геофизического опробования.

**Диагностика** – это сопоставительный анализ теоретических и опытных индикаторных кривых, результатом которого является окончательное выделение на опытных индикаторных графиках расчетных участков и отвечающих им расчетных схем для определения гидрогеологических параметров. Идентификация выполняется с высокой степенью морфологического сходства



выделенных участков с теоретическими кривыми, что подтверждается дополнительно оценкой всех временных критериальных соотношений, определяющих период действия данной расчетной схемы.

## ЗАДАЧИ

### Задача 6.1.

На рис. 6.2 приведены индикаторные кривые временного прослеживания для типовых расчетных схем откачек, показанных на рис. 6.3. Угловые коэффициенты этих графиков характеризуют скорость изменения уровня воды в скважинах под влиянием границ, действующих на них граничных условий, типа водообмена, режима фильтрации.

Требуется провести последовательно интерпретацию графиков (см. рис. 6.2, а, б, в). Выявить сходство и различия в характере формирования снижения уровня на этих графиках, используя критерии табл. 3.2, выделить расчетные периоды и отвечающие им расчетные схемы, назвать исходные уравнения фильтрации.

*Решение.*

1. Индикаторный график временного прослеживания (см. рис. 6.2, а) отвечает расчетной схеме неограниченного однородного пласта с напорными водами (см. рис. 6.1). На графике выделяются два участка, которые отвечают разным режимам фильтрации.

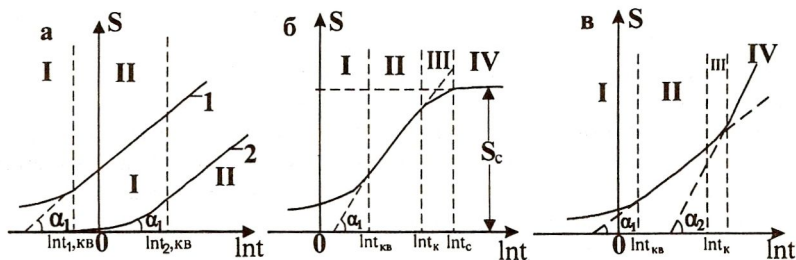


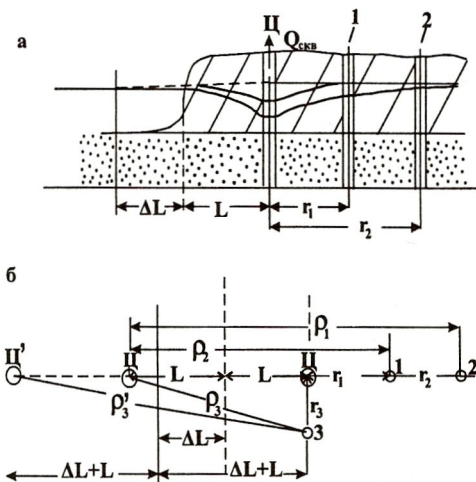
Рис. 6.2. Типовые индикаторные кривые  $S - \ln t$  при откачке из напорного однородного водоносного пласта с горизонтальным водообменом:

а - неограниченный пласт; б, в - полуограниченный пласт с прямолинейной границей и граничными условиями: б - I рода ( $H = \text{const}$ ), в - II рода ( $Q = 0$ ); I, II - периоды соответственно нестационарной ( $E_t$ ) и квазистационарной ( $\ln$ ) фильтрации, когда не сказывается влияние границ пласта и пласт считается неограниченным; III, IV - на фильтрацию влияет прямолинейная граница и фильтрация соответственно нестационарная (участок III) и квазистационарная или стационарная (участок IV),  $\ln t_{кв}$ ,  $\ln t_k$ ,  $\ln t_c$  - логарифмы времени наступления соответственной квазистационарной фильтрации, влияния внешнего контура, стационарной фильтрации; 1, 2 - индикаторные кривые, полученные по двум скважинам



Рис. 6.3. Схема кустовой откачки в полуограниченном пласте с прямолинейным контуром постоянного напора  $H = \text{const}$ :

$a$  – разрез;  $b$  – план;  $\Pi$  – центральная опытная скважина; 1, 2, 3 – наблюдательные скважины;  $r_i, \rho_i$  – расстояния от наблюдательной скважины соответственно до центральной опытной, ее зеркального отображения и то же с учетом  $\Delta L$ ;  $\Delta L$  – показатель гидродинамического несовершенства врезки в водоносный пласт



Согласно критерию 3.1 (см. табл. 3.2) до времени  $t \leq t_1 = 2,5 \frac{r_i^2}{a}$  в

скважине, находящейся на расстоянии  $r_i$  от опытной, режим фильтрации нестационарный, понижение уровня описывается функцией  $E_i$  и отвечает расчетному уравнению (5.21). Эта часть графика криволинейна. Чем дальше расположена наблюдательная скважина от опытной, тем длительнее этот период нестационарного режима (см. рис. 6.2,  $a$ ). Со временем  $t \leq t_1$  в этой зоне, радиусом  $r_i$ , устанавливается квазистационарный режим фильтрации, понижение уровня описывается логарифмической функцией, график имеет форму прямой (уравнение (5.22)).

2. Индикаторные графики (см. рис. 6.2,  $b, в$ ) отвечают расположению опытной и наблюдательных скважин у границ пласта (см. рис. 6.3,  $a, б$ ). Общий ход снижения уровня воды в скважинах будет отличаться от описанного в п. 1. Однако в начале откачки граница влияет на скорость снижения уровней не будет.

Это время определяется как  $t < t_k = 0,1 \frac{R_k^2}{a}$ . В этот период  $t_k \geq t$  и снижение уровней протекает как в неограниченном пласте.

С момента времени  $t > t_k$  скорость снижения зависит от влияния границы. Если на нем задано граничное условие I рода ( $H = \text{const}$ ), то скорость снижения уровня замедляется. С момента  $t = t_k$  на графике появляются III и IV участки. В этот период фильтрация описывается уравнением (5.29), в котором первый член оценивает понижение от действия реальной опытной сква-

жины и согласно критерию  $\frac{r_i^2}{4at} \leq 0,1$  выражен логарифмической функцией, а второй – понижение от действия отображенной скважины. В этот период критерий  $\frac{\rho_i^2}{4at} \leq 0,1$  не выполняется и фильтрация описывается функцией  $E_i$ .

С момента  $t = t_2$ , когда эти критерии выполняются, т.е.  $t \geq t_2 = 2,5 \frac{\rho_i^2}{a}$ , фильтрация переходит в стационарную и IV участок графика располагается параллельно оси  $\ln t$ . Расчетным в этом случае является уравнение

$$S_i = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2(L + \Delta L)}{r_i}. \quad (6.2)$$

Если на контуре задано граничное условие II рода ( $Q = 0$ ), то скорость снижения уровня возрастет, что видно на графике (см. рис. 6.2, *в*). Расчетное уравнение, описывающее фильтрацию на IV участке, имеет вид

$$S_i = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_i \dots \rho_i}. \quad (6.3)$$

3. В зависимости от схемы расположения наблюдательных скважин относительно контура и центральной скважины число участков с разным характером изменения уровня (т.е. число расчетных схем) на графике  $S - \ln t$  будет различным. При не очень близком положении скважин в опытном кусте и относительно контура, при длительной откачке и продолжительном восстановлении четко проявляются все четыре участка снижения и пятый – восстановление, на котором тоже могут быть свои зоны. Близкое расположение к контуру ведет к сокращению периода действия схемы неограниченного пласта. Возрастание числа внешних границ пласта, влияющих на откачку, ведет к усложнению индикаторного графика.

4. Из изложенного вытекает, что для обоснованного выбора расчетной схемы и конкретного расчетного участка на индикаторных графиках следует принимать во внимание не только характерную геометрическую форму индикаторного графика, но и гидрогеологические условия, характерные для изучаемого участка, а также анализировать другие геологические материалы.

### **Задача 6.2.**

Опытной откачкой опробуется водоносный горизонт в аллювиальных отложениях речной долины, врезанной в непроницаемые коренные породы. В первом случае скважина располагается вблизи берега реки, во втором – смещена к непроницаемой гра-

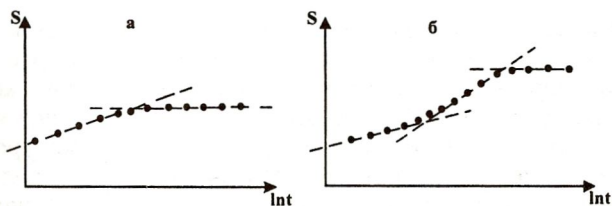


Рис. 6.4. Графики временного прослеживания при откачке из одиночной скважины, расположенной в долине реки:

*a* – скважина смещена в сторону берега реки; *б* – скважина смещена в сторону коренного берега долины

нице. Поток в плане отвечает расчетной схеме пласт-полоса с разнородными границами  $H = \text{const}$  и  $Q = 0$ . Исследовать особенности протекания процесса откачки и восстановления уровня по графикам временного прослеживания, представленным на рис. 6.4. Обосновать выделение расчетных участков, назвать отвечающие им расчетные схемы и исходные уравнения. Нарисовать типовые индикаторные графики для случаев:

- скважина смещена к одной из границ пласта-полосы с однородными границами:  $H = \text{const}$ ;  $Q = 0$ ;
- скважина находится в центре пласта-полосы с однородными и разнородными границами.

Указать, как влияет ширина пласта-полосы на форму индикаторного графика.

