

Ф.М. Бочеве

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
КРУПНЫХ ВОДОЗАБОРОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВОДОПАНИЗИТЕЛЬНЫХ
УСТАНОВОК

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

Ф. М. БОЧЕВЕР

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ КРУПНЫХ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ, АРХИТЕКТУРЕ
И СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Москва — 1963

Научный редактор
канд. техн. наук В. М. ШЕСТАКОВ

Стр.	Строка
32	11 сверху
47	8 сверху
53	4 снизу
53	2 снизу

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

. гидрогеологических расчетов водозаборов и	5
---	---

. а определения расхода	7
---------------------------------	---

. систем взаимодействия	9
---------------------------------	---

. ом пласте	11
-------------------------------	----

. ом пласте	16
-------------------------------	----

. ном пласте	19
--------------------------------	----

. ества отдельных сква-	22
---------------------------------	----

. х размеров	23
--------------------------------	----

. ине	30
-------------------------	----

. данным откачек	32
------------------------------------	----

. для расчета	35
---------------------------------	----

.	41
-----------	----

.	45
-----------	----

.	55
-----------	----

.	56
-----------	----

.	57
-----------	----

ОПЕЧАТКИ

Напечатано	Следует читать
$a_2 = \frac{a(t-t_1)}{t_1^2};$	$a_2 = \frac{a(t-t_1)}{l_1^2};$
$2l_1 = 2l_2 = 1\,000\text{ м.}$	$2l_1 = 2l_2 = 1\,000\text{ м.}$
$t_{p.c.p} =$	$\ln t_{p.c.p} =$
$t_{o.c.p} =$	$\ln t_{o.c.p} =$

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей брошюре излагаются методы приближенных гидрогеологических расчетов водозаборов и водопонижительных установок, состоящих из взаимодействующих скважин.

При большом числе взаимодействующих скважин последние представляются в виде обобщенных систем — линейной, кольцевой и площадной. Кроме того, рассматриваются дискретные системы отдельных скважин, расположенных на более или менее значительном расстоянии друг от друга.

Для каждой такой системы приводятся расчетные зависимости и графики для определения расхода и понижения уровня.

Основное внимание уделяется обобщенным системам скважин, методы расчета которых сравнительно просты.

Переход к обобщенным системам взаимодействующих скважин широко практикуется при проектировании разработки нефтяных месторождений (работы В. Н. Щелкачева, Н. С. Пискунова, В. П. Пилатовского, Ю. П. Борисова, И. А. Чарного) и при расчетах водопонижения в гидротехническом строительстве (работы В. М. Шестакова, С. Н. Нумерова, Л. Н. Павловской).

В последнее время аналогичные методы внедряются также в гидрогеологическую практику при проектировании осушения месторождений полезных ископаемых и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для целей питьевого и промышленного водоснабжения (работы П. В. Цюрупа, Л. С. Язвина и других).

Методы расчета водозаборов и водопонижительных установок, основанные на замене множества скважин обобщенными системами, могут получить еще более широкое применение при разрешении самых различных гидрогеологических задач в области водоснабжения, горного дела, гидротехники и других инженерных отраслей.

В частности, они представляются весьма рациональными, например, для решения задач, связанных с разработкой проек-

Напротив, при $S_p < S_{\text{доп}}$ дебит водозабора может быть увеличен или, при сохранении проектного дебита, сокращено количество скважин и уменьшено расстояние между ними.

Теоретически, как известно, понижения уровня в скважинах могут достигать полной мощности пласта (в напорных пластах полной величины пьезометрического напора, отсчитываемого от подошвы). При таких понижениях уровня дебит скважин является максимальным.

На практике, однако, допустимое понижение уровня $S_{\text{доп}}$ всегда меньше указанного теоретического предела; оно устанавливается в зависимости от технических условий откачки (в скважинах должен быть оставлен столб воды, достаточный для заглубления насоса или его водоприемной части). Следует также учитывать потери напора, связанные с сопротивлением фильтра.

При проектировании скважин для водоснабжения оставляют некоторый «запас» мощности в связи с невозможностью полного отражения в расчетах гидрогеологических условий и, в частности, крайне изменчивой водопроницаемости пласта. Поэтому максимально допустимое понижение уровня обычно принимается не более 50—70% от общей мощности пласта. Таким образом, величина $S_{\text{доп}}$ при расчетах скважин для водоснабжения приближенно может определяться по следующим соотношениям:

для напорных вод

$$S_{\text{доп}} \approx H_e - [(0,3 \div 0,5) m + \Delta H_{\text{нас}} + \Delta H_{\text{ф}}]; \quad (1.2)$$

для безнапорных вод со свободной поверхностью

$$S_{\text{доп}} \approx (0,5 \div 0,7) h_e - \Delta h_{\text{нас}} - \Delta h_{\text{ф}}. \quad (1.3)$$

Здесь H_e и h_e — первоначальный напор и глубина воды до водоупора в пункте расположения скважин (так называемые статические уровни до начала откачек);

$\Delta H_{\text{нас}}$ и $\Delta h_{\text{нас}}$ — максимальная глубина погружения низа насоса (или его водоприемной части) под динамический уровень в скважине;

$\Delta H_{\text{ф}}$ и $\Delta h_{\text{ф}}$ — потери напора на входе в скважину (сопротивление фильтра);

m — мощность напорного пласта.

Гидрогеологические расчеты водопонижительных установок производятся для двух стадий водопонижения: строительной (на период вскрытия и подготовки месторождения к эксплуатации, проходки строительного котлована и т. д.) и эксплуатационной (на период эксплуатации месторождения или сооружения, защищаемого от притока подземных вод) [4, 17].

Производительность водопонижительных установок и размеры общих водопритоков при строительном водопонижении Q_c находятся в зависимости от принимаемого срока строительства t и необходимого понижения уровня S .

Вместе с тем при известном расходе (т. е. при заранее заданной производительности водопонижительных устройств) представляется возможность определить время, в течение которого может быть достигнуто осушение месторождения или строительного котлована.

Эксплуатационное водопонижение характеризуется тем, что при достигнутом и поддерживаемом уровне в водопонижительных установках размеры общих водопритоков Q_s с течением времени сокращаются. Однако при длительной эксплуатации, вследствие усиливающегося поступления воды из соседних водоносных горизонтов и фильтрации из поверхностных водотоков и водоемов, движение подземных вод постепенно стабилизируется.

Водопритоки при эксплуатационном водопонижении по сравнению с водопритоками во время строительства являются минимальными (если, конечно, при этом не расширяется ограждаемая площадь месторождения или котлована и не вводятся в действие новые водопонижительные скважины).

Располагая величинами Q_c и Q_s , можно определить дополнительный расход водопонижительных установок на строительный период

$$\Delta Q = Q_c - Q_s. \quad (1.4)$$

Гидрогеологические расчеты водозаборов и водопонижительных установок всегда являются в той или иной степени приближенными, так как природные условия в силу своей сложности не могут быть учтены в полной мере: для целей расчета они в значительной степени схематизируются.

Этим самым определяется возможность схематизации и самих водозаборных и водопонижительных сооружений.

Излагаемые далее методы расчета предназначены для типовых схем, в виде которых часто могут быть представлены реальные природные условия, а также водозаборные и водопонижительные сооружения.

2. ОБЩИЙ ВИД РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА И ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ

Задача о неустановившемся течении подземных вод к скважинам обычно сводится к плоской задаче, в которой значения расхода и напора находятся в зависимости от координат плоскости течения x, y и времени t .

Суммарный приток подземных вод или, что то же, производительность проектируемых водозаборов и водопонизительных установок определяется по следующей зависимости [4, 7]:

$$Q_{\text{сум}} = \frac{4\pi kU}{R_{\text{п}}}, \quad (2.1)$$

где k — коэффициент фильтрации пласта;

U — напорная функция;

$R_{\text{п}}$ — показатель гидравлического сопротивления¹.

Для напорных вод

$$U = mS = m(H_e - H); \quad S = \frac{U}{m}. \quad (2.2)$$

Для безнапорных вод со свободной поверхностью²

$$U = \left(h_e - \frac{S}{2}\right)S = \frac{1}{2}(h_e^2 - h^2); \quad S = h_e - \sqrt{h_e^2 - 2U}, \quad (2.3)$$

где S — величина понижения уровня подземных вод к концу периода времени t в точке с координатами x, y ;

H_e и h_e — первоначальный напор и глубина воды до водоупора в этой точке;

H и h — напор и глубина воды до водоупора в этой же точке в момент времени t .

Разрешая уравнение (2.1) относительно U , получим

$$U = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi k} R_{\text{п}}. \quad (2.4)$$

Здесь U выражается также по (2.2) и (2.3), но величина понижения уровня S (и соответственно H и h) является уже искомой.

При этом следует иметь в виду, что в обоих случаях $Q_{\text{сум}}$ — это расход, который нужно поддерживать постоянным в течение всего периода t , чтобы к концу его в рассматриваемой точке понижение уровня достигло величины S^* .

Гидравлическое сопротивление (2.1) и (2.4) может быть представлено в виде двух слагаемых [3]

$$R_{\text{п}} = R + R_{\text{скв}}, \quad (2.5)$$

где R — это внешнее сопротивление, зависящее от формы и размеров системы взаимодействующих скважин, условий на

¹ Величина R в дальнейшем с некоторой условностью называется нами гидравлическим сопротивлением. В работах [26, 27] и др. функция $\frac{1}{4\pi} R_{\text{п}}$ названа функцией понижения.

² Это выражение U для неустановившейся фильтрации впервые дано Н. Н. Веригиным.

* Формулы (2.1) — (2.4) действительны для однородных пластов или приводимых к таковым путем осреднения коэффициента фильтрации.

границах водоносного пласта, коэффициента пьезопроводности и продолжительности откачки;

$R_{\text{скв}}$ — внутреннее сопротивление, которое добавляется к внешнему при определении понижения уровня непосредственно в скважинах. Это сопротивление зависит от расстановки скважин внутри системы.

В последующих разделах 3—8 излагается методика определения внешнего сопротивления R , причем для него вводятся индексы «л», «к» и «пл» соответственно для линейной, кольцевой и площадной системы скважин.

В разделе 9 даны указания по вычислению внутреннего сопротивления $R_{\text{скв}}$ и понижения уровня непосредственно в скважине.

3. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОБОБЩЕННЫХ СИСТЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН

Сущность методики расчета обобщенных систем скважин заключается в том, что реальные группы скважин представляются в виде бесконечного числа линейных источников с постоянным расходом, равномерно распределенных по контуру или площади, приблизительно соответствующими действительному расположению скважин [16, 20, 21, 24, 25, 26].

Суммарный расход этих источников принимается равным суммарному расходу реальных скважин

$$Q_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n Q_i = q\omega, \quad (3.1)$$

где Q_i — расход i -й скважины ($i=1, 2, \dots, n$; n — общее число скважин);

q — расход на единицу длины контура или площади ω , в пределах которых располагаются скважины.

Таким путем большое количество скважин как бы заменяется одним укрупненным сооружением, например горизонтальной дренажной, или галереей, если источники распределяются по линии, и большим колодцем при распределении источников по окружности и площади круга. Основной особенностью их является постоянство расхода (притока) на единицу длины или площади. Именно поэтому они могут быть названы линиями равного притока или площадками равного притока [26].

Напорная функция U , характеризующая действие одного линейного источника с расходом q в течение времени t в пласте весьма больших размеров в плане (теоретически — безграничном), выражается следующим образом [13, 30]:

$$U = \frac{q}{4\pi k} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{r^2}{4a(t-\tau)} \right]}{t-\tau} d\tau. \quad (3.2)$$

Если в качестве модели одиночной скважины принять источник с расходом Q , то из (3.2) получаем хорошо известную формулу [9, 13, 30]

$$U = -\frac{Q}{4\pi k} Ei \left(-\frac{r^2}{4at} \right), \quad (3.3)$$

где r — координата точки ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$);

k — коэффициент фильтрации;

a — коэффициент пьезопроводности¹;

Ei — символ интегральной показательной функции.

Значения этой функции в зависимости от аргумента $\frac{r^2}{4at}$ приведены в виде графика в конце брошюры (см. приложение 1).

При $\frac{r^2}{4at} < 0,1$

$$Ei \left(-\frac{r^2}{4at} \right) \approx -\ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad (3.3')$$

Расчет дискретных групп взаимодействующих скважин без объединения и замены их единым укрупненным сооружением производится непосредственно путем сложения напорных функций, выражающих действие каждой скважины в отдельности по зависимостям (3.3) и (3.3').

Решение же задачи о притоке к укрупненным сооружениям или обобщенным системам скважин осуществляется также на основе этих зависимостей, но при этом ограниченное количество источников-скважин заменяется бесконечно большим числом эквивалентных по суммарному расходу источников-скважин.

Математически это выполняется следующим образом.

Выделяется бесконечно малый элемент линии или площади $d\omega$. Расходом на этом элементе $qd\omega$ обуславливается соответствующее бесконечно малое изменение функции dU в точке, отстоящей на расстоянии r^* . По (3.2)

$$dU = \frac{qd\omega}{4\pi k} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{r^{*2}}{4a(t-\tau)} \right]}{t-\tau} d\tau. \quad (3.4)$$

¹ См. далее раздел 12.

Путем интегрирования уравнения (3.4) применительно к принятой схеме водозабора или водопонижительной установки можно получить зависимости для определения напорной функции U и гидравлического сопротивления R .

4. ЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА СКВАЖИН В БЕЗГРАНИЧНОМ ПЛАСТЕ

Рассмотрим линейный ряд длиной $2l$, состоящий из n скважин с расходом каждой скважины Q и суммарным расходом $Q_{\text{сум}}$ (рис. 1).

Переходя к обобщенной линейной системе, будем иметь

$$Q_{\text{сум}} = 2lq \text{ или } q = \frac{Q_{\text{сум}}}{2l}, \quad (4.1)$$

где q — единичный расход (на единицу длины ряда).

Расход на бесконечно малом элементе $d\zeta$ в данном случае

$$qd\zeta = \frac{Q_{\text{сум}}}{2l} d\zeta. \quad (4.2)$$

Расстояние точки M от элемента

$$r^* = \sqrt{(x - \zeta)^2 + y^2}. \quad (4.2')$$

Подставляя эти выражения в уравнение (3.4) и интегрируя его в пределах от 0 до U и от $-l$ до $+l$, получим

$$U = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi k} R_{\text{л}}, \quad (4.3)$$

где

$$R_{\text{л}} = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} \int_0^{\alpha} \frac{\exp \left[-\frac{(\bar{x} - \bar{\zeta})^2 + \bar{y}^2}{4\bar{\gamma}} \right]}{\bar{\gamma}} d\bar{\zeta} d\bar{\gamma}, \quad (4.4)$$

$$\alpha = \frac{at}{l^2}; \quad \bar{x} = \frac{x}{l}; \quad \bar{\zeta} = \frac{\zeta}{l} \text{ и } \bar{y} = \frac{y}{l}.$$

При $x=0$, т. е. для точек, расположенных на линии, перпендикулярной к линии расположения скважин и проходящей через ее середину, будем иметь

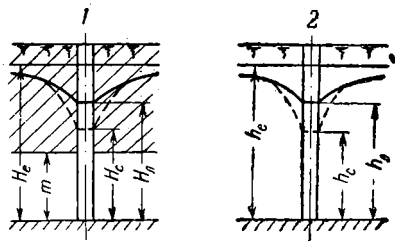
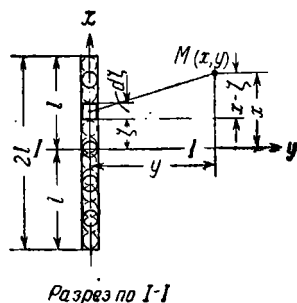


Рис. 1. Схема линейной системы скважин в безграничном пласте
1 — напорный пласт; 2 — безнапорный пласт

$$R_{л|_{\bar{x}=0}} = -\frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} Ei \left(-\frac{\bar{\zeta}^2 + \bar{y}^2}{4\alpha} \right) d\bar{\zeta}. \quad (4.5)$$

Графики $R_{л|_{\bar{x}=0}}$ для различных значений α и $\bar{y}$, построенные на основании численного интегрирования (4.5), представлены на рис. 2*.

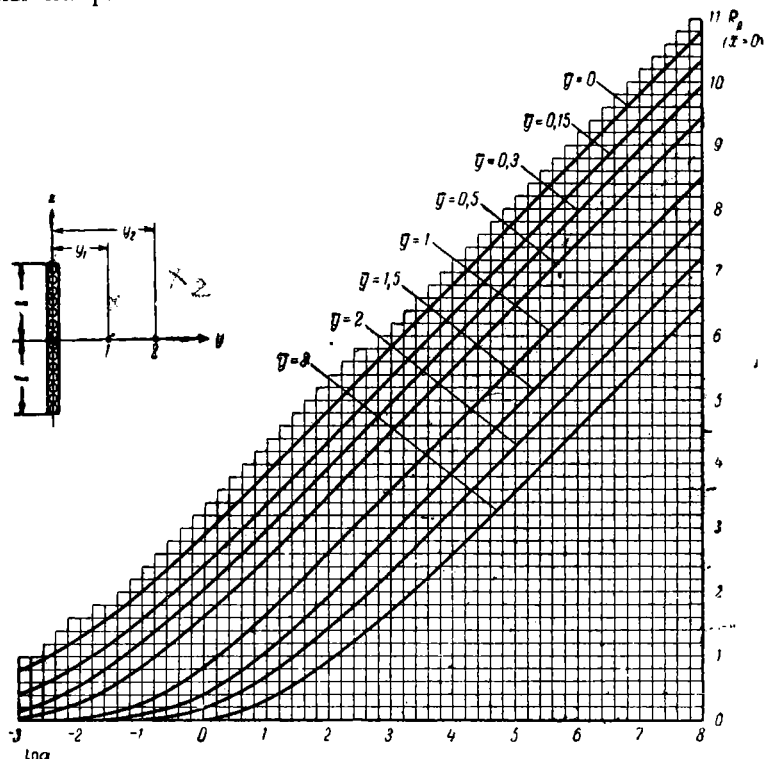


Рис. 2. График функции $R_{л|_{\bar{x}=0}}(\alpha; \bar{y})$

$$\alpha = \frac{at}{l^2}; \quad \bar{y} = \frac{y}{l}$$

* График составлен автором и В. Н. Львовой в начале 1957 г. и опубликован в статье [4]. В конце 1957 г. на совещании по водопонижению, проходившем в институте Водгео, Л. Н. Павловской доложено более общее решение уравнения (4.4) (см. работы [16, 17 и 18]).

При необходимости получить значения $R_{л}$ для $\ln \alpha > 8$ можно пользоваться следующей зависимостью

$$R_{л} = R_{л,1} + \ln \frac{\alpha}{\alpha_1},$$

где $R_{л}$ — искомое гидравлическое сопротивление для момента времени, отвечающего параметру α ;

$R_{л,1}$ — гидравлическое сопротивление, определяемое при любом значении α_1 в пределах прямолинейной части графиков.

Для определения напорной функции U при $y=0$, т. е. вдоль линии, на которой расположены скважины, из (4.4) получим

$$R_{л|\bar{y}=0} = -\frac{(1-\bar{x})}{2} Ei\left[-\frac{(1-\bar{x})^2}{4\alpha}\right] - \frac{(1+\bar{x})}{2} Ei\left[-\frac{(1+\bar{x})^2}{4\alpha}\right] + \\ + \sqrt{\pi\alpha} \left[\Phi\left(\frac{1-\bar{x}}{2\sqrt{\alpha}}\right) + \Phi\left(\frac{1+\bar{x}}{2\sqrt{\alpha}}\right) \right], \quad (4.6)$$

где Φ — обозначение интеграла вероятности (см. приложение 2).

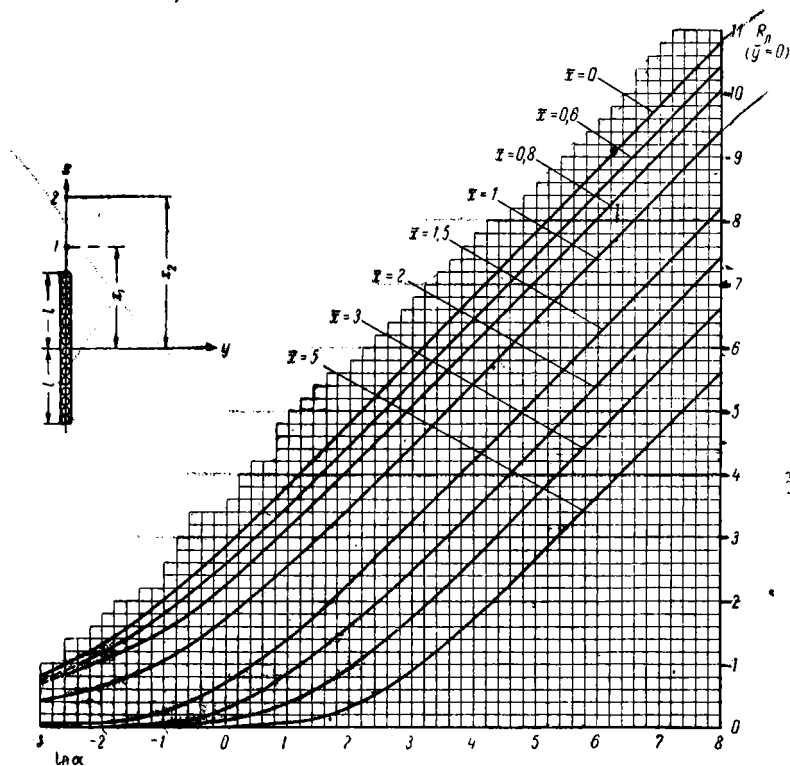


Рис. 3. График функции $R_{л|\bar{y}=0}(\alpha; \bar{x})$

$$\alpha = \frac{at}{l^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{l}$$

Это решение в несколько ином начертании впервые дано в работе [21].

Графики функции $R_{л|\bar{y}=0}$ приведены на рис. 3.

Располагая значениями $R_{л|\bar{x}=0}$ и $R_{л|\bar{y}=0}$, можно определить по формуле (2.1) величину общего притока $Q_{\text{сум}}$, если задаться значениями напорной функции U (т. е., иначе говоря, пониже-

ниями уровня) в точках, располагающихся вдоль двух взаимно-перпендикулярных линий: $x=0$, $y=0$.

По формуле (2.4) легко решить также обратную задачу по определению U в любой точке на указанных линиях при заранее заданном расходе $Q_{\text{сум}}$.

Вместе с тем, по известным значениям $R_{l|\bar{x}=0}$ (см. график на рис. 2) можно определять $Q_{\text{сум}}$ и U при рассмотрении любой точки пласта с координатами x , y , а не только на линиях $x=0$, $y=0^*$.

Путем удлинения реального ряда на величину, при которой рассматриваемая точка M оказывается на оси симметрии (т. е. в середине нового, продленного ряда; рис. 4), и сложения течений, обусловленных действием рядов длиной $2(l+x)$ и $2(l-x)$ с интенсивностью каждого из них, равной $q/2$, получаем

$$R_{l|\bar{x}, \bar{y}} = \frac{1}{2} [(1 + \bar{x}) R_{l|\bar{x}=0}(\alpha_{x,1}; \bar{y}_{x,1}) + (1 - \bar{x}) R_{l|\bar{x}=0}(\alpha_{x,2}; \bar{y}_{x,2})], \quad (4.7)$$

где

$$\alpha_{x,1} = \frac{at}{(l+x)^2}; \quad \alpha_{x,2} = \frac{at}{(l-x)^2};$$

$$\bar{y}_{x,1} = \frac{y}{l+x}; \quad \bar{y}_{x,2} = \frac{y}{|l-x|}. \quad (4.8)$$

Для точки, находящейся в центре линейной системы скважин, при $\bar{x}=\bar{y}=0$ из (4.6) имеем

$$R_{l|\bar{x}=\bar{y}=0} = -Ei\left(-\frac{1}{4\alpha}\right) + 2\sqrt{\pi\alpha} \Phi\left(\frac{1}{2\sqrt{\alpha}}\right). \quad (4.9)$$

Этому уравнению соответствуют верхние кривые на рис. 2 и 3.

При $\alpha = \frac{at}{l^2} \geq 4 \div 6$

$$R_{l|\bar{x}=\bar{y}=0} \approx \ln \frac{16,4at}{l^2}. \quad (4.10)$$

На концевых участках линейной системы скважин при $\bar{x}=\pm 1$, $\bar{y}=0$

$$R_{l|\bar{x}=\pm 1, \bar{y}=0} = -Ei\left(-\frac{1}{\alpha}\right) + \sqrt{\pi\alpha} \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}}\right). \quad (4.11)$$

* Этот расчетный прием предложен В. М. Шестаковым.

и при $\alpha \geq 4+6$

$$R_{\lambda} \Big|_{\substack{\bar{x}=\pm 1 \\ \bar{y}=0}} \approx \ln \frac{4,1at}{l^2}. \quad (4.12)$$

Таким образом, значения R_{λ} в концевых точках несколько меньше, чем в центре, что легко объясняется менее значительным влиянием всей системы на концевые участки: здесь понижения уровня, естественно, являются минимальными по сравнению с другими точками в пределах расположения скважин.

При определении напорной функции в точке, находящейся на некотором расстоянии от линии расположения скважин, влияние линии сказывается примерно так же, как и одиночного колодца с тем же суммарным расходом.

В табл. 1 приведены результаты сопоставительных расчетов по формулам (4.5) и (4.6), с одной стороны, и формулой (3.3) — с другой. В ней даны значения

$$\epsilon = \frac{R_{\lambda} + Ei\left(-\frac{\lambda^2}{4\alpha}\right)}{R_{\lambda}} 100. \quad (4.13)$$

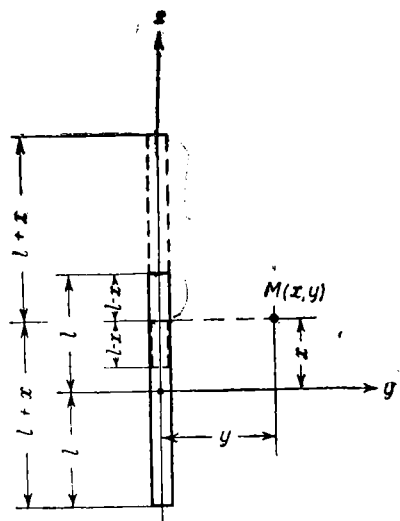


Рис. 4. Схема к расчету $R_{\lambda} \bar{x}, \bar{y}$ в любой точке пласта с координатами x, y

Таблица 1

λ	ϵ [%]				
	α				
	5	10	20	50	100
$\lambda = \bar{y}$	Для линии $\bar{x}=0$				
1	11,2	6,8	5,5	5,3	4,8
1,5	7,5	4,4	3,8	3,5	3,4
2	5,3	—	3,1	3	2,8
3	5,3	—	2,3	2,8	1,9
$\lambda = \bar{x}$	Для линии $\bar{y}=0$				
1	23,3	17	13,9	11,6	10,2
1,5	9,9	6,7	3,6	3,4	3,3
2	7,5	5,7	3,5	2,9	1,5
3	5,9	3,3	2,2	1,5	1,2

Как следует из табл. 1, при $\bar{x} \geq 1,5$ и $\bar{y} \geq 1,5$ по прошествии сравнительно непродолжительного времени ($\alpha \geq 5$) можно при определении гидравлического сопротивления с точностью до 10% пользоваться обычной формулой для одиночного колодца: при этом изолинии напоров имеют форму, близкую к окружности.

Аналогичный вывод был сделан также В. М. Шестаковым, который рассматривал приближенные приемы расчета линий равного притока [18, 27, 28].