### Задача 6.3.

Из напорного водоносного горизонта проведена кустовая откачка вблизи реки при двух схемах положения центральной скважины на расстояниях  $L_1 = 100$  м и  $L_2 = 10$  м. Схема наблюдательных скважин показана на рис. 6.3. Определить, как будет изменяться длительность расчетных периодов в двух случаях:  $a_1 = 10^4$  м<sup>2</sup>/сут,  $a_2 = 10^5$  м<sup>2</sup>/сут, а также в случае, если пласт с безнапорными водами при  $a_3 = 10^3$  м<sup>2</sup>/сут и  $a_4 = 10^2$  м<sup>2</sup>/сут. Исследование последовательно провести для трех наблюдательных скважин (см. рис. 6.3), приняв:  $r_1 = 10$  м,  $r_2 = 150$  м,  $r_3 = 10$  м. Начертить для всех случаев типовой индикаторный график временного прослеживания.

## 6.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТКАЧЕК ДЛЯ СХЕМ НЕОГРАНИЧЕННОГО ПЛАСТА

Рассматриваются два режима фильтрации: нестационарный, определяемый формулой (5.21), и квазистационарный, определяемый формулой (5.22).



Нестационарный режим фильтрации характерен для наблюдательных скважин, расположенных на значительном расстоянии от центральной и при кратковременной откачке, т.е., когда не выполняется условие (5.23). В этом случае используется метод подбора. Пусть известны  $S_1(t_1)$  и  $S_2(t_2)$  – понижения уровня на два разных момента времени, которые необходимо определять в скважинах. Используя формулу (5.21), можем записать отношение

$$\frac{S_2(t_2)}{S_1(t_1)} = \frac{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right)}{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right)} = f(a), \quad (6.4)$$

которое содержит неизвестный нам параметр  $a$ .

В формуле (6.4) будем задавать разные (не менее трех) значения  $a_i$  параметра  $a$ , в диапазоне разумных его величин для рассматриваемого водоносного пласта. В результате получим соответствующее количество значений  $f(a_i)$ . Посмотрим график зависимости  $g(a_i)$  от  $\ln a_i$  (рис. 6.5).

Определим фактическое отношение известных нам понижений уровня на два фиксированных момента времени  $\beta^* = S_2(t_2)/S_1(t_1)$  и найдем точку на построенном графике, отвечающем условию  $\beta^* = f(a)$ . Ординатой этой точки является искомая величина  $\ln a_i$ , из которой определим  $a$ . Далее по формуле (5.21) находим

$$km = \frac{Q}{4\pi \cdot S_2} \left[ -E_i\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right) \right]. \quad (6.5)$$

График временного прослеживания уровня строится по данным наблюдений в одной скважине, наблюдательной или центральной ( $r_i = \text{const}$ ). При этом формула (5.22) преобразуется следующим образом:

$$S_i = \frac{Q}{4\pi \cdot km} \ln \frac{2,25a}{r_i^2} + \frac{Q}{4\pi \cdot km} \ln t \quad (6.6)$$

и может быть представлена в виде

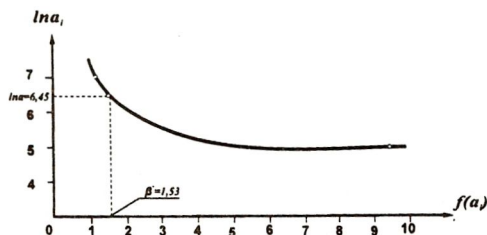


Рис. 6.5. Вспомогательный график для расчета параметров методом подбора



$$S = A_t + C_t \ln t, \quad (6.7)$$

т.е. в виде уравнения прямой линии. Поэтому по всей совокупности опытных точек в координатах  $S - \ln t$  проводится усредняющая прямая линия, отвечающая уравнению (6.7). Эта прямая отсекает на оси  $S$  ординату  $A_t$ , тангенс угла ее наклона

$$C_t = \frac{S_2 - S_1}{\ln t_2 - \ln t_1}, \quad (6.8)$$

где  $S_2, S_1$  и  $t_2, t_1$  – координаты произвольных точек прямолинейного графика. С учетом (6.6) и (6.7) можно определить параметры пласта

$$km = \frac{Q}{4\pi \cdot C_t}; \quad \ln a = \frac{A_t}{C_t} - 0,81 + 2 \ln r_i. \quad (6.9)$$

Для однородного пласта графики для разных скважин должны быть параллельны.

По опытным токам, полученным при откачке из центральной скважины, определяют показатель ее несовершенства

$$\alpha = \frac{r_{np}}{r_0}, \quad (6.10)$$

причем  $r_{np}$  определяется из формулы

$$\ln r_{np} = \frac{1}{2} \left( \ln a + 0,81 - \frac{A_t^0}{C_t^0} \right), \quad (6.11)$$

где  $\ln a$  – среднее значение, определенное по формуле (6.9) для наблюдательных скважин;  $A_t^0$  и  $C_t^0$  – ордината и угловой коэффициент, определенные по графику центральной скважины.

При построении графика  $S - \ln t$  время  $t$  можно брать в любой размерности. На размерности коэффициента водопроводимости это не отражается, а размерность коэффициента  $a(a^*)$  будет получена в тех временных градациях (минуты, часы и др.), которые были приняты при построении графика временного прослеживания. Наименьшая ошибка при графических расчетах достигается, если выбор масштабов осей  $S$  и  $\ln t$  обеспечивает угол наклона графика в интервале 30–60°. При обработке опытных данных в редакторе Excel угол наклона не имеет принципиального значения: в этом случае автоматически выдается уравнение прямой по линии тренда опытных данных (и, следовательно, коэффициенты  $A$  и  $C$ ).

Графики площадного прослеживания уровня строятся по данным наблюдательных (двух и более) скважин, расположенных на одном луче для фиксированных моментов времени ( $t_j = \text{const}$ ) от начала откачки.

При этом формула (5.22) преобразуется следующим образом:

$$S_i = \frac{Q}{2\pi \cdot km} \ln 1,5\sqrt{at_j} - \frac{Q}{2\pi \cdot km} \ln r_i \quad (6.12)$$

и может быть представлена в виде

$$S = A_r - C_r \ln r, \quad (6.13)$$

т.е. в виде уравнения прямой линии. Поэтому по всей совокупности опытных точек в координатах  $S - \ln r$  проводится усредняющая прямая линия, отвечающая уравнению (6.13). Эта прямая отсекает на оси  $\ln r$  отрезок

$$\ln R(t_j) = \ln 1,5\sqrt{at_j}, \quad (6.14)$$

а на оси  $S$  ординату  $A_r$ . Тангенс угла наклона прямой

$$C_r = \frac{A_r}{\ln R(t_j)}. \quad (6.15)$$

С учетом (6.13), (6.14) и (6.15) можно определить параметры пласта

$$km = \frac{Q}{2\pi \cdot C_r}; \quad a = \frac{R^2(t_j)}{2,25t_j}. \quad (6.16)$$

Показатель несовершенства центральной скважины  $\ln r_{np}$  определяется путем сноса на продолжение построенного графика  $S - \ln r$  величины понижения уровня по этой скважине  $S_j^0$  на момент времени  $t_j$ . Абсцисса полученной точки и есть  $\ln r_{np}$ .

Время  $t_j$  для построения графика выбирается из условия параллельности графиков  $S - \ln t$  по разным скважинам. Такое условие для однородного пласта наступает после реализации критерия (5.23) для самой удаленной скважины.

## ЗАДАЧИ

### Задача 6.4.

Из напорного водоносного пласта, сложенного песками, проведена кратковременная кустовая откачка с расходом  $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Измерения понижения уровня выполнялись по наблюдательной скважине, расположенной в  $r = 500 \text{ м}$  от центральной. Через  $t_1 = 2,4 \text{ ч}$  величина понижения уровня оказалась равной  $S_1 = 0,85 \text{ м}$  и через  $t_2 = 4,8 \text{ ч}$   $S_2 = 1,3 \text{ м}$ . Необходимо определить  $km$  и  $a^*$  пласта.

### Решение.

Величина пьезопроводности для песчаного напорного горизонта находится в диапазоне  $10^5$ – $10^7$  м<sup>2</sup>/сут. Определим значения  $f(a_i^*)$  для разных  $a^*$  в этом диапазоне. Вычисления сведем в табл. 6.1. Предварительно  $t_1$  и  $t_2$  из часов переведем в сутки.