Это обстоятельство, как будет видно из дальнейшего, весьма упрощает задачу расчета линейных систем скважин в пластах, ограниченных контурами питания (или стока) и непроницаемыми контурами. Пользуясь методом зеркальных отображений, в этих случаях можно отображенные (воображаемые) системы заменять одиночными колодцами. Точно так же представляется возможным поступать и при расчетах взаимодействующих линейных систем скважин.

5. КОЛЬЦЕВАЯ СИСТЕМА СКВАЖИН В БЕЗГРАНИЧНОМ ПЛАСТЕ

В случае, когда n скважин располагается по контуру, близкому к круговому, причем расход каждой скважины Q , а суммарный расход всех скважин $Q_{\text{сум}}$, можно, как и прежде, заменить скважины источниками, равномерно распределенными по окружности радиуса (рис. 5)

$$R_0 = \frac{L}{2\pi}, \quad (5.1)$$

где L — действительная длина контура расположения скважин. При этом

$$Q_{\text{сум}} = 2\pi R_0 q \text{ или } q = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi R_0}. \quad (5.2)$$

Бесконечно малое изменение напорной функции dU соответствует расходу на элементе $R_0 d\varphi$

$$q R_0 d\varphi = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi} d\varphi. \quad (5.3)$$

Расстояние от точки M , в которой определяется напорная функция, до элемента $R_0 d\varphi$, т. е. любой точки на окружности радиуса R_0 , выражается так:

$$r^* = \sqrt{r^2 + R_0^2 - 2r R_0 \cos \varphi}. \quad (5.4)$$

Подставляя (5.3) и (5.4) в выражение (3.4) и интегрируя его от 0 до U и от 0 до 2π , можно получить следующее выражение для определения напорной функции U и гидравлического сопротивления R_k в случае откачки из кольцевой системы взаимодействующих скважин при замене их кольцевой галереей

$$U = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi k} R_k, \quad (5.5)$$

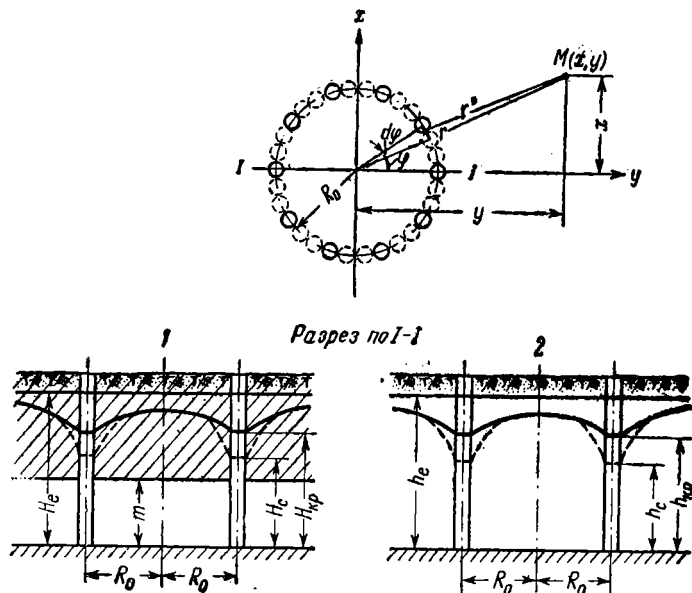


Рис. 5. Схема кольцевой системы скважин
1 — напорный пласт; 2 — безнапорный пласт

где [13]

$$R_k = \int_0^{\alpha} \frac{\exp\left(-\frac{1+\bar{r}^2}{4\gamma}\right)}{\gamma} I_0\left(\frac{\bar{r}}{2\gamma}\right) d\gamma; \quad (5.6)$$

$$\alpha = \frac{at}{R_0^2}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_0}.$$

Здесь I_0 — обозначение функции Бесселя от мнимого аргумента первого рода нулевого порядка.

Рассматриваемая задача о притоке к кольцевой системе скважин при замене их галереей подробно исследована в работах [19, 32, 33]. В первой из них приводятся результаты численного интегрирования выражения (5.6) для R_k , на основании

которых с некоторыми дополнениями нами составлены графики (рис. 6).

Из этих графиков видно, что в начальные моменты времени, примерно до $\alpha \leq 3,5$ ($\ln \alpha \leq 1,25$), величина R_k внутри окружности ниже, чем непосредственно на ней. Минимальные значе-

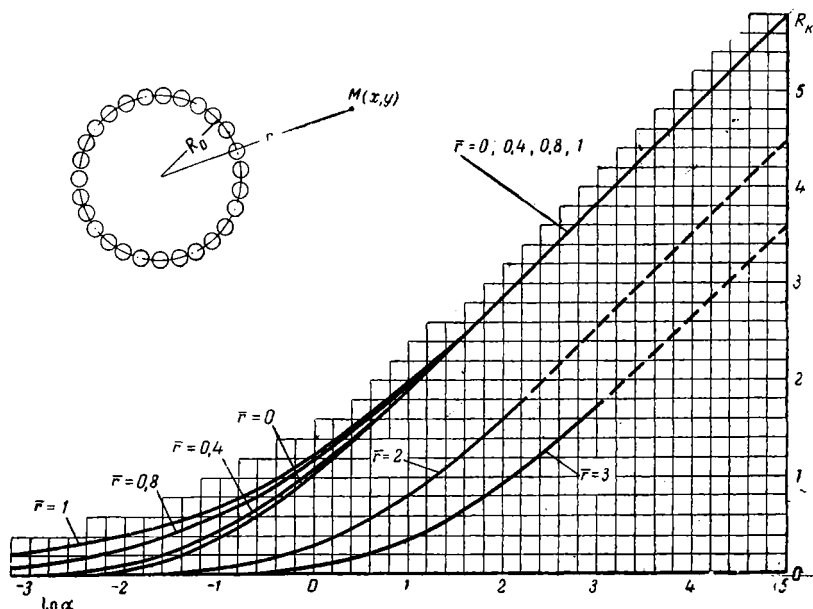


Рис. 6. Графики функции $R_k(\alpha; \bar{r})$

$$\alpha = \frac{at}{R_0^2}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_0}.$$

ния R_k в этот период падают на центр кольцевой системы $\bar{r} = 0$, где, как следует из (5.6),

$$R_k = -Ei\left(-\frac{1}{4\alpha}\right), \quad (5.7)$$

т. е. понижение уровня в центре кольцевой системы взаимодействующих скважин определяется по такой же зависимости, что для одиночной скважины с расходом $Q_{\text{сум}}$ [ср. с формулой (3.3)].

При $\alpha > 3,5$ понижения уровня во всех точках внутри кольца выравниваются; к этому времени здесь заканчивается сработка «бугра» подземных вод, образующегося вначале при пуске скважин, и весь расход водопонижительной установки обеспечивается притоком с внешней стороны. Для определения R_k при $\alpha > 3,5$ во всех точках $\bar{r} = 0 \div 1$ может применяться формула (5.7).

Соотношение между внутренним Q_v и внешним Q_n притоками к кольцевой системе скважин может быть найдено из такой зависимости (при $\alpha > 1$) [20]:

$$\frac{Q_v}{Q_n} \approx \frac{1 - \exp\left(-\frac{1}{2\alpha}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2\alpha}\right)}, \quad (5.8)$$

причем

$$Q_{\text{сум}} = Q_v + Q_n. \quad (5.9)$$

Для расчета кольцевой системы скважин в еще большей степени, чем для линейного ряда, можно пользоваться формулами для одиночных колодцев.

Уже на расстоянии $r > 1,5$ при $\alpha > 5$ расхождения в расчетах по точной и приближенной формуле (т. е. при замене кольцевой системы одиночным колодцем) практически незначительны.

6. ПЛОЩАДНАЯ СИСТЕМА СКВАЖИН В БЕЗГРАНИЧНОМ ПЛАСТЕ

Если водопонижительные скважины располагаются не по контуру, а в пределах некоторой площади, можно представить ее для целей расчета в виде круга радиусом

$$R_0 = \frac{P}{2\pi}, \quad (6.1)$$

где P — периметр действительной площади расположения скважин.

Тогда, заменив реальные скважины множеством источников с суммарным расходом $Q_{\text{сум}}$ (рис. 7), получим следующее выражение для единичного (на единицу площади) расхода

$$q = \frac{Q_{\text{сум}}}{\pi R_0^2}. \quad (6.2)$$

Бесконечно малое изменение напорной функции dU при этом будет вызвано расходом на элементе площади $\rho d\rho d\varphi$

$$q\rho d\rho d\varphi = \frac{Q_{\text{сум}}}{\pi R_0^2} \rho d\rho d\varphi. \quad (6.3)$$

Расстояние от точки M до этого элемента

$$r^* = \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \varphi}. \quad (6.4)$$

Подставив теперь (6.3) и (6.4) в (3.4) с учетом результата (5.6), получим выражение для определения напорной функции

U и гидравлического сопротивления $R_{пл}$ для круговой площадной системы взаимодействующих скважин в следующем виде:

$$U_{пл} = \frac{Q_{сум}}{4\pi k} R_{пл}; \quad (6.5)$$

$$R_{пл} = 2 \int_0^1 \int_0^\alpha \frac{\bar{p} \exp\left(-\frac{\bar{r}^2 + \bar{\rho}^2}{4\gamma}\right)}{\gamma} I_0\left(\frac{\bar{r}\bar{\rho}}{2\gamma}\right) d\bar{\rho} d\gamma; \quad (6.6)$$

$$\alpha = \frac{at}{R_0^2}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_0} \quad \text{и} \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{R_0}.$$

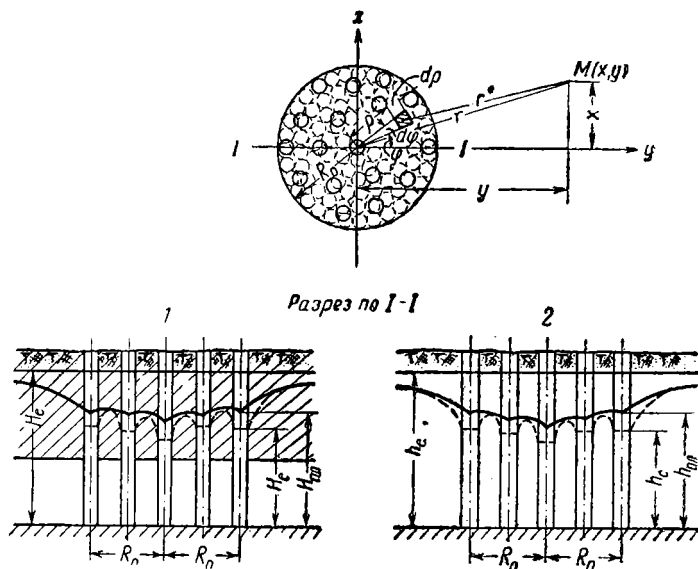


Рис. 7. Схема обобщенной системы скважин на круговой площади

1 — напорный пласт; 2 — безднапорный пласт

Для центра круга ($\bar{r}=0$), как показано в работе [21], а затем [25]

$$R_{пл} = -Ei\left(-\frac{1}{4\alpha}\right) + 4\alpha \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{4\alpha}\right)\right]. \quad (6.7)$$

График $R_{пл}$ по этим формулам представлен на рис. 8. Для $r>0$ графики получены путем численного интегрирования выражения (6.6), причем использовано решение для кольцевой системы, данное в работе [24]*.

* Графики показаны пунктирными линиями в пределах значений α и r , для которых величина $R_{пл}$ определена приближенно.

Из (6.7) видно, что в центре круга при более или менее значительной длительности откачки (когда $\alpha > 1 \div 1,5$)

$$R_{пл} \approx R_k + 1 \approx \ln \frac{6,12at}{R_0^2}. \quad (6.8)$$

Здесь R_k — гидравлическое сопротивление для кольцевой системы в той же точке $r=0$. На внешнем контуре площадной системы скважин ($\bar{r}=1$) уже при $\alpha \geq 1 \div 1,5$

$$R_{пл} \approx R_{кр}. \quad (6.9)$$

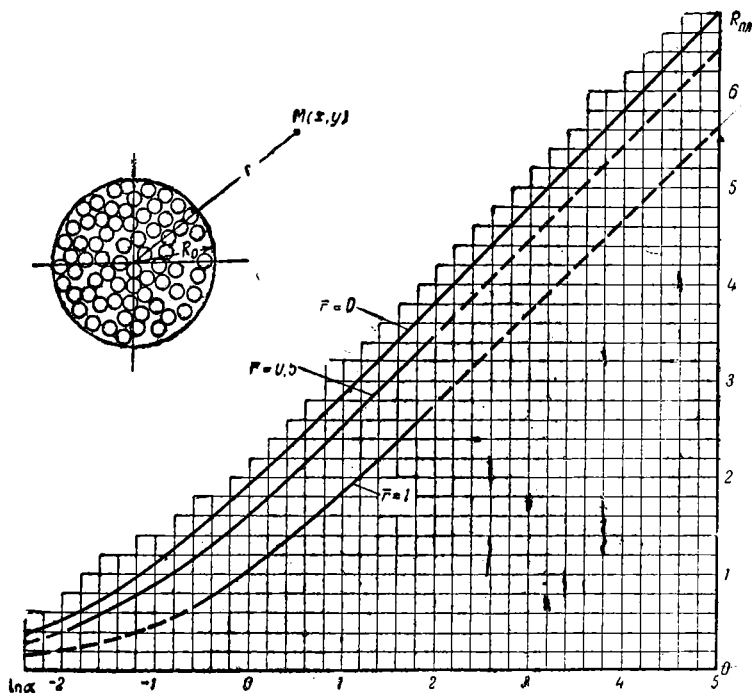


Рис. 8. График функции $R_{пл}(\alpha; \bar{r})$

$$\alpha = \frac{at}{R_0^2}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_0}$$

Исходя из этого можно считать, что, как и в кольцевой системе, в удалении от группы скважин, расположенных по площади круга, при $\bar{r} > 1,5 \div 2$ влияние их можно учитывать по формуле (3.3), т. е. заменять площадную систему единичным большим колодезем.

В работе [29] в связи с задачей о фильтрации из экранированных бассейнов рассматривалась площадная система источников и стоков постоянной интенсивности, имеющая в плане форму прямоугольника.