Отношение фактических понижений

$$\beta^* = 1,3/0,85 = 1,53,$$

тогда по графику определяем  $\ln a^* = 6,454$  и  $a^* = 3 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут. По

$$\text{формуле (6.5)} \quad km = \frac{1000}{12,56 \times 1,3} \times \left[ -E_i \left( -\frac{500^2}{4 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,2} \right) \right] = 109 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

### Задача 6.5.

Определить  $km$  и  $a(a^*)$  исследуемой области фильтрации по данным кустовой откачки, выполненной с дебитом  $Q = 1000$  м<sup>3</sup>/сут, используя опытные данные и сведения о водоносном горизонте, которые приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Результаты расчетов  $f(a_i)$  к задаче 6.4

| $a_i^*,$<br>м <sup>2</sup> /сут | $\alpha_1 = \frac{r^2}{4a_i^* t_1}$ | $E_i(-\alpha_1)$ | $\alpha_2 = \frac{r^2}{4a_i^* t_2}$ | $E_i(-\alpha_2)$ | $f(a_i)$ | $\ln a^*$ |
|---------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|----------|-----------|
| $10^5$                          | 6,25                                | 0,00027          | 3,125                               | 0,0112           | 41,5     | 5         |
| $3 \cdot 10^5$                  | 2,08                                | 0,0438           | 1,04                                | 0,204            | 5,37     | 5,48      |
| $10^6$                          | 0,625                               | 0,4323           | 0,3125                              | 0,876            | 2,03     | 6         |
| $3 \cdot 10^6$                  | 0,208                               | 1,191            | 0,104                               | 1,785            | 1,50     | 6,48      |
| $10^7$                          | 0,0625                              | 2,257            | 0,03125                             | 2,919            | 1,29     | 7         |

Таблица 6.2

Исходные данные вариантов задачи 6.5

| Номер<br>вариан-<br>та | $Q,$<br>м <sup>3</sup> /сут | $t_1, \text{ ч}$ | $S_1, \text{ м}$ | $t_2, \text{ ч}$ | $S_2, \text{ м}$ | $r, \text{ м}$ | Тип водоносного пласта |
|------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------------|
| 1                      | 1000                        | 2,4              | 0,85             | 4,8              | 1,3              | 500            | Напорный в песках      |
| 2                      | 800                         | 1,2              | 0,72             | 2,4              | 1,05             | 50             | Грунтовый в песках     |
| 3                      | 600                         | 2,4              | 0,91             | 4,8              | 1,54             | 100            | Грунтовый в супесях    |
| 4                      | 1200                        | 1,2              | 0,69             | 3,6              | 1,42             | 60             | Грунтовый в песках     |
| 5                      | 1000                        | 0,96             | 0,46             | 3,6              | 1,01             | 40             | Грунтовый в песках     |
| 6                      | 1300                        | 1,2              | 1,17             | 4,8              | 2,51             | 900            | Напорный в известняках |
| 7                      | 1200                        | 0,96             | 0,41             | 3,6              | 1,14             | 400            | Напорный в песках      |
| 8                      | 1500                        | 0,72             | 0,65             | 2,4              | 1,25             | 300            | Напорный в песках      |
| 9                      | 1400                        | 2,4              | 0,95             | 6,0              | 1,97             | 800            | Напорный в известняках |
| 10                     | 1600                        | 4,8              | 1,62             | 6,0              | 2,04             | 700            | Напорный в песках      |

### Задача 6.6.

Проведена кустовая откачка продолжительностью 2 сут из напорного неограниченного водоносного горизонта в известняках мощностью 65 м. Кровля горизонта находится на глубине 140 м от дневной поверхности, глубина до уровня подземных вод – 40 м. Куст однолучевой, расстояния до наблюдательных скважин составляют 25, 50, 100 и 500 м, радиус водоприемной части центральной скважины  $r_0 = 0,1$  м. Дебит откачки  $Q = 745$  м<sup>3</sup>/сут. Опытные данные представлены в табл. 6.3.

Провести диагностику результатов откачки и определить параметры  $kt$ ,  $k$ ,  $a^*$ , показатель несовершенства центральной скважины  $\alpha$ , коэффициент упругой водоотдачи  $\mu^*$ , радиус влияния откачки  $R_{вт}$ .

Таблица 6.3

**Исходные данные вариантов задачи 6.6**

| Время от начала опыта, мин | Центральная скважина $S_0$ , м | Наблюдательные скважины |           |           |           |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                            |                                | $S_1$ , м               | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
| 1                          | 10,61                          | 0,39                    | 0,10      | –         | –         |
| 2                          | 10,96                          | 0,74                    | 0,28      | 0,03      | –         |
| 5                          | 11,41                          | 1,2                     | 0,60      | 0,15      | –         |
| 10                         | 11,75                          | 1,54                    | 0,85      | 0,35      | –         |
| 20                         | 12,09                          | 1,88                    | 1,20      | 0,60      | –         |
| 30                         | 12,29                          | 2,08                    | 1,40      | 0,78      | –         |
| 60                         | 12,64                          | 2,48                    | 1,74      | 1,08      | 0,04      |
| 120                        | 12,97                          | 2,77                    | 2,08      | 1,40      | 0,14      |
| 240                        | 13,32                          | 3,11                    | 2,48      | 1,74      | 0,35      |
| 360                        | 13,52                          | 3,31                    | 2,62      | 1,94      | 0,48      |
| 480                        | 13,66                          | 3,45                    | 2,76      | 2,08      | 0,60      |
| 720                        | 13,86                          | 3,65                    | 2,97      | 2,28      | 0,74      |
| 960                        | 14,00                          | 3,79                    | 3,11      | 2,42      | 0,89      |
| 1200                       | 14,12                          | 3,90                    | 3,22      | 2,53      | 0,94      |
| 1440                       | 14,21                          | 3,99                    | 3,31      | 2,62      | 1,03      |
| 1680                       | 14,28                          | 4,07                    | 3,38      | 2,70      | 1,11      |
| 1920                       | 14,35                          | 4,14                    | 3,45      | 2,77      | 1,18      |
| 2160                       | 14,41                          | 4,19                    | 3,51      | 2,82      | 1,23      |
| 2280                       | 14,43                          | 4,22                    | 3,53      | 2,85      | 1,26      |
| 2400                       | 14,45                          | 4,25                    | 3,56      | 2,87      | 1,29      |
| 2520                       | 14,48                          | 4,27                    | 3,59      | 2,90      | 1,31      |
| 2760                       | 14,53                          | 4,31                    | 3,62      | 2,94      | 1,36      |
| 3000                       | 14,58                          | 4,36                    | 3,67      | 2,99      | 1,40      |



*Решение.*

1. Составим расчетную схему кустовой откачки (рис. 6.6).

2. Построим графики временного прослеживания откачки в координатах  $S - \ln t$  по опытным данным (см. табл. 6.3). Получим серию кривых, каждая из которых отражает режим фильтрации на расстоянии  $r_{1-4}$  от центральной скважины (рис. 6.7).

3. Проведем диагностику откачки и уточним расчетную схему. Визуальный анализ графиков временного прослеживания понижения уровня на рис. 6.7 показывает, что по центральной, 1 и 2 наблюдательным скважинам полученные графики имеют вид прямых линий. Это свидетельствует о наступлении в радиусе 50 м от центральной скважины квазистационарного режима фильтрации практически с первых минут откачки. Следовательно, расчетные зависимости для определения параметров имеют вид (6.9)–(6.11). В скв. 3 и скв. 4 квазистационарный режим наступает спустя 1 и 16 ч соответственно, о чем свидетельствует прямолинейность индикаторных графиков на отрезках  $\ln t > 4$  (скв. 3) и  $\ln t > 7$  (скв. 4).

4. Параллельность всех прямолинейных участков индикаторных графиков свидетельствует об однородности фильтрационных свойств исследуемой области фильтрации.

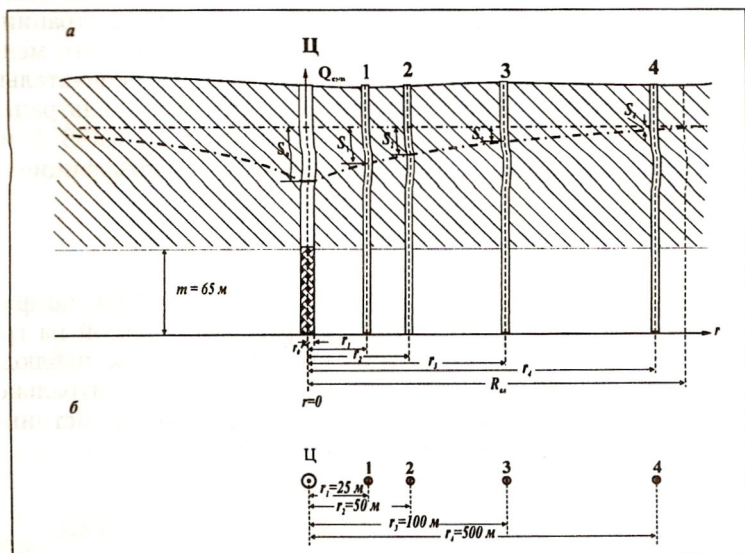


Рис. 6.6. Расчетная схема откачки (к задаче 6.6)

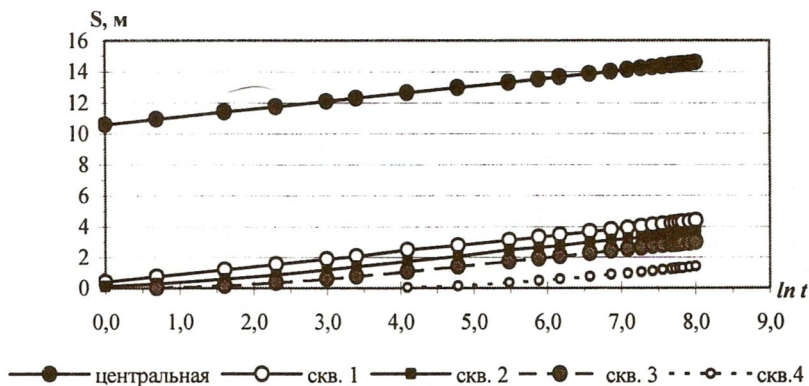


Рис. 6.7. Графики временного прослеживания для кустовой откачки (к задаче 6.6)

5. Определение коэффициентов прямых на прямолинейных участках графиков временного прослеживания выполним, используя возможности редактора Excel (рис. 6.8).