Из полученных в ней результатов устанавливается, что для центра прямоугольника во всем диапазоне соотношений сторон последнего (от 1, т. е. квадрата, до 0, что соответствует рассматривавшейся в разделе 4 линейной системе), по простейшему сравнительно непрерывного времени (когда $\alpha \geq 1$), величина гидравлического сопротивления может быть определена как и для круговой площади по формуле (6.7), если приведенный радиус R_0 исчислять по периметру действительной площади [см. выражение (6.1)].

Таким образом, изложенный способ расчета площадных систем является достаточно общим и может применяться при самой различной конфигурации площади расположения скважин.

7. СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩИЕ ИЗ НЕБОЛЬШОГО КОЛИЧЕСТВА ОТДЕЛЬНЫХ СКВАЖИН («ДИСКРЕТНЫЕ» ГРУППЫ)

При небольшом количестве взаимодействующих скважин, располагающихся без сколько-нибудь выраженной ориентировки и отстоящих на значительном расстоянии друг от друга, переход к охарактеризованным в разделах 4—6 линейной, кольцевой и площадной схемам может привести к нежелательным погрешностям. Вполне строго рас-

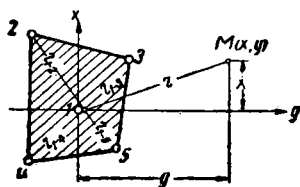


Рис. 9. Схема к расчету системы, состоящей из небольшого числа скважин (дискретная группа)

ход и понижения уровня в этом случае, как указывалось нами с самого начала, можно определять путем сложения функции (3.3) или (3.3').

Выражения для гидравлического сопротивления R_d при этом будут соответственно иметь такой вид (рис. 9) [7]:

$$R_d = - \sum_{i=1}^n \beta_i E i \left(- \frac{r_i^2}{4at} \right) \quad (7.1)$$

и при значительной длительности откачки, когда $\frac{r_{i\max}^2}{4at} \leq 0,1$,

$$R_d \approx \sum_{i=1}^n \beta_i \ln \frac{2,25at}{r_i^2}. \quad (7.2)$$

Здесь

$$\beta_i = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n;$$

$$\beta_1 = \frac{Q_{c1}}{Q_{\text{сум}}}; \quad \beta_2 = \frac{Q_{c2}}{Q_{\text{сум}}}, \dots, \beta_n = \frac{Q_{cn}}{Q_{\text{сум}}};$$

$r_i = r_1, r_2, \dots, r_n$ — расстояние от соответствующих скважин до точки, в которой определяется напорная функция;
 $Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{cn}$ — расход каждой скважины;
 $Q_{\text{ум}}$ — расход всей системы;
 n — общее число скважин в системе.

Формулы (7.1) и (7.2) целесообразно применять при определении напорной функции непосредственно на участке размещения скважин или в них самих.

В случае удаления крайних скважин на расстояние, превышающее максимальную длину участка их расположения, следует пользоваться приближенным приемом, т. е. заменять дискретную систему скважин единым большим колодцем.

При этом функция R_d будет выражаться по формулам (3.3) или (3.3'), где расстояние r можно приближенно исчислять от геометрического центра фигуры, ограниченной контуром, проведенным через крайние скважины группы (см. рис. 9).

В формулах (7.1) и (7.2), в отличие от ранее приведенных выражений для R , частично уже учитывается внутреннее сопротивление $R_{\text{скв}}$; при определении напорной функции в одной из скважин здесь принимается $r = r_c$, где r_c — радиус скважины.

8. СИСТЕМЫ СКВАЖИН В ПЛАСТАХ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ

В водоносных пластах, ограниченных по своим размерам в плане, приведенные выше формулы не могут быть использованы для расчета расхода и понижения уровня при длительной откачке. В этом случае следует уже учитывать влияние тех изменений в гидрогеологической обстановке, которые происходят на границах пласта.

Для целей расчета действительные очертания границ в большинстве случаев можно заменять прямолинейными контурами [5, 7].

В зависимости от конфигурации пласта в плане и гидрогеологических условий, точнее, состава и водопроницаемости окружающих горных пород и условий питания пласта через пограничные поверхности, выделяются три основные схемы (рис. 10).

1. Пласт с одной прямолинейной границей.
2. Пласт, ограниченный двумя взаимно-пересекающимися перпендикулярными контурами.
3. Пласт с двумя параллельными границами.

Расчетные зависимости для всех указанных схем могут быть получены по методу зеркальных отображений и наложе-

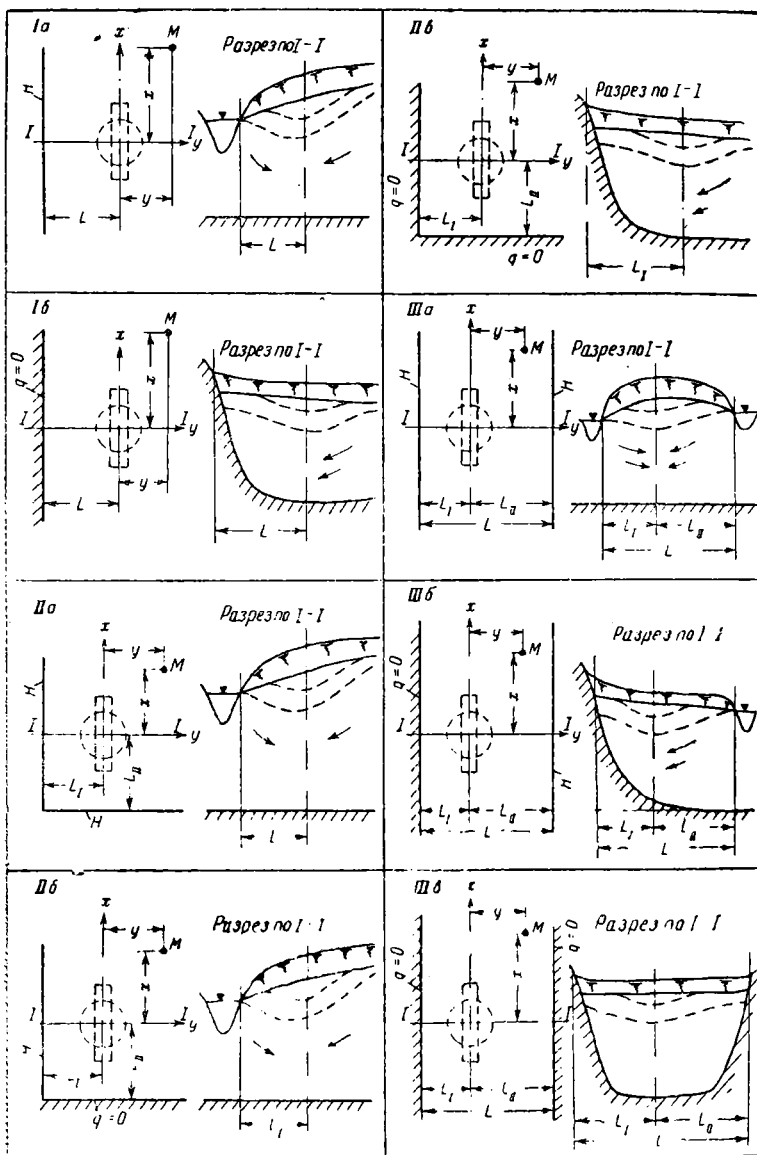


Рис. 10. Расчетные схемы для ограниченных пластов

ния течений, обусловленных реальными системами взаимодействующих скважин и их отображениями¹.

При этом следует учитывать, что, как отмечалось ранее, при удалении от линейной системы скважин на расстояние равное или большее $1,5 l$, а круговых (кольцевой и площадной) систем — на $1,5 R_0$, можно их заменить одним большим колодцем с тем же суммарным расходом, определяя гидравлическое сопротивление по выражениям (3.3) и (3.3').

Таким образом, гидравлическое сопротивление, обусловленное откачкой из системы скважин в пластах ограниченных размеров, может быть представлено в общем виде так:

$$R = R_r + \sum E i \left(-\frac{\rho_i^2}{4at} \right), \quad (8.1)$$

где R_r — гидравлическое сопротивление для системы взаимодействующих скважин в безграничном пласте. В случае линейной системы $R_r = R_l$ [см. формулы (4.4) — (4.12) в разделе 4]. Для кольцевой системы $R_r = R_k$ [формулы (5.6) и (5.7) в разделе 5] и для круговой площадной системы $R_r = R_{пл}$ [формулы (6.6) — (6.9) в разделе 6]. При расчетах группы из небольшого количества скважин величина $R_r = R_d$ выражается по формулам (7.1) и (7.2), приведенным в разделе 7;

ρ_i — радиусы-векторы отображений реальной системы относительно границ пласта.

Схема I — пласты, ограниченные только с одной стороны (или, как их часто называют, полуограниченные пласты). К ним могут быть отнесены, например, водоносные горизонты в широких долинах крупных рек, вблизи которых располагаются водозаборные и водопонизительные сооружения (схема Ia, см. рис. 10). Удаленный контур, т. е. коренной склон долины, в этом случае даже при значительной длительности откачек не оказывает существенного влияния на величины расхода и понижения уровня.

На границе пласта вдоль реки для целей расчета можно задать условие постоянства напора ($H = \text{const}$).

В виде схемы с одной прямолинейной непроницаемой границей (схема Ib) представляются, например, пласты, ограниченные сбросами, когда на линии сброса, в зоне смещения, горные породы обладают весьма слабой водопроницаемостью (практически их можно считать водоупорными, $q = 0$). К такому же типу пластов иногда могут быть отнесены краевые части крупных конусов выноса предгорных областей и др.

В соответствии с общей формулой (8.1) гидравлическое сопротивление при определении напорной функции в любой точ-

¹ Применительно к отдельным скважинам в пластах, ограниченных одним и двумя прямолинейными контурами питания, расчетные зависимости по этой методике ранее были получены Н. Н. Веригиным (Водгео).

ке M с координатами x и y для полуограниченного пласта имеет следующее выражение:

$$R = R_r \pm Ei \left(-\frac{\rho^2}{4at} \right), \quad (8.2)$$

где ρ — расстояние от точки M до отображения системы

$$\rho^2 = x^2 + (2L + y)^2, \quad (8.3)$$

где L — расстояние от центра системы скважин до контура пласта.

Знак плюс в формуле (8.2) берется для схемы Ia (пласт, ограниченный контуром с постоянным напором), знак минус — для схемы Ib (пласт с непроницаемым контуром).

По истечении длительного времени (при $t > 2,5 \frac{\rho^2}{a}$) формулы для гидравлического сопротивления в случае определения напорной функции в центре системы скважин с точностью до 5% будут иметь вид, указанный в табл. 2.

Таблица 2

Система скважин	Формулы гидравлического сопротивления R в полуограниченных пластах для центра системы			
	Схема Ia	№ формулы	Схема Ib	№ формулы
Линейная	$R_{\text{л}} = 2 \ln \frac{5,4L}{l}$	(8.4)	$R_{\text{л}} = 2 \ln \frac{3at}{Ll}$	(8.5)
Кольцевая	$R_{\text{к}} = 2 \ln \frac{2L}{R_0}$	(8.6)	$R_{\text{к}} = 2 \ln \frac{1,13at}{LR_0}$	(8.7)
Площадная	$R_{\text{пл}} = 2 \ln \frac{3,3L}{R_0}$	(8.8)	$R_{\text{пл}} = 2 \ln \frac{1,85at}{LR_0}$	(8.9)
Дискретная	$R_{\text{д}} = 2 \sum_{i=1}^n \beta_i \ln \frac{2L}{r_i}$	(8.10)	$R_{\text{д}} = 2 \sum_{i=1}^n \beta_i \ln \frac{1,13at}{Lr_i}$	(8.11)

Из табл. 2 видно, что в пласте, ограниченном контуром с постоянным напором, т. е. вблизи рек, водохранилищ и т. д. (схема Ia), при более или менее длительной откачке из скважин движение приобретает установившийся характер [см. формулы (8.4), (8.6), (8.8) и (8.10)].

Если же пласт ограничивается непроницаемыми породами, как это принято в схеме Ib, гидравлическое сопротивление подобно безграничному пласту все время возрастает.

Следует заметить, что приведенные в табл. 2 формулы могут быть унифицированы для всех систем скважин — линейной, кольцевой, площадной и дискретной для схемы Ia

$$R = 2 \ln \frac{2L}{R_{\text{пр}}} \quad (8.12)$$

и для схемы I б

$$R = 2 \ln \frac{1,13at}{LR_{\text{пр}}} \quad (8.13)$$

Здесь $R_{\text{пр}}$ — некоторый приведенный радиус системы взаимодействующих скважин (при определении понижения в центре системы). Значения его для различных систем таковы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{линейная} — R_{\text{пр}} \approx 0,37l; \\ \text{кольцевая} — R_{\text{пр}} = R_0; \\ \text{площадная} — R_{\text{пр}} = 0,61R_0; \\ \text{дискретная} — R_{\text{пр}} = r_1^2, r_2^2, \dots, r_a^2 \end{array} \right\} \quad (8.14)$$

Схема II — пласты с двумя взаимно-пересекающимися контурами. По существу они являются также полуограниченными пластами, но только несколько более сложной конфигурации, чем в I схеме.

В виде такой схемы могут быть представлены также приречные участки, например, в крутых излучинах русел (схема IIa) или при наличии резких фациальных переходов в аллювиальных отложениях и смене их вдоль долины весьма слабо водопроницаемыми глинистыми породами (схема IIб).

В горных районах иногда реальные пласты для расчета могут быть схематически ограничены двумя пересекающимися непроницаемыми контурами (схема IIв).