6. Как видно, значение коэффициента  $C$ , входящего в формулу (6.9), варьируется в узком диапазоне 0,489–0,501, что подтверждает сделанный ранее на основе визуального анализа вывод об однородности фильтрационных свойств области фильтрации в радиусе влияния откачки. Отношение  $C_{\max}/C_{\min} = 1,02$ , что менее 2. Поэтому, используя критерии 6.1 (см. табл. 3.2), окончательно принимаем вывод об однородном строении области фильтрации, определяем среднее арифметическое значение  $C_t = 0,493$  и используем его в формуле (6.9) для определения коэффициента водопроницаемости:

$$km = \frac{745}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,493} = 120,3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

7. Величину коэффициента пьезопроводности найдем по формуле (6.9), используя коэффициент  $A$  уравнения прямой на графиках временного прослеживания (см. рис. 6.8) для наблюдательных скважин. Использовать данные откачки по центральной скважине в этом случае нельзя, так как неизвестно истинное значение ее радиуса. В итоге получим:

по скв. 1

$$\ln a^* = \frac{0,404}{0,493} - 0,81 + 2 \ln 25 = 0,82 - 0,81 + 6,44 = 6,45;$$

$$a^* = 651 \text{ м}^2/\text{мин} = 9,4 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

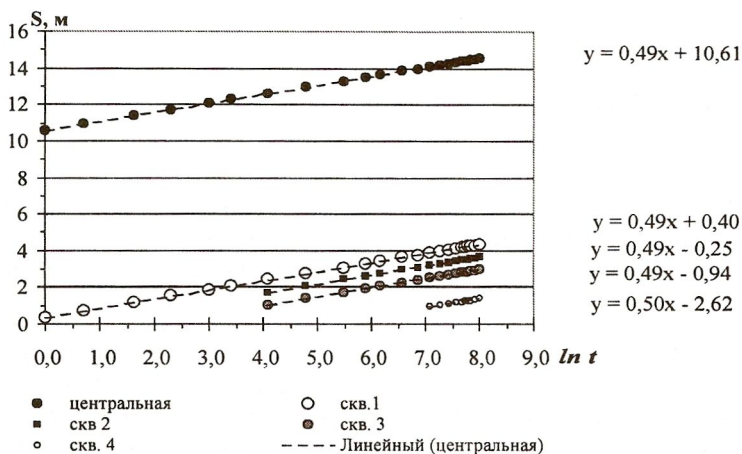


Рис. 6.8. Линии трендов и их уравнения для прямолинейных участков графиков временного прослеживания (к задаче 6.6)

по скв. 2

$$\ln a^* = \frac{-0,255}{0,490} - 0,81 + 2 \ln 50 = 6,50;$$

$$a^* = 684 \text{ м}^2/\text{мин} = 9,8 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут};$$

по скв. 3

$$\ln a^* = \frac{-0,939}{0,489} - 0,81 + 2 \ln 100 = 6,49;$$

$$a^* = 677 \text{ м}^2/\text{мин} = 9,8 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут};$$

по скв. 4

$$\ln a^* = \frac{-2,618}{0,501} - 0,81 + 2 \ln 500 = 6,38;$$

$$a^* = 606 \text{ м}^2/\text{мин} = 8,7 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Среднее значение для всей области фильтрации  $a^* = 9,4 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}.$

8. Коэффициент фильтрации известняков определим по формуле

$$k = \frac{km}{m} = \frac{120,3}{65} = 1,85 \text{ м/сут}.$$

$$k = \frac{km}{m} = \frac{120,3}{65} = 1,85 \text{ м/сут.}$$

9. Коэффициент упругой водоотдачи рассчитаем по формуле

$$\mu^* = \frac{km}{a^*} = \frac{120,3}{9,4 \cdot 10^5} = 1,3 \cdot 10^{-4}.$$

10. Выполним определение параметров методом площадного прослеживания. Для этого построим график  $S - \ln r$  по замерам уровней в наблюдательных скважинах на момент  $t = 1920$  мин (1,3 сут), т.е. в период, когда во всей исследуемой области фильтрации установился квазистационарный режим (рис. 6.9). По графику определим  $C_r = 0,988$  и  $A_r = 7,319$ . Значения параметров также можно вычислить по формулам (6.14) и (6.15). В этом случае с графика снимаем значение  $\ln R_{t=1,3}$  при  $S = 0$ , т.е. в месте пересечения графика площадного прослеживания с осью  $\ln r$ . В нашем случае имеем  $\ln R_{t=1,3} = 7,4$ , радиус влияния откачки на исследуемый момент времени  $R_{t=1,3} = 1690$  м.

Вычислим параметры пласта по формулам (6.16)

$$km = \frac{745}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,988} = 120 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$a^* = \frac{1690^2}{2,25 \cdot 1,3} = 9,8 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Как видно, значения коэффициентов пьезопроводности и водопроводимости, полученные разными методами, практически идентичны.

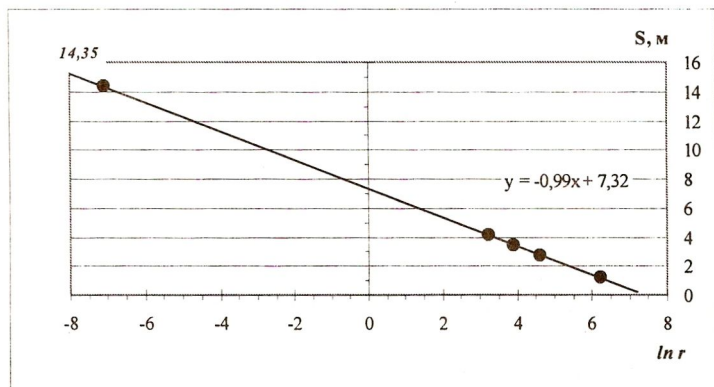


Рис.6.9. График площадного прослеживания по кустовой откачке (к задаче 6.6)



11. Определим приведенный радиус  $\ln r_{\text{пр}}$  и показатель несовершенства центральной скважины графоаналитическим методом, используя график площадного прослеживания (см. рис. 6.9). Для этого продлим прямую  $S - \ln r$  до пересечения с горизонтальной линией, проведенной через значение  $S = 14,35$  м, которое фиксировалось в центральной скважине при  $t = 1920$  мин от начала откачки, определим абсциссу точки пересечения. В нашем случае  $\ln r_{\text{пр}} = -7$ , приведенный радиус скважины равен  $r_{\text{пр}} = 8,8 \cdot 10^{-4}$  м. Показатель несовершенства скважины  $\alpha$  определим по формуле (6.10)

$$\alpha = \frac{8,8 \cdot 10^{-4}}{0,1} = 0,009.$$

12. Сопоставим графоаналитические определения с результатами аналитических расчетов по данным временного прослеживания по центральной скважине (см. рис. 6.8) с использованием формулы (6.11) (размерность коэффициента пьезопроводности  $a$  принимаем в  $\text{м}^2/\text{мин}$ , поскольку при построении графика временного прослеживания время принято в минутах, что сказалось на величине коэффициента прямой  $A$ ):

$$\ln r_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \left( \ln 653 + 0,81 - \frac{10,61}{0,494} \right) = -7,2.$$

Полученные данные свидетельствуют о совпадении результатов вычислений разными методами.

### Задача 6.7.

*как курье Вар. 5*

Выполнить обработку результатов кустовой откачки разными методами, используя исходные данные, приведенные в табл. 6.4 (в вариантах 5, 8–12, 14  $t$  дано в часах).

Таблица 6.4

Исходные данные вариантов задачи 6.7

| Номер варианта | Краткая характеристика области фильтрации и параметров ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
| 1              | Откачка проводилась из напорного водоносного горизонта мощностью 65 м с избыточным напором над кровлей 40 м. Опытный куст состоит из эксплуатационной и четырех наблюдательных скважин, расположенных на одном луче. Дебит откачки $605 \text{ м}^3/\text{сут}$ , радиус центральной скважины 0,1 м. Расстояние от центральной до наблюдательных скважин 25, 50, 100 и 500 м. | 1                  | 10,61     | 0,39      | 0,10      | —         | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2                  | 10,96     | 0,74      | 0,28      | 0,03      | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5                  | 11,41     | 1,20      | 0,60      | 0,15      | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 10                 | 11,75     | 1,54      | 0,85      | 0,35      | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 20                 | 12,09     | 1,88      | 1,20      | 0,60      | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 30                 | 12,29     | 2,08      | 1,40      | 0,78      | —         |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 60                 | 12,64     | 2,48      | 1,74      | 1,08      | 0,04      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 120                | 12,97     | 2,77      | 2,08      | 1,40      | 0,14      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 240                | 13,32     | 3,11      | 2,48      | 1,74      | 0,35      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 360                | 13,52     | 3,31      | 2,62      | 1,94      | 0,48      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 480                | 13,66     | 3,45      | 2,76      | 2,08      | 0,60      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 720                | 13,86     | 3,65      | 2,97      | 2,28      | 0,74      |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 960                | 14,00     | 3,79      | 3,11      | 2,42      | 0,89      |

| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика обла-<br>сти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
| 1                      | Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1200               | 14,12     | 3,90      | 3,22      | 2,53      | 0,94      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1440               | 14,21     | 3,99      | 3,31      | 2,62      | 1,03      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1680               | 14,28     | 4,07      | 3,38      | 2,70      | 1,11      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1920               | 14,35     | 4,14      | 3,45      | 2,77      | 1,18      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2160               | 14,41     | 4,19      | 3,51      | 2,82      | 1,23      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2280               | 14,43     | 4,22      | 3,53      | 2,85      | 1,26      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2400               | 14,45     | 4,25      | 3,56      | 2,87      | 1,29      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2520               | 14,48     | 4,27      | 3,59      | 2,90      | 1,31      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2760               | 14,53     | 4,31      | 3,62      | 2,94      | 1,36      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3000               | 14,58     | 4,36      | 3,67      | 2,99      | 1,40      |
| 2                      | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 65 м с избыточным<br>напором над кровлей 40 м.<br>Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и четырех на-<br>блюдательных скважин, распо-<br>ложенных на одном луче. Де-<br>бит откачки 1025 м <sup>3</sup> /сут, радиус<br>центральной скважины 0,1 м.<br>Расстояние от центральной до<br>наблюдательных скважин 25,<br>50, 100 и 500 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания | 1                  | 11,99     | 0,44      | 0,11      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2                  | 12,38     | 0,84      | 0,32      | 0,03      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5                  | 12,89     | 1,36      | 0,68      | 0,17      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10                 | 13,28     | 1,74      | 0,96      | 0,40      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 20                 | 13,66     | 2,12      | 1,36      | 0,68      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 30                 | 13,89     | 2,35      | 1,58      | 0,88      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 60                 | 14,28     | 2,80      | 1,97      | 1,22      | 0,05      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 120                | 14,66     | 3,13      | 2,35      | 1,58      | 0,16      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 240                | 15,05     | 3,51      | 2,80      | 1,97      | 0,40      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 360                | 15,28     | 3,74      | 2,96      | 2,19      | 0,54      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 480                | 15,44     | 3,90      | 3,12      | 2,35      | 0,68      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 720                | 15,66     | 4,12      | 3,36      | 2,58      | 0,84      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 960                | 15,82     | 4,28      | 3,51      | 2,73      | 1,01      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1200               | 15,96     | 4,41      | 3,64      | 2,86      | 1,06      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1440               | 16,06     | 4,51      | 3,74      | 2,96      | 1,16      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1680               | 16,14     | 4,60      | 3,82      | 3,05      | 1,25      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1920               | 16,22     | 4,68      | 3,90      | 3,13      | 1,33      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2160               | 16,28     | 4,73      | 3,97      | 3,19      | 1,39      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2280               | 16,31     | 4,77      | 3,99      | 3,22      | 1,42      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2400               | 16,33     | 4,80      | 4,02      | 3,24      | 1,46      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2520               | 16,36     | 4,83      | 4,06      | 3,28      | 1,48      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2760               | 16,42     | 4,87      | 4,09      | 3,32      | 1,54      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3000               | 16,48     | 4,93      | 4,15      | 3,38      | 1,58      |
| 3                      | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 65 м с избыточным<br>напором над кровлей 40 м.<br>Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и четырех на-<br>блюдательных скважин, распо-<br>ложенных на одном луче. Де-<br>бит откачки 875 м <sup>3</sup> /сут, радиус<br>центральной скважины 0,1 м.<br>Расстояние от центральной до<br>наблюдательных скважин 25,<br>50, 100 и 500 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания  | 1                  | 9,44      | 0,35      | 0,09      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2                  | 9,75      | 0,66      | 0,25      | 0,03      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5                  | 10,15     | 1,07      | 0,53      | 0,13      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10                 | 10,46     | 1,37      | 0,76      | 0,31      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 20                 | 10,76     | 1,67      | 1,07      | 0,53      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 30                 | 10,94     | 1,85      | 1,25      | 0,69      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 60                 | 11,25     | 2,21      | 1,55      | 0,96      | 0,04      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 120                | 11,54     | 2,47      | 1,85      | 1,25      | 0,12      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 240                | 11,85     | 2,77      | 2,21      | 1,55      | 0,31      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 360                | 12,03     | 2,95      | 2,33      | 1,73      | 0,43      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 480                | 12,16     | 3,07      | 2,46      | 1,85      | 0,53      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 720                | 12,34     | 3,25      | 2,64      | 2,03      | 0,66      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 960                | 12,46     | 3,37      | 2,77      | 2,15      | 0,79      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1200               | 12,57     | 3,47      | 2,87      | 2,25      | 0,84      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1440               | 12,65     | 3,55      | 2,95      | 2,33      | 0,92      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1680               | 12,71     | 3,62      | 3,01      | 2,40      | 0,99      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1920               | 12,77     | 3,68      | 3,07      | 2,47      | 1,05      |

| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика облас-<br>ти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2160               | 12,82     | 3,73      | 3,12      | 2,51      | 1,09      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2280               | 12,84     | 3,76      | 3,14      | 2,54      | 1,12      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2400               | 12,86     | 3,78      | 3,17      | 2,55      | 1,15      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2520               | 12,89     | 3,80      | 3,20      | 2,58      | 1,17      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2760               | 12,93     | 3,84      | 3,22      | 2,62      | 1,21      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3000               | 12,98     | 3,88      | 3,27      | 2,66      | 1,25      |
| 4                      | Откачка проводилась из напорного водоносного горизонта мощностью 65 м с избыточным напором над кровлей 40 м. Опытный куст состоит из эксплуатационной и четырех наблюдательных скважин, расположенных на одном луче. Дебит откачки 745 м <sup>3</sup> /сут, радиус центральной скважины 0,1 м. Расстояние от центральной до наблюдательных скважин 25, 50, 100 и 500 м. Провести диагностику результатов откачки и определить параметры $T$ , $k$ , $a'$ , $\mu'$ , $R_{кл}$ , $r_{пр}$ , используя методы временного и площадного прослеживания | 1                  | 8,17      | 0,30      | 0,08      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2                  | 8,44      | 0,57      | 0,22      | 0,02      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5                  | 8,79      | 0,92      | 0,46      | 0,12      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10                 | 9,05      | 1,19      | 0,65      | 0,27      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 20                 | 9,31      | 1,45      | 0,92      | 0,46      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 30                 | 9,46      | 1,60      | 1,08      | 0,60      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 60                 | 9,73      | 1,91      | 1,34      | 0,83      | 0,03      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 120                | 9,99      | 2,13      | 1,60      | 1,08      | 0,11      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 240                | 10,26     | 2,39      | 1,91      | 1,34      | 0,27      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 360                | 10,41     | 2,55      | 2,02      | 1,49      | 0,37      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 480                | 10,52     | 2,66      | 2,13      | 1,60      | 0,46      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 720                | 10,67     | 2,81      | 2,29      | 1,76      | 0,57      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 960                | 10,78     | 2,92      | 2,39      | 1,86      | 0,69      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1200               | 10,87     | 3,00      | 2,48      | 1,95      | 0,72      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1440               | 10,94     | 3,07      | 2,55      | 2,02      | 0,79      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1680               | 11,00     | 3,13      | 2,60      | 2,08      | 0,85      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1920               | 11,05     | 3,19      | 2,66      | 2,13      | 0,91      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2160               | 11,10     | 3,23      | 2,70      | 2,17      | 0,95      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2280               | 11,11     | 3,25      | 2,72      | 2,19      | 0,97      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2400               | 11,13     | 3,27      | 2,74      | 2,21      | 0,99      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2520               | 11,15     | 3,29      | 2,76      | 2,23      | 1,01      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2760               | 11,19     | 3,32      | 2,79      | 2,26      | 1,05      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3000               | 11,23     | 3,36      | 2,83      | 2,30      | 1,08      |
| 5                      | Откачка проводилась из напорного водоносного горизонта мощностью 40 м с избыточным напором над кровлей 120 м. Опытный куст состоит из эксплуатационной и двух наблюдательных скважин. Дебит откачки 3000 м <sup>3</sup> /сут, радиус центральной скважины 0,15 м. Расстояние от центральной до наблюдательных 30 и 80 м. Провести диагностику результатов откачки и определить параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{кл}$ , $r_{пр}$ , используя методы временного и площадного прослеживания                                                  | 0,083              | 17,15     | 2,26      | 0,36      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,167              | 18,13     | 3,07      | 0,87      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1,0                | 20,68     | 5,68      | 2,82      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2,0                | 21,66     | 6,60      | 3,81      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5,0                | 22,97     | 7,97      | 5,12      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10,0               | 23,96     | 8,89      | 6,10      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 24,0               | 25,20     | 10,13     | 7,35      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 35,0               | 25,80     | 10,71     | 7,92      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 48,0               | 26,18     | 11,12     | 8,33      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 60,0               | 26,50     | 11,43     | 8,65      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 72,0               | 26,76     | 11,70     | 8,91      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 96,0               | 27,17     | 12,10     | 9,32      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 108,0              | 27,34     | 12,27     | 9,49      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 120,0              | 27,50     | 12,42     | 9,63      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 144,0              | 27,74     | 12,68     | 9,89      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 168,0              | 28,00     | 12,90     | 10,11     | —         | —         |
| 6                      | Откачка проводилась из напорного водоносного горизонта мощностью 40 м с избыточным напором над кровлей 120 м.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1                  | 13,26     | 0,49      | 0,13      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2                  | 13,70     | 0,93      | 0,35      | 0,04      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5                  | 14,26     | 1,50      | 0,75      | 0,19      | —         |



| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика облас-<br>ти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
|                        | Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и четырех на-<br>блюдательных скважин, распо-<br>ложенных на взаимно перпен-<br>дикулярных лучах. Дебит от-<br>качки 6000 м <sup>3</sup> /сут. Центральная<br>скважина несовершенная –<br>имеет длину рабочей части<br>фильтра, примыкающего к по-<br>дошве водоносного пласта, 20 м<br>и радиус 0,15 м. Расстояние от<br>центральной до наблюдатель-<br>ных скважин 30, 80, 225 и<br>1300 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вд}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания | 10                 | 14,69     | 1,93      | 1,06      | 0,44      | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 20                 | 15,11     | 2,35      | 1,50      | 0,75      | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 30                 | 15,36     | 2,60      | 1,75      | 0,98      | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60                 | 15,80     | 3,10      | 2,18      | 1,35      | 0,05      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 120                | 16,21     | 3,46      | 2,60      | 1,75      | 0,18      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 240                | 16,65     | 3,89      | 3,10      | 2,18      | 0,44      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 360                | 16,90     | 4,14      | 3,28      | 2,43      | 0,60      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 480                | 17,08     | 4,31      | 3,45      | 2,60      | 0,75      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 720                | 17,33     | 4,56      | 3,71      | 2,85      | 0,93      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 960                | 17,50     | 4,74      | 3,89      | 3,03      | 1,11      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1200               | 17,65     | 4,88      | 4,03      | 3,16      | 1,18      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1440               | 17,76     | 4,99      | 4,14      | 3,28      | 1,29      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1680               | 17,85     | 5,09      | 4,23      | 3,38      | 1,39      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1920               | 17,94     | 5,18      | 4,31      | 3,46      | 1,48      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2160               | 18,01     | 5,24      | 4,39      | 3,53      | 1,54      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2280               | 18,04     | 5,28      | 4,41      | 3,56      | 1,58      |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2400               | 18,06     | 5,31      | 4,45      | 3,59      | 1,61      |
| 7                      | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 40 м с избыточным<br>напором над кровлей<br>120 м. Опытный куст состоит<br>из эксплуатационной и двух<br>наблюдательных скважин. Де-<br>бит откачки 5000 м <sup>3</sup> /сут, радиус<br>центральной скважины 0,15 м.<br>Расстояние от центральной до<br>наблюдательных 30 и 80 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вд}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания                                                                                  | 0,083              | 15,26     | 3,01      | 0,32      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,167              | 16,14     | 2,73      | 0,77      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,0                | 18,41     | 5,06      | 2,51      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2,0                | 19,28     | 5,87      | 3,39      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 5,0                | 20,44     | 7,09      | 4,56      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 10,0               | 21,32     | 7,91      | 5,43      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 24,0               | 11,43     | 9,02      | 6,54      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 35,0               | 22,96     | 9,53      | 7,05      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 48,0               | 23,30     | 9,90      | 7,41      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60,0               | 23,59     | 10,17     | 7,70      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 72,0               | 23,82     | 10,41     | 7,93      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 96,0               | 24,18     | 10,77     | 8,29      | –         | –         |
| 8                      | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 40 м с избыточным<br>напором над кровлей 120 м.<br>Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и двух наблюда-<br>тельных скважин, расположен-<br>ных на взаимно перпендикуляр-<br>ных лучах. Дебит откачки 4000<br>м <sup>3</sup> /сут. Центральная скважина<br>несовершенная – имеет длину ра-<br>бочей части фильтра, примыкаю-<br>щего к подошве водоносного<br>пласта 20 м и радиус 0,15 м. Рас-<br>стояние от центральной до на-<br>блюдательных скважин 30 и 80 м.                                                                                | 0,083              | 19,38     | 2,55      | 0,41      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,167              | 20,49     | 3,47      | 0,98      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,0                | 23,37     | 6,42      | 3,19      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2,0                | 24,48     | 7,46      | 4,31      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 5,0                | 25,96     | 9,01      | 5,79      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 10,0               | 27,07     | 10,05     | 6,89      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 24,0               | 28,48     | 11,45     | 8,31      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 35,0               | 29,15     | 12,10     | 8,95      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 48,0               | 29,58     | 12,57     | 9,41      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60,0               | 29,95     | 12,92     | 9,77      | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 72,0               | 30,24     | 13,22     | 10,07     | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 96,0               | 30,70     | 13,67     | 10,53     | –         | –         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 108,0              | 30,89     | 13,87     | 10,72     | –         | –         |



| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика облас-<br>ти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Результаты откачки                                                        |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $t$ , мин                                                                 | $S_0$ , м                                                                              | $S_1$ , м                                                                         | $S_2$ , м                                                                    | $S_3$ , м                                      | $S_4$ , м                                      |
|                        | Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 120,0<br>144,0<br>168,0                                                   | 31,08<br>31,35<br>31,64                                                                | 14,03<br>14,33<br>14,58                                                           | 10,88<br>11,18<br>11,42                                                      | —<br>—<br>—                                    | —<br>—<br>—                                    |
| 9                      | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 40 м с избыточным<br>напором над кровлей 120 м.<br>Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и двух наблю-<br>дательных скважин, располо-<br>женных на взаимно перпенди-<br>кулярных лучах. Дебит откачки<br>4000 м <sup>3</sup> /сут. Центральная сква-<br>жина несовершенная – имеет<br>длину рабочей части фильтра,<br>примыкающего к подошве во-<br>доносного пласта, 20 м и радиус<br>0,15 м. Расстояние от централь-<br>ной до наблюдательных сква-<br>жин 30 и 80 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания | 0,083<br>0,167<br>0,333<br>0,666                                          | 26,65<br>27,63<br>28,62<br>29,61                                                       | 2,26<br>3,07<br>4,06<br>5,04                                                      | 0,36<br>0,87<br>1,58<br>2,45                                                 | —<br>—<br>—<br>—                               | —<br>—<br>—<br>—                               |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1,5<br>3,5<br>6,0<br>10,0<br>15,0<br>24,0<br>30,0<br>36,0<br>40,0<br>48,0 | 30,75<br>31,96<br>32,73<br>33,45<br>34,03<br>34,70<br>35,02<br>35,28<br>35,42<br>35,68 | 6,19<br>7,39<br>8,16<br>8,89<br>9,46<br>10,13<br>10,45<br>10,71<br>10,86<br>11,12 | 3,40<br>4,61<br>5,38<br>6,10<br>6,68<br>7,35<br>7,66<br>7,92<br>8,07<br>8,33 | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
| 10                     | Откачка проводилась из напор-<br>ного водоносного горизонта<br>мощностью 40 м с избыточным<br>напором над кровлей 120 м.<br>Опытный куст состоит из экс-<br>плуатационной и двух наблю-<br>дательных скважин, располо-<br>женных на взаимно перпенди-<br>кулярных лучах. Дебит откачки<br>6000 м <sup>3</sup> /сут. Центральная сква-<br>жина несовершенная – имеет<br>длину рабочей части фильтра,<br>примыкающего к подошве во-<br>доносного пласта, 20 м и радиус<br>0,15 м. Расстояние от централь-<br>ной до наблюдательных сква-<br>жин 30 и 80 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания | 0,083<br>0,167<br>0,333<br>0,666                                          | 20,52<br>21,28<br>22,04<br>22,80                                                       | 1,74<br>2,36<br>3,13<br>3,88                                                      | 0,28<br>0,67<br>1,22<br>1,89                                                 | —<br>—<br>—<br>—                               | —<br>—<br>—<br>—                               |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1,5<br>3,5<br>6,0<br>10,0<br>15,0<br>24,0<br>30,0<br>36,0<br>40,0<br>48,0 | 23,68<br>24,61<br>25,20<br>25,76<br>26,20<br>26,72<br>26,97<br>27,17<br>27,27<br>27,47 | 4,77<br>5,69<br>6,28<br>6,85<br>7,28<br>7,80<br>8,05<br>8,25<br>8,36<br>8,56      | 2,62<br>3,55<br>4,14<br>4,70<br>5,14<br>5,66<br>5,90<br>6,10<br>6,21<br>6,41 | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
| 11                     | Откачка осуществлялась из<br>напорного водоносного гори-<br>зонта мощностью 40 м, распо-<br>ложенного в прибортовой части                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,083<br>0,167<br>0,25<br>0,333                                           | 7,24<br>7,98<br>8,42<br>8,72                                                           | —<br>—<br>—<br>—                                                                  | —<br>—<br>—<br>—                                                             | —<br>—<br>—<br>—                               | —<br>—<br>—<br>—                               |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |                                                                                        |                                                                                   |                                                                              |                                                |                                                |

| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика обла-<br>сти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
|                        | речной долины, врезанной в непроницаемые породы. Опытный куст состоит из эксплуатационной и трех наблюдательных скважин, расположенных на одном луче, перпендикулярном к границе водоносного горизонта. Дебит откачки 1500 м <sup>3</sup> /сут, радиус центральной скважины 0,1 м. Расстояние от центральной скважины до границы водоносного горизонта 100 м, а до наблюдательных скважин 25, 50 и 75 м. Провести диагностику результатов откачки и определить параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ , используя методы временного и площадного прослеживания                                                                                                              | 0,666              | 9,46      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,0                | 9,90      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,5                | 10,34     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2,0                | 10,62     | 0,05      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3,0                | 11,04     | 0,09      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5,0                | 11,60     | 0,30      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 7,0                | 11,96     | 0,50      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9,0                | 12,22     | 0,71      | 0,03      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 12,0               | 12,52     | 0,99      | 0,09      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 15,0               | 12,76     | 1,22      | 0,16      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 18,0               | 12,96     | 1,42      | 0,24      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 20,0               | 13,06     | 1,55      | 0,30      | 0,03      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 24,0               | 13,26     | 1,80      | 0,41      | 0,06      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 36,0               | 13,70     | 2,37      | 0,71      | 0,18      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 40,0               | 13,80     | 2,46      | 0,79      | 0,22      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48,0               | 14,00     | 2,68      | 0,97      | 0,28      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 60,0               | 14,24     | 3,06      | 1,21      | 0,40      | —         |
| 12                     | Откачка осуществлялась из напорного водоносного горизонта мощностью 40 м, расположенного в прибортовой части речной долины, врезанной в непроницаемые породы. Опытный куст состоит из эксплуатационной и трех наблюдательных скважин, расположенных на одном луче, перпендикулярном к границе водоносного горизонта. Дебит откачки 2000 м <sup>3</sup> /сут, радиус центральной скважины 0,1 м. Расстояние от центральной скважины до границы водоносного горизонта 100 м, а до наблюдательных скважин 25, 50 и 75 м. Провести диагностику результатов откачки и определить параметры $T$ , $k$ , $a$ , $\mu$ , $R_{вл}$ , $r_{пр}$ , используя методы временного и площадного прослеживания | 90,0               | 14,68     | 3,64      | 1,67      | 0,66      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 120,0              | 14,98     | 4,03      | 2,0       | 0,83      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 150,0              | 14,99     | 4,36      | 2,24      | 0,92      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,083              | 9,05      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,167              | 9,98      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,25               | 10,53     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,333              | 10,90     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,666              | 11,83     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,0                | 12,38     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,5                | 12,93     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2,0                | 13,28     | 0,06      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3,0                | 13,80     | 0,11      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5,0                | 14,50     | 0,38      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 7,0                | 14,95     | 0,63      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9,0                | 15,28     | 0,89      | 0,04      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 12,0               | 15,65     | 1,24      | 0,11      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 15,0               | 15,95     | 1,53      | 0,20      | —         | —         |
| 13                     | Откачка осуществлялась из напорного водоносного горизонта мощностью 40 м, расположенного в прибортовой части речной долины, врезанной в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 18,0               | 16,20     | 1,78      | 0,30      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 20,0               | 16,33     | 1,94      | 0,38      | 0,04      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 24,0               | 16,58     | 2,25      | 0,51      | 0,08      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 36,0               | 17,13     | 2,96      | 0,89      | 0,23      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 40,0               | 17,25     | 3,08      | 0,99      | 0,28      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48,0               | 17,50     | 3,35      | 1,21      | 0,35      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 60,0               | 17,80     | 3,83      | 1,51      | 0,50      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 90,0               | 18,35     | 4,55      | 2,09      | 0,83      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 120,0              | 18,73     | 5,04      | 2,50      | 1,04      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 150,0              | 18,74     | 5,45      | 2,80      | 1,05      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,083              | 6,44      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,167              | 7,10      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,25               | 7,49      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,333              | 7,76      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,666              | 8,42      | —         | —         | —         | —         |

| Номер<br>вариан-<br>та | Краткая характеристика облас-<br>ти фильтрации и параметров<br>ОФР                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Результаты откачки |           |           |           |           |           |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $t$ , мин          | $S_0$ , м | $S_1$ , м | $S_2$ , м | $S_3$ , м | $S_4$ , м |
|                        | непроницаемые породы. Опыт-<br>ный куст состоит из эксплуата-<br>ционной и трех наблюдатель-<br>ных скважин, расположенных<br>на одном луче, перпендикуляр-<br>ном к границе водоносного го-<br>ризонта. Дебит откачки 2500<br>$\text{м}^3/\text{сут}$ , радиус центральной<br>скважины 0,1 м. Расстояние от<br>центральной скважины до гра-<br>ницы водоносного горизонта<br>100 м, а до наблюдательных<br>скважин 25, 50 и 75 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T, k, a', \mu, R_{\text{вл}}, r_{\text{пр}}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания                                                                                                                                                           | 1,0                | 8,81      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,5                | 9,20      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2,0                | 9,45      | 0,04      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3,0                | 9,83      | 0,08      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5,0                | 10,32     | 0,27      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 7,0                | 10,64     | 0,45      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9,0                | 10,88     | 0,63      | 0,03      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 12,0               | 11,14     | 0,88      | 0,08      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 15,0               | 11,36     | 1,09      | 0,14      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 18,0               | 11,53     | 1,26      | 0,21      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 20,0               | 11,62     | 1,38      | 0,27      | 0,03      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 24,0               | 11,80     | 1,60      | 0,36      | 0,05      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 36,0               | 12,19     | 2,11      | 0,63      | 0,16      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 40,0               | 12,28     | 2,19      | 0,79      | 0,20      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48,0               | 12,46     | 2,39      | 0,85      | 0,25      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 60,0               | 12,67     | 2,72      | 1,08      | 0,36      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 90,0               | 13,07     | 3,24      | 1,49      | 0,59      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 120,0              | 13,33     | 3,59      | 1,78      | 0,74      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 150,0              | 13,34     | 3,88      | 1,99      | 0,82      | —         |
| 14                     | Откачка осуществлялась из<br>напорного водоносного гори-<br>зонта мощностью 40 м, распо-<br>ложенного в прибортовой части<br>речной долины, врезанной в<br>непроницаемые породы. Опыт-<br>ный куст состоит из эксплуата-<br>ционной и трех наблюдатель-<br>ных скважин, расположенных<br>на одном луче, перпендикуляр-<br>ном к границе водоносного го-<br>ризонта. Дебит откачки 3000<br>$\text{м}^3/\text{сут}$ , радиус центральной<br>скважины 0,1 м. Расстояние от<br>центральной скважины до гра-<br>ницы водоносного горизонта<br>100 м, а до наблюдательных<br>скважин 25, 50 и 75 м.<br>Провести диагностику резуль-<br>татов откачки и определить<br>параметры $T, k, a, \mu, R_{\text{вл}}, r_{\text{пр}}$ ,<br>используя методы временного и<br>площадного прослеживания | 0,083              | 8,18      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,167              | 9,02      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,25               | 9,51      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,333              | 9,85      | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,666              | 10,69     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,0                | 11,19     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,5                | 11,68     | —         | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2,0                | 12,00     | 0,06      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3,0                | 12,48     | 0,10      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5,0                | 13,11     | 0,34      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 7,0                | 13,51     | 0,57      | —         | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9,0                | 13,81     | 0,80      | 0,03      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 12,0               | 14,15     | 1,12      | 0,10      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 15,0               | 14,42     | 1,38      | 0,18      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 18,0               | 14,64     | 1,60      | 0,27      | —         | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 20,0               | 14,76     | 1,75      | 0,34      | 0,03      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 24,0               | 14,98     | 2,03      | 0,46      | 0,07      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 36,0               | 15,48     | 2,68      | 0,80      | 0,20      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 40,0               | 15,59     | 2,78      | 0,89      | 0,25      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48,0               | 15,82     | 3,03      | 1,10      | 0,32      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 60,0               | 16,09     | 3,46      | 1,37      | 0,45      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 90,0               | 16,59     | 4,11      | 1,89      | 0,75      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 120,0              | 16,93     | 4,55      | 2,26      | 0,94      | —         |
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 150,9              | 16,94     | 4,93      | 2,53      | 1,04      | —         |



Значение функции  $[-E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right)]$