Формула гидравлического сопротивления при определении напорной функции в любой точке M для рассматриваемой схемы имеет следующий вид:

$$R = R_r \pm Ei \left(-\frac{\rho_I^2}{4at} \right) \pm Ei \left(-\frac{\rho_{II}^2}{4at} \right) \pm Ei \left(-\frac{\rho_{III}^2}{4at} \right), \quad (8.15)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_I^2 = x^2 + (2L_I + y)^2; \\ \rho_{II}^2 = (2L_{II} + x)^2 + y^2; \\ \rho_{III}^2 = (2L_{II} + x)^2 + (2L_I + y)^2. \end{array} \right\} \quad (8.16)$$

Знаки в формуле (8.15) последовательно от первого до последнего члена принимаются: для схемы IIa — плюс—плюс—минус; для схемы IIб — плюс—минус—плюс; для схемы IIв — все минус.

В рассматриваемых схемах IIa и IIб при наличии контура с постоянным напором сопротивление стремится к конечной величине, не зависящей от времени, и движение подземных вод сравнительно быстро становится практически установившимся. При отсутствии контура с постоянным напором (схема IIв) сопротивление в пределе стремится к бесконечности и с течением времени понижение уровня, как и в первой схеме, возрастает.

При $t > 2,5 \frac{\rho_{III}^2}{a}$ формулы для гидравлического сопротивления при определении напорной функции в центре системы взаимодействующих скважин будут иметь такой вид:

$$\text{для схемы IIa } R = 2 \ln \frac{\rho_I \rho_{II}}{R_{np} \rho_{III}}, \quad (8.17)$$

$$\text{„ „ IIб } R = 2 \ln \frac{\rho_I \rho_{III}}{R_{np} \rho_{II}}, \quad (8.18)$$

$$\text{„ „ IIв } R = 4 \ln \frac{2,25at}{\sqrt{R_{np} \rho_I \rho_{II} \rho_{III}}}. \quad (8.19)$$

Значения R_{np} в этих формулах принимаются в зависимости от системы скважин по выражениям (8.14).

Схема III — пласты с двумя параллельными контурами (пласты — полосы). Как и в предыдущих схемах, здесь они являются или контурами питания (стока) или непроницаемыми контурами.

Подобные условия характерны, например, для междуречий при наличии гидравлической связи водоносных пластов с реками (схема IIIa), а также для водоносных пластов, ограниченных по ширине долин рек с постоянным стоком (схема IIIб), или при периодическом отсутствии в них стока (схема IIIв).

Приближенная формула гидравлического сопротивления R для всех этих случаев при определении напорной функции в любой точке пласта M имеет следующий вид:

$$R = R_r \pm Ei \left(-\frac{\rho_I^2}{4at} \right) \pm Ei \left(-\frac{\rho_{II}^2}{4at} \right) \pm \pm Ei \left(-\frac{\rho_{III}^2}{4at} \right) \pm Ei \left(-\frac{\rho_{IV}^2}{4at} \right) \pm Ei \left(-\frac{\rho_V^2}{4at} \right), \quad (8.20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \rho_I^2 &= x^2 + (2L_I + y)^2, \\ \rho_{II}^2 &= x^2 + (2L_{II} - y)^2, \\ \rho_{III}^2 &= x^2 + (2L + y)^2, \\ \rho_{IV}^2 &= x^2 + (2L - y)^2, \\ \rho_V^2 &= x^2 + [2(2L_I + L_2) + y]^2. \end{aligned} \right\} \quad (8.21)$$

Знаки в формуле (8.20) следует принимать: для схемы IIIa — плюс — плюс — минус — минус — плюс; для схемы IIIб — минус — плюс — плюс — минус — плюс; для схемы IIIв — все минус.

Формула (8.20) получена в результате ограниченного числа отображений реальной системы скважин относительно контуров пласта; она применима при времени $t \leq 0,5 \frac{\rho_V^2}{a}$.

При $t > 0,5 \frac{\rho_V^2}{a}$ для определения напорной функции в центре системы взаимодействующих скважин можно пользоваться следующими формулами гидравлического сопротивления [7, 15, 23]:

$$\text{для схемы IIIa} \quad R = 2 \ln \frac{0,64L \sin \frac{\pi L_1}{L}}{R_{np}}, \quad (8.22)$$

$$\text{„ „ IIIб} \quad R = 2 \ln \frac{1,27L \operatorname{ctg} \frac{\pi L_1}{2L}}{R_{np}}, \quad (8.23)$$

$$\text{„ „ IIIв} \quad R = \frac{7,1 \sqrt{at}}{L} + 2 \ln \frac{0,16L}{R_{np} \sin \frac{\pi L_1}{L}}. \quad (8.24)$$

Здесь значения R_{np} определяются также по (8.14).

Как в предыдущих схемах, в водоносных пластах с двумя параллельными контурами при наличии постоянного источника питания (схемы IIIa и IIIб) движение подземных вод становится практически установившимся. При отсутствии постоянного источника питания (схема IIIв) происходит постоянное понижение уровня, причем из сопоставления формулы (8.24) с формулами (8.19) и (8.13) видно, что в рассматриваемой схеме в отличие от полуограниченных пластов понижения уровня со временем возрастают пропорционально корню квадратному из величины t (в полуограниченных пластах они связаны со временем логарифмической зависимостью).

Следует еще раз напомнить, что приведенные формулы для ограниченных пластов могут быть использованы только при условии, когда крайние скважины системы отстоят от ближайшего контура пласта на расстоянии, равном (или большем) половине максимального размера системы в плане: l — в линейной системе и R_0 — в кольцевой и площадной.

9. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ СКВАЖИН

Расчет взаимодействующих систем скважин производится по методу наложения течений¹ с использованием зависимостей для единичных систем.

В соответствии с этим при рассмотрении напорной функции в какой-либо точке M сначала определяется влияние на нее каждой системы в отдельности, независимо от остальных взаимодействующих систем (так, как если бы каждая из них действовала самостоятельно) по тем же зависимостям, что и в случаях, рассмотренных выше в разделах 4—6. Таким путем определяются частные напорные функции $U_1, U_2, \dots, U_k$. Затем они алгебраически складываются, и таким образом находится полная напорная функция U

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_k. \quad (9.1)$$

Для расчета взаимодействующих систем скважин могут быть использованы также общие формулы (2.1)—(2.5). В качестве гидравлического сопротивления при этом следует принимать сумму частных сопротивлений, обусловленных действием каждой системы.

Так, для k взаимодействующих линейных рядов будем иметь

$$R_{\lambda} = \sum_{i=1}^k \beta_i R_{\lambda i}(\alpha_i; \bar{y}_i) \pm \sum_{i=1}^k \beta_i E i \left(-\frac{\rho_i^2}{4at} \right), \quad (9.2)$$

где

$$\beta_i = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k; \beta_1 = \frac{Q_1}{Q_{\text{сум}}}, \quad \beta_2 = \frac{Q_2}{Q_{\text{сум}}}, \dots, \beta_k = \frac{Q_k}{Q_{\text{сум}}}. \quad (9.3)$$

Здесь $Q_1, Q_2, \dots, Q_k$ — расходы каждой системы;

$Q_{\text{сум}}$ — суммарный расход всех систем;

$R_{\lambda i} = R_{\lambda 1}, R_{\lambda 2}, \dots, R_{\lambda k}$ — соответствующее гидравлическое сопротивление, определяемое по тем же графикам, что и для одного ряда (см. рис. 2 и 3) в зависимости от

¹ Этот метод используется в работах М. Маскета [13], П. Я. Полубариновой-Кочинной [22], В. Н. Щелкачева [30, 31], И. А. Чарного [25] и многих других авторов.

$$\alpha_i = \frac{at}{l_i^2}; \quad \bar{y}_i = \frac{y}{l_i}; \quad l_i = l_1, l_2, \dots, l_k; \quad (9.4)$$

ρ_i — расстояния от отображенных систем (больших колодцев).

Выражения их для соответствующих расчетных схем даны в разделе 8.

Для k круговых (кольцевой и площадной) взаимодействующих систем получим

$$R_k = \sum_{i=1}^k \beta_i R_{ki}(\alpha_i; \bar{r}_i) \pm \sum_{i=1}^k \beta_i Ei \left(-\frac{\rho_i^2}{4at} \right) \quad (9.5)$$

и

$$R_{пл} = \sum_{i=1}^k \beta_i R_{пл i}(\alpha_i; \bar{r}_i) \pm \sum_{i=1}^k \beta_i Ei \left(-\frac{\rho_i^2}{4at} \right), \quad (9.6)$$

где R_{ki} и $R_{пл i}$ определяются по графикам для одиночных круговых систем (см. рис. 6 и 8) в зависимости от

$$\alpha_i = \frac{at}{R_{0i}^2}; \quad \bar{r}_i = \frac{r}{R_{0i}}; \quad R_{0i} = R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0k}. \quad (9.7)$$

Расчеты по формулам (9.2), (9.5) и (9.6) могут быть упрощены, если учесть, что в удалении от линейных и круговых систем скважин на расстоянии соответственно $1,5l_i$ и $1,5 R_{0i}$ их влияние аналогично влиянию большого колодца с тем же расходом Q_i и численно может быть выражено по формуле (3.3).

При включении отдельных систем скважин в разное время или выключении части из них величины напорных функций определяются путем суммирования соответствующих напорных функций, обусловленных действием каждой вновь вводимой системы, причем в расчет принимается фактический период времени, начиная от момента их включения.

Остановка той или иной системы учитывается путем включения системы с тем же по величине, но обратным по знаку расходом.

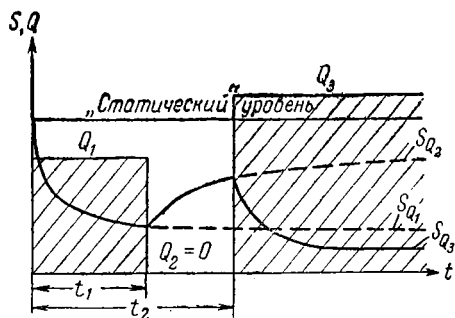


Рис. 11. Схема к расчету взаимодействующих систем скважин при разновременном их включении

Допустим, например, что в безграничном пласте располагается линейная система скважин длиной $2l_1$, из которой в течение периода времени t_1 ведется откачка с расходом Q_1 (рис. 11).

Затем она выключается и в момент t_2 вводится в действие другая линейная система длиной $2l_2$ с расходом $Q_3 > Q_1$.

Полная напорная функция в любой точке к концу периода времени t при этом выразится следующим образом:

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (9.8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{Q_1}{4\pi k} R(\alpha_1; \bar{x}; \bar{y}); & \alpha_1 &= \frac{at}{l_1^2}; \\ U_2 &= -\frac{Q_1}{4\pi k} R(\alpha_2; \bar{x}; \bar{y}); & \alpha_2 &= \frac{a(t-t_1)}{l_1^2}; \\ U_3 &= \frac{Q_3}{4\pi k} R(\alpha_3; \bar{x}; \bar{y}); & \alpha_3 &= \frac{a(t-t_2)}{l_2^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

Таким образом, влияние пуска и остановки прослеживается в течение всего периода времени t (см. пунктирные линии на рисунке), начиная от каждого момента изменения расхода. Тем самым как бы наследуется предшествующая депрессионная поверхность: вновь вводимые системы (равно как и их остановка) приводят к изменению именно этой депрессионной поверхности, а не первоначальной, определяемой так называемым статическим уровнем в естественных условиях (до начала откачек из первой системы).

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ В СКВАЖИНЕ

Внутреннее гидравлическое сопротивление в скважине $R_{\text{скв}}$ [см. выражение (2.5)] можно определить по следующей зависимости [3]:

$$R_{\text{скв}} = 2\beta \left[\ln \frac{r_n}{r_c} + \zeta_n \left(\frac{l}{m}; \frac{m}{r_c} \right) \right], \quad (10.1)$$

где $\beta = \frac{Q}{Q_{\text{сум}}}$ (Q — расход данной скважины, $Q_{\text{сум}}$ — суммарный расход всех взаимодействующих скважин системы);
 r_c — радиус скважины;
 r_n — приведенный радиус некоторой условной области влияния данной скважины.

Величина r_n определяется в зависимости от схемы расположения скважин.

Для контурных систем (линейной или кольцевой) при одинаковых расстояниях между скважинами 2δ [3] (рис. 12, а)

$$r_{\pi} = \frac{\sigma}{\pi}, \quad (10.2)$$

а при разных расстояниях между скважинами $2\sigma_1$ и $2\sigma_2$ (рис. 12, б) можно, как показано в работе [16], принимать

$$r_{\pi} \approx \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\pi}. \quad (10.3)$$

В случае площадного размещения скважин (рис. 12, в, г)

$$r_{\pi} \approx 0,47 \sqrt{\frac{F_0}{\pi}}, \quad (10.4)$$

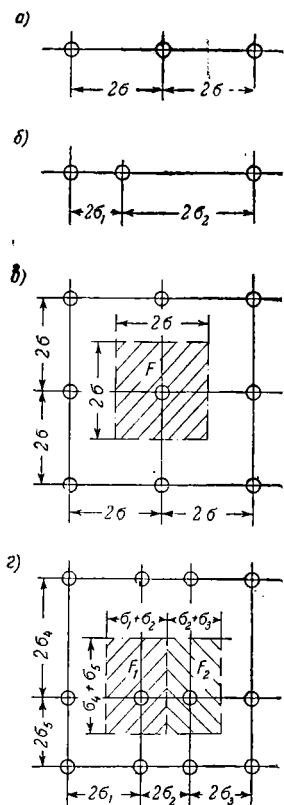


Рис. 12. Схемы расположения скважин

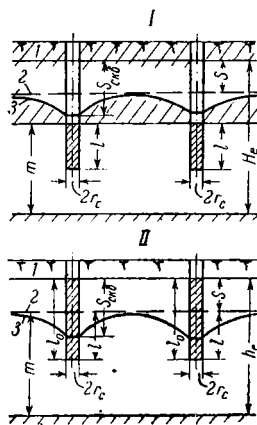


Рис. 13. Схема несовершенных скважин

I — напорный пласт; *II* — безнапорный пласт; 1 — статический уровень; 2 — уровень в обобщенной системе (галерее или большом колоде); 3 — уровень в скважине

где F_0 — площадь круга, равная площади некоторой условной области, ограниченной линиями, проходящими посредине между соседними скважинами.

Выражение (10.4) вытекает из сравнения понижений уровня в закрытом круговом пласте площадью F_0 при равномерном отборе воды из него (т. е. при постоянном удельном расходе в пределах всей площади) и при откачке из скважины, расположенной в центре пласта.

В первом случае понижение уровня будет

$$S = \frac{Qt}{\mu F_0}. \quad (10.5)$$

Во втором случае, как следует из решения, данного в работе [13]:

$$S = \frac{Q}{2\pi kh_{cp}} \left(\ln \frac{\sqrt{\frac{F_0}{\pi}}}{r_c} - 0,75 \right) + \frac{Qt}{\mu F_0}, \quad (10.6)$$

где Q — расход воды, извлекаемой из пласта;

h_{cp} — средняя его мощность;

μ — коэффициент водоотдачи.

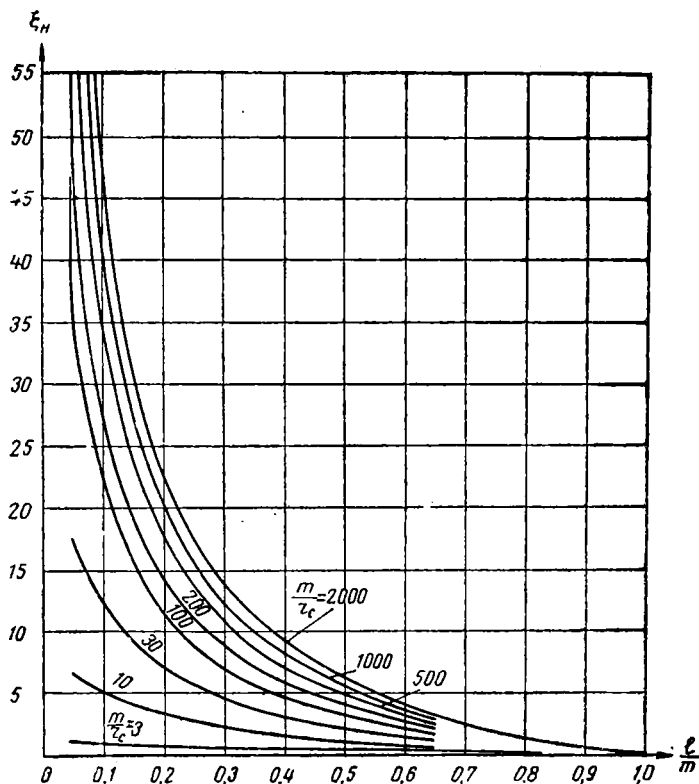


Рис. 14. График для определения дополнительного сопротивления несовершенной скважины $\xi_n = f\left(\frac{l}{m}; \frac{m}{r_c}\right)$

Вычитая (10.5) из (10.6), получим дополнительное сопротивление, обусловленное наличием скважины, равное первому члену в прямых скобках формулы (10.1), причем в нем r_n определяется по (10.4).

Далее обозначения в формуле (10.1) следующие:

ζ_n — гидравлическое сопротивление, обусловленное несовершенством скважин и определяемое в зависимости от длины фильтра l , мощности пласта m и радиуса скважины r_c (рис. 13).

Значения ζ_n можно определять по графику, построенному Н. Н. Веригиным [10] (рис. 14).

Для безнапорных потоков по рекомендации В. М. Шестакова

$$m \approx h_e - S \text{ и } l \approx l_0 - S, \quad (10.7)$$

где h_e — полная мощность водоносного пласта (глубина от статического уровня до водоупора);

l_0 — действительная длина фильтра;

S — понижение уровня в данной точке (при замене скважин галереями и большими колодцами).

В случаях, когда фильтр размещается в средней части пласта, значения ζ_n , определяемые по графикам на рис. 14, следует уменьшать: при $\frac{l}{m} = 0,3$ на 1,5, при $\frac{l}{m} = 0,5$ на 0,7.

11. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СКВАЖИН ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК

Расчеты дебита скважин и понижений динамического уровня во многих случаях целесообразно производить непосредственно на основе результатов опытных и опытно-эксплуатационных откачек. Таким путем в наибольшей мере учитывается неоднородность пласта и в результатах расчета получают непосредственное отражение явления нарушения линейного закона фильтрации вблизи скважин, дополнительные сопротивления на входе воды в скважины и т. д.

Метод расчета, по данным опытных и опытно-эксплуатационных откачек, состоит в следующем.

Понижение уровня S в той или иной скважине (или системе взаимодействующих скважин) при откачке из водозабора, состоящего из n скважин (или нескольких систем взаимодействующих скважин), в общем виде можно представить зависимостью

$$S = S_0 + \sum_{i=1}^n S_i + \Delta S(t), \quad (11.1)$$

где S_0 — понижение уровня, вызванное откачкой из данной скважины с расходом Q_0 (в условиях одиночной ее работы, без учета влияния взаимодействующих скважин);

S_i — понижение уровня («срезка») в этой же скважине, обусловленное откачкой из i -й взаимодействующей с

ней скважины с расходом Q_i ($\Sigma \nabla S_i$ — суммарное понижение (срезка) под влиянием всех совместно работающих скважин; значком ∇ показано, что из суммы исключается данная скважина, в которой определяется понижение уровня S);

$\Delta S(t)$ — дополнительное понижение уровня в той же скважине, происходящее с течением времени в результате общей сработки запасов подземных вод в пласте.

Величины S_0 и S_i определяются по кривым дебита, получаемым по данным откачек и графикам срезок. Последние также строятся по результатам наблюдений за понижениями уровня в различных точках пласта под влиянием откачек из взаимодействующих скважин.

Кривая дебита представляет собой график зависимости дебита Q_0 от понижения уровня S_0 (рис. 15, а). Во многих случаях он может быть выражен двучленной зависимостью следующего вида:

$$S_0 = AQ_0 + BQ_0^2, \quad (11.2)$$

где A и B — параметры кривой дебита, определяемые по результатам откачек.

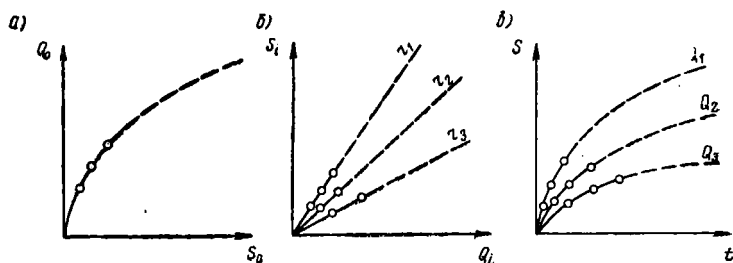


Рис. 15. Графики к расчету скважин по данным опытных откачек

а — кривые дебита; б — графики срезок; в — графики зависимости понижения уровня от времени

Наиболее просто это делается с помощью линейной анаморфозы зависимости (11.2), т. е. построения графика в координатах $\frac{S_0}{Q_0} - Q_0$. Если зависимость (11.2) отвечает фактическим данным, то последние в координатах $\frac{S_0}{Q_0} - Q_0$ укладываются на прямую линию, угловой коэффициент которой (тангенс угла наклона прямой к оси Q_0) равен B , а отрезок, отсекаемый на оси $\frac{S_0}{Q_0}$, дает значение коэффициента A .

Надо заметить, что хотя формула (11.2), как это показано В. М. Насбергом [14] и Н. К. Гириным [11], является наиболее обоснованной в теоретическом отношении, тем не менее практически часто лучшие результаты достигаются при использовании степенной зависимости

$$S_0 = pQ_0^q, \quad (11.3)$$

где p и q — параметры, определяемые также на основании откачек, причем q может изменяться от 1 до 2.

Для нахождения значений p и q результаты откачек представляются в виде графика в координатах $\lg S_0$ и $\lg Q_0$. При этом если зависимость (11.3) выдерживается, то, по опытным данным, мы получаем прямую, угловой коэффициент которой равен параметру q , а отрезок, отсекаемый на оси $\lg S_0$, равен $\lg p$.

Располагая параметрами A и B или p и q , можно принять определенную величину расхода скважины Q_{op} (или понижения S_{op}) и определить соответствующее проектное понижение S_{op} (или расход Q_{op}).

Для определения понижений уровня S_i должны быть по фактическим данным откачек построены графики срезок, т. е. зависимости

$$S_i = f(Q_i, r_i), \quad (11.4)$$

где Q_i — расход i -й скважины, отстоящей на расстоянии r_i от точки, в которой наблюдается понижение уровня S_i .

В большинстве случаев зависимости (11.4) могут быть представлены сериями прямых линий, выходящих из начала координат (рис. 15, б); следовательно, для каждой точки пласта будем иметь

$$S_i = CQ_i, \quad (11.5)$$

где C — угловой коэффициент соответствующей прямой (при данном значении r).

При существенной неоднородности пласта целесообразно графики срезок строить по различным направлениям. Это дает возможность, например, в скальных породах выявить влияние определенным образом ориентированной трещиноватости, тектонических разломов и т. д.

По указанным графикам, так же как по кривым дебита, можно, задаваясь расходом Q_{ip} , определить величину понижения S_{ip} .

В пластах с постоянно действующими источниками восполнения запасов подземных вод — вблизи крупных рек, водохранилищ, при наличии гидравлической связи с другими водообильными пластами и т. д. — фильтрация, как уже отмечалось нами при рассмотрении аналитических методов расчета, приобретает с течением времени установившийся характер. По-

следний член в уравнении (11.1) при этом можно принять равным нулю. Указанная методика расчета в этом случае по существу аналогична широко известному методу срезок, предложенному в свое время М. Е. Альтовским [2] и А. М. Агаджановым [1].

Следует подчеркнуть, что, поскольку эта методика сводится к наложению фильтрационных течений, она является теоретически вполне обоснованной. Учитывая это обстоятельство, можно при отсутствии фактических данных о взаимном влиянии некоторых скважин исчислять величины S_i по имеющимся теоретическим решениям.

Вопрос о допустимой экстраполяции опытных данных по кривым дебита и графикам срезок решается в зависимости от конкретных гидрогеологических условий, конструкции скважин, технических средств откачки и других факторов. Нередко принимаемые на практике пределы экстраполяции $1,5-3 S_\phi$ (S_ϕ — понижение уровня, фактически достигнутое при откачках) могут быть расширены, и расчеты будут вполне оправданными при более значительном превышении прогнозируемых понижений уровня над фактическими.

При неустановившемся движении существенное значение приобретает величина $\Delta S(t)$, входящая в уравнение (11.1). Для нахождения этой величины используются данные откачек, выполняемых при неустановившемся режиме (рис. 15, в).

По этим данным можно построить графики

$$S = f_1(Q_i, t), \quad (11.6)$$

где S — понижение уровня, происходящее при постоянной величине расхода Q_i ;

t — время.

Задаваясь дебитом скважин и определенным сроком их эксплуатации, можно по указанным графикам определить расчетную величину $\Delta S(t)$.

Поскольку длительность опытных и опытно-эксплуатационных откачек, на основании которых строится зависимость (11.6), обычно гораздо меньше эксплуатационного периода, при определении $\Delta S(t)$ весьма важное значение приобретает теоретическая интерпретация фактических графиков понижения уровня во времени и выражение их в аналитической форме, максимально соответствующей природным условиям.

Например, для рассмотренных выше типов неограниченного и полугограниченного пластов можно пользоваться следующими приближенными формулами для оценки величины $\Delta S(t)$.

Неограниченный пласт

$$\Delta S(t) \approx \frac{Q_{\text{р.сум}}}{4\pi (km)_{\text{ср}}} \ln \frac{t_{\text{р.ср}}}{t_{0.\text{ср}}}. \quad (11.7)$$

Полуограниченный пласт с одним прямолинейным непроницаемым контуром (схема I6)

$$\Delta S(t) \approx \frac{Q_{p.сум}}{2\pi (km)_{cp}} \ln \frac{t_{p.ср}}{t_{o.ср}}. \quad (11.8)$$

Пласт с двумя взаимно-пересекающимися прямолинейными непроницаемыми контурами (схема IIв)

$$\Delta S(t) \approx \frac{Q_{p.сум}}{\pi (km)_{cp}} \ln \frac{t_{p.ср}}{t_{o.ср}}. \quad (11.9)$$

В указанных формулах

$Q_{p.сум}$ — проектируемый суммарный расход всех скважин (водозаборов);

$t_{p.ср}$ — средний расчетный период эксплуатации;

$t_{o.ср}$ — средняя продолжительность опытных и опытно-эксплуатационных откачек;

$(km)_{cp}$ — средняя проводимость пласта. Значение ее может быть исчислено как среднее арифметическое или средневзвешенное по площадям различных участков расположения скважин

$$(km)_{cp} \approx \frac{(km)_1 + (km)_2 + \dots + (km)_k}{k} \quad (11.10)$$

или

$$(km)_{cp} \approx \frac{(km)_1 F_1 + (km)_2 F_2 + \dots + (km)_k F_k}{F_1 + F_2 + \dots + F_k}, \quad (11.11)$$

где $F_1, F_2, \dots, F_k$ — площади участков расположения скважин (k — число участков).

Величины $t_{p.ср}$ и $t_{o.ср}$ приближенно определяются из следующих выражений:

$$\ln t_{p.ср} = \frac{Q_{1p} \ln t_{1p} + Q_{2p} \ln t_{2p} + \dots + Q_{kp} \ln t_{kp}}{Q_{p.сум}}, \quad (11.12)$$

$$\ln t_{o.ср} = \frac{Q_{1p} \ln t_1 + Q_{2p} \ln t_2 + \dots + Q_{kp} \ln t_k}{Q_{p.сум}}. \quad (11.13)$$

Здесь $Q_{1p}, Q_{2p}, \dots, Q_{kp}$ — как и прежде, расчетный (проектируемый) расход скважин на периоды времени $t_{1p}, t_{2p}, \dots, t_{kp}$;

$t_1, t_2, \dots, t_k$ — продолжительность откачек из соответствующих скважин.