| N   | $\left( -\frac{r^2}{4at} \right)$ |                   |                   |                   |                   |                   |                      |
|-----|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|     | $N \cdot 10^{-6}$                 | $N \cdot 10^{-5}$ | $N \cdot 10^{-4}$ | $N \cdot 10^{-3}$ | $N \cdot 10^{-2}$ | $N \cdot 10^{-1}$ | N                    |
| 1   | 13,2383                           | 10,9357           | 8,6332            | 6,3315            | 4,0379            | 1,8229            | 0,2194               |
| 1,2 | 13,0560                           | 10,7534           | 8,4409            | 6,1494            | 3,8576            | 1,6595            | 0,1584               |
| 1,4 | 12,9018                           | 10,5993           | 8,2968            | 5,9955            | 3,7054            | 1,5241            | 0,1162               |
| 1,6 | 12,7683                           | 10,4657           | 8,1634            | 5,8621            | 3,5739            | 1,4092            | 0,0863               |
| 1,8 | 12,6505                           | 10,3479           | 8,0455            | 5,7446            | 3,4581            | 1,3098            | 0,0647               |
| 2   | 12,5451                           | 10,2426           | 7,9402            | 5,6394            | 3,3547            | 1,2227            | 0,0489               |
| 2,2 | 12,4498                           | 10,1473           | 7,8449            | 5,5443            | 3,2614            | 1,1454            | 0,0372               |
| 2,4 | 12,3628                           | 10,0603           | 7,7579            | 5,4575            | 3,1763            | 1,0762            | 0,0284               |
| 2,6 | 12,2828                           | 9,9802            | 7,6779            | 5,3776            | 3,0983            | 1,0139            | 0,0219               |
| 2,8 | 12,2087                           | 9,9061            | 7,6038            | 5,3037            | 3,0261            | 0,9573            | 0,0169               |
| 3   | 12,1397                           | 9,8371            | 7,5348            | 5,2349            | 2,9591            | 0,9057            | 0,0131               |
| 3,2 | 12,0751                           | 9,7726            | 7,4703            | 5,1706            | 2,8965            | 0,8583            | 0,0101               |
| 3,4 | 12,0145                           | 9,7120            | 7,4097            | 5,1102            | 2,8379            | 0,8147            | 0,00789              |
| 3,6 | 11,9574                           | 9,6548            | 7,3526            | 5,0532            | 2,7827            | 0,7745            | 0,00616              |
| 3,8 | 11,9033                           | 9,6007            | 7,2985            | 4,9993            | 2,7306            | 0,7371            | 0,00482              |
| 4   | 11,8520                           | 9,5495            | 7,2472            | 4,9482            | 2,6813            | 0,7024            | 0,00378              |
| 4,2 | 11,8032                           | 9,5007            | 7,1985            | 4,8997            | 2,6344            | 0,6700            | 0,00297              |
| 4,4 | 11,7567                           | 9,4541            | 7,1520            | 4,8355            | 2,5899            | 0,6397            | 0,00234              |
| 4,6 | 11,7122                           | 9,4097            | 7,1075            | 4,8091            | 2,5474            | 0,6114            | 0,00184              |
| 4,8 | 11,6697                           | 9,3671            | 7,0650            | 4,7667            | 2,5068            | 0,5849            | 0,00145              |
| 5   | 11,6289                           | 9,3263            | 7,0242            | 4,7261            | 2,4679            | 0,5598            | 0,00115              |
| 5,2 | 11,5896                           | 9,2871            | 6,9850            | 4,6971            | 2,4306            | 0,5362            | 0,000907             |
| 5,4 | 11,5519                           | 9,2494            | 6,9473            | 4,6495            | 2,3948            | 0,5140            | 0,000720             |
| 5,6 | 11,5155                           | 9,2130            | 6,9109            | 4,6134            | 2,3604            | 0,4930            | 0,000571             |
| 5,8 | 11,4804                           | 9,1779            | 6,8758            | 4,5785            | 2,3273            | 0,4732            | 0,000453             |
| 6   | 11,4465                           | 9,1440            | 6,8420            | 4,5448            | 2,2953            | 0,4544            | 0,000360             |
| 6,2 | 11,4138                           | 9,1112            | 6,8092            | 4,5122            | 2,2645            | 0,4366            | 0,000286             |
| 6,4 | 11,3820                           | 9,0795            | 6,7775            | 4,4806            | 2,2346            | 0,4197            | 0,000228             |
| 6,6 | 11,3512                           | 9,0484            | 6,7467            | 4,4501            | 2,2058            | 0,4036            | 0,000182             |
| 6,8 | 11,3214                           | 9,0189            | 6,7169            | 4,4204            | 2,1779            | 0,3883            | 0,000145             |
| 7   | 11,2924                           | 8,9899            | 6,6879            | 4,3916            | 2,1508            | 0,3738            | 0,000116             |
| 7,2 | 11,2642                           | 8,9617            | 6,6598            | 4,3636            | 2,1246            | 0,3599            | $9,22 \cdot 10^{-5}$ |
| 7,4 | 11,2368                           | 8,9343            | 6,6324            | 4,3364            | 2,0991            | 0,3467            | $7,36 \cdot 10^{-5}$ |
| 7,6 | 11,2102                           | 8,9076            | 6,6057            | 4,3100            | 2,0744            | 0,3341            | $5,89 \cdot 10^{-5}$ |
| 7,8 | 11,1842                           | 8,8817            | 6,5798            | 4,2842            | 2,0503            | 0,3221            | $4,71 \cdot 10^{-5}$ |
| 8   | 11,1589                           | 8,8563            | 6,5545            | 4,2591            | 0,02569           | 0,3106            | $3,77 \cdot 10^{-5}$ |
| 8,2 | 11,1342                           | 8,8317            | 6,5298            | 4,2346            | 0,0042            | 0,2996            | $3,02 \cdot 10^{-5}$ |
| 8,4 | 11,1101                           | 8,8076            | 6,5057            | 4,2107            | 1,9820            | 0,2910            | $2,42 \cdot 10^{-5}$ |
| 8,6 | 11,0865                           | 8,7840            | 6,4822            | 4,1874            | 1,9604            | 0,2790            | $1,94 \cdot 10^{-5}$ |
| 8,8 | 11,0635                           | 8,7610            | 6,4592            | 4,1646            | 1,9393            | 0,2694            | $1,55 \cdot 10^{-5}$ |
| 9   | 11,0411                           | 8,7386            | 6,4368            | 4,1423            | 1,9187            | 0,2602            | $1,25 \cdot 10^{-5}$ |
| 9,2 | 11,0191                           | 8,7166            | 6,4148            | 4,1205            | 1,8987            | 0,2513            | $9,99 \cdot 10^{-6}$ |
| 9,4 | 10,9976                           | 8,6951            | 6,3934            | 4,0992            | 1,8791            | 0,2429            | $8,02 \cdot 10^{-6}$ |
| 9,6 | 10,9765                           | 8,6740            | 6,3723            | 4,0784            | 1,8599            | 0,2347            | $6,44 \cdot 10^{-6}$ |
| 9,8 | 10,9559                           | 8,6534            | 6,3517            | 4,0579            | 1,8412            | 0,2269            | $5,17 \cdot 10^{-6}$ |



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### Значения функций $\Phi(\lambda) = 1 - \operatorname{erfc}(\lambda)$ и $R(\lambda)$

| $\lambda$ | $\Phi(\lambda)$ | $R(\lambda)$ | $\lambda$ | $\Phi(\lambda)$ | $R(\lambda)$ |
|-----------|-----------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|
| 0,00      | 0,00            | 1,00         | 0,30      | 0,329           | 0,483        |
| 0,01      | 0,011           | 0,978        | 0,40      | 0,428           | 0,370        |
| 0,02      | 0,023           | 0,956        | 0,50      | 0,520           | 0,280        |
| 0,04      | 0,045           | 0,913        | 0,60      | 0,604           | 0,209        |
| 0,06      | 0,067           | 0,872        | 0,70      | 0,678           | 0,154        |
| 0,08      | 0,90            | 0,832        | 0,80      | 0,742           | 0,112        |
| 0,10      | 0,113           | 0,794        | 0,90      | 0,797           | 0,0803       |
| 0,14      | 0,157           | 0,721        | 1,0       | 0,843           | 0,0568       |
| 0,18      | 0,201           | 0,654        | 1,1       | 0,880           | 0,0396       |
| 0,22      | 0,244           | 0,592        | 1,2       | 0,910           | 0,0272       |
| 0,26      | 0,287           | 0,535        | 1,3       | 0,934           | 0,0184       |
|           |                 |              | 1,4       | 0,952           | 0,0122       |
|           |                 |              | 1,5       | 0,966           | 0,0080       |
|           |                 |              | 2,0       | 0,99532         | 0,00076      |
|           |                 |              | 2,5       | 0,99959         | 0,000043     |

## Приложение 2

### Значения функции $S_q(\tau)$

| $\tau$      | 0    | 0,02 | 0,03 | 0,05  | 0,75   | 0,1      |
|-------------|------|------|------|-------|--------|----------|
| $S_q(\tau)$ |      | 3    | 2,25 | 1,52  | 1,08   | 0,78     |
| $\tau$      | 0,15 | 0,2  | 0,3  | 0,5   | 0,7    | $\infty$ |
| $S_q(\tau)$ | 0,46 | 0,28 | 0,1  | 0,015 | 0,0045 | 0        |

## Приложение 3

### Значения функции $S_V(\tau)$

| $\tau$      | 0 | 0,01  | 0,03 | 0,1  | 0,2  | 0,5  | 1    | $\infty$ |
|-------------|---|-------|------|------|------|------|------|----------|
| $S_V(\tau)$ | 0 | 0,475 | 0,82 | 1,27 | 1,51 | 1,57 | 1,64 | 1,645    |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. *Аверьянов С.Ф.* Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. – М.: Колос, 1981. – 335 с.
2. *Биндеман Н.Н., Язвин Л.С.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
3. *Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Недра, 1979. – 326 с.
4. *Бочеввер Ф.М.* Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. – М.: Недра, 1969. – 325 с.
5. *Гавич И.К.* Гидрогеодинамика. – М.: Недра, 1988. – 348 с.
6. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. – М.: Недра, 1983. – 357 с.
7. *Основы гидрогеологических расчетов/Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов и др.* – М.: Недра, 1969. – 367 с.
8. *Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. – М.: Изд. МГУ, 1995. – 368 с.
9. *Шестаков В.М., Кравченко И.П., Пашковский И.С.* Практикум по динамике подземных вод. – М.: Изд. МГУ, 1979. – 267 с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Ленченко Николай Николаевич**  
**Фисун Наталья Валентиновна**

## ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### ЧАСТЬ 1

**Учебное пособие для студентов вузов**

Заведующий редакцией *С.А. Скотникова*  
Редактор издательства *С.А. Скотникова*  
Обложка художника *Н.И. Терехова*  
Технический редактор *Л.Н. Фомина*  
Корректор *Е.М. Федорова*  
Компьютерная верстка *И.В. Севалкина*

---

Изд. лиц. № 071678 от 03.06.98. Подписано в печать с репродуцированного оригинал-макета 28.04.08. Формат 60×88 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Петербург». Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,35. Уч.-изд. л. 8,0. Тираж 1000 экз. Заказ 762 /1167

---

ООО «Недра-Бизнесцентр»  
125047, Москва, пл. Тверская застава, 3  
E-mail: [business@nedrainform.ru](mailto:business@nedrainform.ru), [biblioteka@nedrainform.ru](mailto:biblioteka@nedrainform.ru)  
[www.nedrainform.ru](http://www.nedrainform.ru)

ППП «Типография «Наука» Академиздатцентр РАН  
121099, Москва, Шубинский пер., 6