Приведенные выражения для $\Delta S(t)$ основаны на аналитических решениях для соответствующих типов водоносных пластов. Они получаются при осреднении расчетных параметров km и Q в пределах площади размещения скважин. Для примера рассмотрим схему безграничного пласта. По истечении длительного времени здесь, согласно (3.3) и (3.3'), понижение уровня в ка-

кой-либо скважине при эксплуатации группы из k скважин определяется по следующему уравнению:

$$S = \frac{Q_{0p}}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_{0p}}{r_0^2} + \frac{Q_{1p}}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_{1p}}{r_1^2} + \dots + \frac{Q_{kp}}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_{kp}}{r_k^2}. \quad (11.14)$$

Здесь $t_{0p}, t_{1p}, \dots, t_{kp}$ — проектируемая длительность эксплуатации каждой скважины.

Допустим, что до пуска в эксплуатацию каждая из этих скважин в разное время опробовалась опытными откачками с расходами $Q_0, Q_1, \dots, Q_k$ длительностью $t_0, t_1, \dots, t_k$ и при этом фиксировались понижения уровня не только в самой скважине, из которой производилась откачка (радиус этой скважины r_0), но также в точках расположения всех остальных скважин, отстоящих от данной скважины на расстояниях $r_1, r_2, \dots, r_k$.

По тем же формулам (3.3) и (3.3') понижение уровня в точке расположения данной скважины к концу откачек из всех взаимодействующих скважин может быть выражено так:

$$\left. \begin{aligned} S_0^0 &= \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_0}{r_0^2}; \\ S_1^0 &= \frac{Q_1}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_1}{r_1^2}; \\ &\dots \dots \dots \\ S_k^0 &= \frac{Q_k}{4\pi km} \ln \frac{2,25at_k}{r_k^2}, \end{aligned} \right\} \quad (11.15)$$

где $S_0^0, S_1^0, \dots, S_k^0$ — понижения уровня, вызванные откачкой из скважин 0, 1, ..., k .

Найдем из (11.15) члены $\ln \frac{2,25a}{r_0^2}, \ln \frac{2,25a}{r_1^2}, \dots, \ln \frac{2,25a}{r_k^2}$ и подставим их в уравнение (11.14). В результате получим

$$S = \frac{Q_{0p}}{Q_0} S_0^0 + \frac{Q_{1p}}{Q_1} S_1^0 + \dots + \frac{Q_{kp}}{Q_k} S_k^0 + \frac{Q_{p.сум}}{4\pi km} \ln \frac{t_{p.ср}}{t_{o.ср}}. \quad (11.16)$$

Здесь первые члены, не зависящие от времени, представляют собой понижения уровня, которые имели бы место в данной скважине S_{0p} под влиянием откачки из нее с расходом Q_{0p} и всех взаимодействующих скважин S_{ip} с расходами Q_{ip} к концу опытных откачек из этих скважин. Они находятся по кривым дебита и графикам срезов, составляемым по фактическим данным откачек.

Величины $t_{p.c.p}$ и $t_{o.c.p}$ в уравнении (11.16) определяются по формулам (11.12) и (11.13). При этом, как уже указывалось, приближенно принимается средняя величина проводимости и пьезопроводности пласта.

Из приведенных формул видно, что в неограниченных и полугораниченных пластах (с непроницаемым контуром) снижение уровня в процессе длительных откачек из скважин происходит по логарифмическому закону и с течением времени скорость снижения уровня заметно уменьшается.

В пластах, ограниченных двумя параллельными непроницаемыми контурами (пласты-полосы), величина $\Delta S(t)$ пропорциональна корню квадратному из времени t . Наконец, в совершенно закрытых пластах, при отсутствии подтока воды извне, зависимость $\Delta S(t)$ от времени будет линейной и скорость снижения уровня постоянной.

12. ИСХОДНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА

Для расчета производительности обобщенных систем взаимодействия скважин и понижения уровня в них должны быть приняты определенные значения первоначального (до начала откачки) напора H_e и глубины воды до водоупора h_e , мощности пласта m , коэффициента фильтрации k и коэффициента пьезопроводности a в соответствии с имеющимися материалами гидрогеологических изысканий по рассматриваемому району.

Коэффициент фильтрации следует определять по результатам опытных откачек. Если откачки производятся в условиях установившегося движения, коэффициент фильтрации вычисляется по формуле Дюпюи с поправкой на несовершенство скважин, вытекающей из решения Маскета.

По одной опытной (центральной) скважине, из которой производится откачка [24]:

$$k = \frac{Q \left(\ln \frac{R}{r_c} + \zeta_n \right)}{2\pi m S_0}. \quad (12.1)$$

По опытной и наблюдательной скважинам

$$k = \frac{Q \left(\ln \frac{r_n}{r_c} + \zeta_n \right)}{2\pi m (S_0 - S_n)}. \quad (12.2)$$

По двум наблюдательным скважинам

$$k = \frac{Q \ln \frac{r_{n2}}{r_{n1}}}{2\pi m (S_{n1} - S_{n2})}. \quad (12.3)$$

В формулах (12.1) — (12.3) обозначения следующие:

Q — расход скважины;
 S_0, S_n, S_{n1}, S_{n2} — понижения уровня соответственно в опытной и наблюдательных скважинах (индексами $n1, n2$ обозначены номера наблюдательных скважин);
 r_c — радиус опытной скважины;
 r_n, r_{n1}, r_{n2} — расстояния от опытной до наблюдательных скважин;
 R — радиус влияния скважины (обычно определяется весьма приближенно; для ориентировочных расчетов можно принимать его равным 500—1000 м);
 ζ_n — поправка на несовершенство скважины, зависящая от $\frac{l}{m}, \frac{m}{r_c}$, где l — длина водоприемной части скважины (значение ζ_n определяется по указаниям, данным в разделе 10 с использованием графика, представленного на рис. 14).

При откачке в условиях неустановившегося движения коэффициент фильтрации может быть определен по следующей зависимости:

$$k = \frac{Q \ln \frac{t_2}{t_1}}{4\pi m (S_{t2} - S_{t1})}, \quad (12.4)$$

где S_{t1} и S_{t2} — понижения уровня в опытной скважине в моменты времени t_1 и t_2 .

При значительной длительности откачки формулой (12.4) можно пользоваться для определения коэффициента фильтрации также по понижениям уровня в ближайших наблюдательных скважинах.

Формулы (12.1) — (12.4) записаны для напорных пластов. Для расчета коэффициента фильтрации в безнапорных пластах в этих формулах следует заменить мощность m на величину m_c , по выражению

$$m_c = h_e - S_{cp}, \quad (12.5)$$

где h_e — средняя первоначальная глубина воды до водоупора на участке размещения опытной и наблюдательных скважин;

S_{cp} — среднее понижение уровня при откачке на этом же участке: при определении k по одной опытной скважине $S_{cp} = \frac{S_0}{2}$, по опытной и наблюдательной —

$$S_{cp} = \frac{S_0 + S_n}{2} \text{ и по двум наблюдательным скважинам } S_{cp} = \frac{S_{n1} + S_{n2}}{2}.$$

Наибольшие трудности возникают при определении коэффициента пьезопроводности, характеризующего емкость пласта и скорость перераспределения в нем напоров в процессе неустановившейся фильтрации.

Коэффициент пьезопроводности выражается следующим образом.

Для безнапорных пластов¹

$$a = \frac{kh_{\text{ср}}}{\mu}, \quad (12.6)$$

где k — коэффициент фильтрации;

$h_{\text{ср}}$ — средняя мощность пласта;

μ — коэффициент водоотдачи.

$$\mu = W_{\text{Н}} - W_{\text{М}}, \quad (12.7)$$

где $W_{\text{Н}}$ — объемная влажность грунта при полном насыщении;

$W_{\text{М}}$ — объемная влажность грунта, соответствующая содержанию связанной и «стыковой» воды.

Коэффициент пьезопроводности для безнапорных вод при мощности пласта $h_{\text{ср}} = 15 \div 20$ м можно принимать: для мелкозернистых песков 250—500 м²/сутки и для крупнозернистых гравелистых песков 2000—4000 м²/сутки.

Для напорных пластов коэффициент пьезопроводности можно формально представить в таком же виде, как и для безнапорных

$$a = \frac{km}{\mu^*}. \quad (12.8)$$

Здесь k — коэффициент фильтрации;

m — мощность пласта;

μ^* — некоторый коэффициент, также характеризующий отдачу воды из пласта, которую принято объяснять упругими свойствами самой воды и водоносных пород:

$$\mu^* = \gamma\beta^*m, \quad (12.9)$$

где γ — вес единицы объема воды;

β^* — коэффициент упругоемкости [30, 31].

Величина коэффициента пьезопроводности a для напорных потоков пресных негазированных подземных вод, заключенных в хорошо водопроницаемых плотных (скальных и полускальных) породах, составляет 10⁵—10⁶ м²/сутки. В слабо водопроницаемых мелкозернистых (рыхлых) породах она может колебаться в значительных пределах: от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^4$ м²/сутки (где $n = 1 \div 10$).

Наиболее надежно коэффициент пьезопроводности определяется по данным опытных откачек из скважин.

¹ Для безнапорных пластов его принято называть также коэффициентом уровнепроводности [27].

Располагая данными о понижениях уровня S_{t1} и S_{t2} на моменты времени t_1 и t_2 в точке, отстоящей от опорной скважины на расстоянии r , в процессе откачки с постоянным расходом Q можно в соответствии с формулой (3.3) (см. раздел 3) найти значение a по соотношению [7]

$$\frac{S_{t1}}{S_{t2}} = \frac{Ei\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right)}{Ei\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right)}. \quad (12.10)$$

Поскольку здесь все величины, кроме a , известны, последняя определяется путем несложного подбора.

По прошествии более или менее значительного времени, когда $\frac{r^2}{4at} < 0,1$, можно в качестве исходной пользоваться формулой (3.3'). При этом для более полного учета всех фактических наблюдений при откачке целесообразно применять графо-аналитический способ определения коэффициента пьезопроводности, основанный на представлении формулы (3.3') в виде прямой зависимости от $\ln t^*$

$$S_t = M + N \ln t, \quad (12.11)$$

где

$$M = N \ln \frac{2,25a}{r^2}, \quad N = \frac{Q}{4\pi km}. \quad (12.12)$$

Из графиков фактических наблюдений, построенных в координатах $S_t - \ln t$, коэффициенты M и N определяются как начальная ордината прямой (M) и ее угловой коэффициент (N).

При известных M и N имеем

$$a = 0,44 r^2 e^{\frac{M}{N}} \quad \text{или} \quad a = 0,44 \frac{r^2}{t} e^{\frac{S_t}{N}}. \quad (12.13)$$

Формулы (12.10) — (12.13) действительны для напорных пластов. При откачке в безнапорных пластах для определения коэффициента пьезопроводности следует в этих формулах заметить величины S_{t1} , S_{t2} , S_t соответственно на

$$(2h_e - S_{t1}) S_{t1}, \quad (2h_e - S_{t2}) S_{t2}, \quad (2h_e - S_t) S_t. \quad (12.14)$$

Необходимо учитывать, что при определении коэффициента пьезопроводности по понижениям уровня непосредственно в опытной скважине, т. е. при $r=r_c$, большие искажения вносятся из-за неучета потерь напора воды в фильтре и стволе скважины, а также изменений водопроницаемости призабойной зоны, обус-

* Это уравнение для прогноза производительности водозаборов предложил Н. Н. Веригин в 1950 г.

ловливаемых уплотнением пород при бурении или, напротив, — разуплотнением в процессе откачки.

Поэтому надежнее определять коэффициент пьезопроводности по наблюдательным скважинам, используя, в зависимости от длительности откачки, формулы (12.10) или (12.13).

13. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. В безнапорном потоке весьма больших размеров в плане мощностью $h_e=15$ м закладывается водозабор из 10 скважин, располагающихся линейно (рис. 16).

Расход каждой скважины $Q=7$ л/сек = 605 м³/сутки, общий расход всей системы $Q_{\text{сум}}=7 \cdot 10=70$ л/сек=6050 м³/сутки. Расстояния между скважинами $2\sigma=80$ м, общая длина ряда $2l=2n\sigma=10 \cdot 80=800$ м. Коэффициент фильтрации водоносного пласта $k=30$ м/сутки, коэффициент водоотдачи $\mu=0,22$.

Требуется определить понижение уровня грунтовых вод S_0 в центре ряда (на рисунке точка 1) и S_1 — на расстоянии 200 м (точка 2) в моменты времени $t_1=100$ суток, $t_2=300$ суток и $t_3=10\,000$ суток.

Решение

Для расчета пользуемся формулами (2.3) и (2.4) и для определения гидравлического сопротивления — графиком, данным на рис. 2.

1) Определяем коэффициент пьезопроводности по формуле (12.6)

$$a \approx \frac{30 \cdot 15}{0,22} = 2220 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

2) Безразмерные параметры при этом будут

$$\alpha_1 = \frac{2220 \cdot 100}{400^2} = 1,38; \quad \alpha_2 = \frac{2220 \cdot 300}{400^2} = 4,17;$$

$$\alpha_3 = \frac{2220 \cdot 10\,000}{400^2} = 138,7; \quad \bar{y}_1 = 0 \text{ и } \bar{y}_2 = \frac{200}{400} = 0,5.$$

3) Для первого момента времени ($t_1=100$ суток, $\alpha_1=1,38$, $\ln \alpha_1=0,32$) и точки 1 в центре ряда из графика находим $R_L=3,2$.

4) По формуле (2.4)

$$U_{01} = \frac{6050}{12,56 \cdot 30} \cdot 3,2 = 51,4 \text{ м}^2,$$

откуда согласно формуле (2.3)

$$S_{01} = 15 - \sqrt{15^2 - 2 \cdot 51,4} = 4,95 \text{ м}.$$

5) Таким путем сделаны расчеты для других значений t (и соответственно α) для точек 1 и 2. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3

$\bar{y}$	t	α	$\ln \alpha$	R_L по графику на рис. 2	U по формуле (2.4)	S по формуле (2.3)
0	100	1,38	0,32	3,2	51,4	4,95
	300	4,17	1,43	4,27	68,4	6,61
	10 000	138,7	2,62	5,44	87,2	7,89
0,5	100	1,38	0,32	1,94	31,2	2,27
	300	4,17	1,43	2,94	47,2	3,54
	10 000	138,7	2,62	4,13	66,3	4,88

6) Определяем понижение уровня непосредственно в скважине в последний момент времени $t_3=10\,000$ суток. Скважина совершенная ($\zeta=0$), радиус ее $r_c=0,15$ м. По формуле (10.1) имеем

$$R_{\text{скв}} = 2 \frac{605}{6050} \ln \frac{40}{3,14 \cdot 0,15} = 0,97.$$

7) По формуле (2.5) при этом

$$R_{\text{п}} = 5,44 + 0,97 = 6,41.$$

8) Следовательно, по (2.4)

$$U_{03} = \frac{6050}{12,56 \cdot 30} 6,41 = 103 \text{ м}^2$$

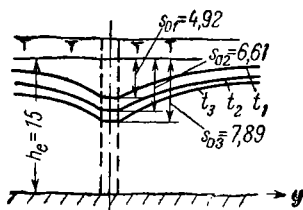
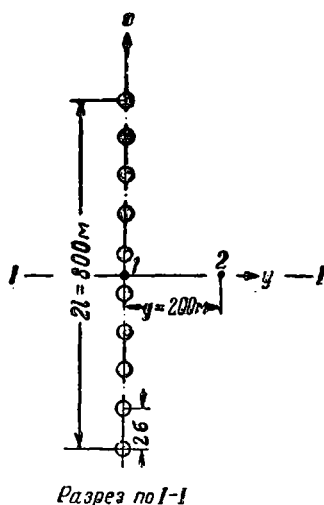


Рис. 16. Схема к примеру № 1.

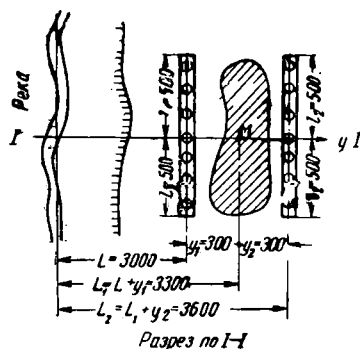


Рис. 17. Схема к примеру № 2

1 — уровень грунтовых вод; 2 — статический уровень до откачки; 3 — динамический уровень во время откачки

и по формуле (2.3)

$$S_{03} = 15 - \sqrt{15^2 - 2 \cdot 103} = 10,64 \text{ м.}$$

Пример 2. Карьер площадью $F=1000 \cdot 500=5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ (рис. 17) располагается на расстоянии $L=3300$ м от реки в водоносных известняках. Мощность известняков $m=20$ м. Напор над кровлей их около 40 м. Коэффициент фильтрации известняков $k=30$ м/сутки, коэффициент пьезопроводности $a=10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}$.

Для ограждения карьера от подземных вод на период эксплуатации намечено устройство дренажной галереи. Дебит галереи в условиях установившегося движения $Q=55\,600 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Эта величина может быть получена, например, по формуле Форхгеймера. Действительно, представляя защищаемый участок в виде большого колодца радиусом

$$R_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^5}{3,14}} = 398 \approx 400 \text{ м,}$$

при S около 40 м будем иметь

$$Q_3 = \frac{2\pi k m S}{\ln \frac{2L}{R_0}} = \frac{6,28 \cdot 30 \cdot 20 \cdot 40}{\ln \frac{2 \cdot 3300}{400}} = 55\,600 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Вскрытие карьера предполагается осуществить за время $t = 300$ суток. К концу этого периода в центре карьера (точка M на рисунке) уровень подземных вод в известняках должен быть снижен на величину S около 40 м.

Водопонижение на период вскрытия карьера будет производиться двумя рядами скважин, располагающимися вдоль длинных сторон месторождения.

Длина каждого ряда $2l_1 = 2l_2 = 1000$ м.

Требуется определить необходимый расход этих рядов скважин $Q_{\text{сум}}$.

Решение.

Для расчета применяем формулы (2.1) и (9.2).

1) В данном случае

$$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{300}{500} = 0,6; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \frac{10^5 t}{500^2}; \quad \rho_1 = 6300 \text{ м};$$

$$\rho_2 = 6900 \text{ м}.$$

2) Допустим, что суммарный расход будет распределен поровну в обоих рядах, т. е.

$$Q_1 = Q_2; \quad Q_1 + Q_2 = Q_{\text{сум}}; \quad \beta_1 = \beta_2 = \frac{Q_{1,2}}{Q_{\text{сум}}} = 0,5.$$

3) Тогда при $t = 300$ суток по формуле (9.2) получим

$$R_d = 0,5(2 \cdot 6,08 - 0,82 - 0,7) = 5,32.$$

4) По формуле (2.1) с учетом (2.2) при этом получим

$$Q_{\text{сум}} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 20 \cdot 40}{5,32} = 56\,600 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

В табл. 4, кроме этого, приведены аналогичные расчеты для $t = 50, 100$ и 200 суток.

Т а б л и ц а 4

t в сут-ках	α	$\ln \alpha$	R_d по графику на рис. 2	$Ei\left(-\frac{\rho_1^2}{4at}\right)$	$Ei\left(-\frac{\rho_2^2}{4at}\right)$	$\frac{2R_d + (5) + (6)}{2}$	$Q_{\text{сум}}$ по фор- муле (2.1) в $\text{м}^3/\text{сутки}$	$\Delta Q = Q_{\text{сум}} - Q_3$ в $\text{м}^3/\text{сутки}$
50	20	3	4,34	-0,05	-0,03	4,30	70 000	14 400
100	40	3,71	5,04	-0,2	-0,16	4,86	62 000	6 400
200	80	4,39	5,66	-0,55	-0,45	5,16	58 200	2 600
300	120	4,79	6,08	-0,82	-0,7	5,32	56 600	1 000

В последнем столбце даны величины дополнительного расхода ΔQ на период вскрытия карьера (сверх расхода дренажной галереи в эксплуатационных условиях). При сроке откачки 50 суток общий расход нужно довести до $70 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Но если принять общую продолжительность откачки в 100—150 суток, расход составит только $58 \div 60 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сутки}$, причем дальнейшее его уменьшение происходит уже очень медленно. Следовательно, скважины целесообразно ввести в действие не с самого начала строительных работ по вскрытию карьера, а по истечении 100—150 суток.

Пример. 3. Водозаборные скважины в безнапорном пласте известняков, имеющем весьма большие размеры в плане, располагаются в виде концентрированной группы на площади $F_1=30\,500\text{ м}^2$ (рис. 18). Общее количество скважин в группе $n_1=8$, расстояние между скважинами $2\sigma_1=50\text{ м}$.

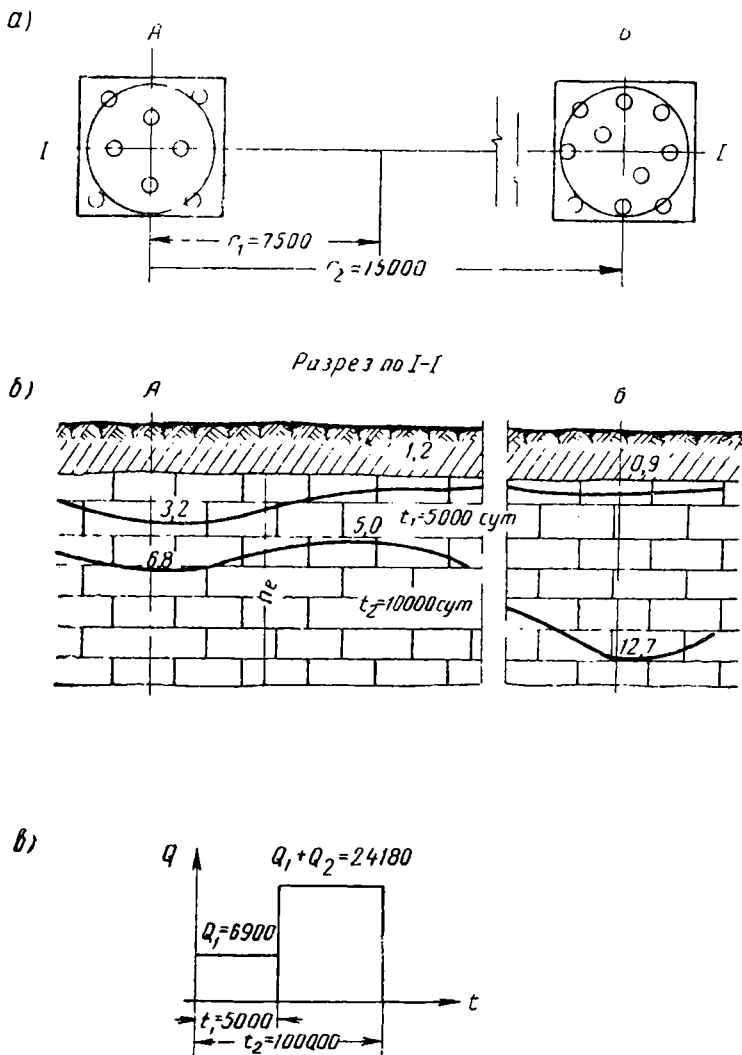


Рис. 18. Схема к примеру № 3

а — план расположения скважин; б — геологический разрез; в — график изменения расхода

Расход каждой скважины $Q_1=10\text{ л/сек}=864\text{ м}^3/\text{сутки}$. Суммарный расход всех скважин $Q_{\text{сум}}=n_1Q_1=8\cdot 864=6912\approx 6900\text{ м}^3/\text{сутки}$. Мощность водоносного пласта $h_e=60\text{ м}$, коэффициент фильтрации $k=30\text{ м/сутки}$, коэффициент пьезопроводности, определенный по опытным откачкам, $a=3,5\cdot 10^5\text{ м}^2/\text{сутки}$.

Указанная группа скважин эксплуатируется в течение $t_1=5000$ суток (около 15 лет). По истечении этого времени в расстоянии $r_2=15\,000$ м в том же водоносном пласте сооружен второй групповой водозабор на такой же площади $F_2=30\,500$ м² из $n_2=10$ скважин с расходом каждой скважины $Q_2=20$ л/сек $=1728$ м³/сутки и общим расходом $Q_{\text{сум}2}=n_2Q_2=10 \cdot 1728=17\,280$ м³/сутки. Расстояния между скважинами здесь $2s_2=40$ м.

Требуется определить величину понижения уровня в центре первой группы через $t_1=5000$ суток и понижения в центрах обеих групп через $t_2=10\,000$ суток.

Решение

Для решения этой задачи используем основную формулу (2.4) с учетом (2.3).

1) Представим действительную площадь, занимаемую каждой группой скважин, в виде круговой с радиусом по (6.1)

$$R_0 = \frac{700}{2 \cdot 3,14} = 112 \text{ м.}$$

2) Находим гидравлическое сопротивление

$$\alpha_1 = \frac{3,5 \cdot 10^5 \cdot 5000}{112^2} = 13,9 \cdot 10^4.$$

По формуле (6.8) при этом получаем

$$R_{\text{пл}} \approx \ln 6,12 \cdot 13,9 \cdot 10^4 = 13,31.$$

3) Следовательно, по (2.4)

$$U_1 = \frac{6900}{12,56 \cdot 30} 13,31 = 243,8 \text{ м}^2$$

и по (2.3)

$$S_1 = 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 243,8} = 3,2 \text{ м.}$$

4) При взаимодействии обеих групп находим сначала гидравлическое сопротивление по формуле (9.6) с учетом последующих указаний по методике расчета водозаборов при одновременном их включении [см. формулу (9.9)].

Применительно к рассматриваемой в этом примере схеме расчетная зависимость будет иметь вид (см. график $Q-t$ на рис. 18):

а) для определения понижения через $t_2=10\,000$ суток в центре первой группы

$$R_{\text{пл}1} = \beta_1 \ln 6,12 \alpha_2 - \beta_2 E i \left[-\frac{r^2}{4a(t_2-t_1)} \right],$$

где

$$\alpha_2 = \frac{at}{R_{01}^2}; \quad \beta_1 = \frac{Q_{\text{сум}1}}{Q_{\text{сум}}}; \quad \beta_2 = \frac{Q_{\text{сум}2}}{Q_{\text{сум}}};$$

б) для определения понижения к тому же моменту времени в центре второй группы

$$R_{\text{пл}2} = \beta_2 \ln 6,12 \alpha_{2-1} - \beta_1 E i \left(-\frac{r^2}{4at_2} \right),$$

где

$$\alpha_{2-1} = \frac{a(t_2-t_1)}{R_{02}^2}.$$

Остальные обозначения те же, что прежде.

Подставим численные значения в указанные формулы

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{3,5 \cdot 10^5 \cdot 10^4}{112^2} = 27,8 \cdot 10^4; \\ \alpha_{2-1} &= \frac{3,5 \cdot 10^5 (10^4 - 5 \cdot 10^3)}{112^2} = 13,9 \cdot 10^4; \\ \beta_1 &= \frac{6900}{24 \cdot 180} = 0,286; \quad \beta_2 = \frac{17 \cdot 280}{24 \cdot 180} = 0,714; \\ R_{пл1} &= 0,286 \ln 6,12 \cdot 27,8 \cdot 10^4 - 0,714 \times \\ &\times Ei \left[-\frac{225 \cdot 10^6}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 (10^4 - 5 \cdot 10^3)} \right] = 6. \\ R_{пл2} &= 0,714 \ln 6,12 \cdot 13,9 \cdot 10^4 - 0,296 \times \\ &\times Ei \left(-\frac{225 \cdot 10^6}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 10^4} \right) = 10,55. \end{aligned}$$

5) Теперь по формулам (2.4) и (2.3) находим U и S

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{24 \cdot 180}{12,56 \cdot 30} 6 = 385 \text{ м}^2; \\ S_1 &= 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 385} = 6,8 \text{ м.} \\ U_2 &= \frac{24 \cdot 180}{12,56 \cdot 30} \cdot 10,55 = 676 \text{ м}^2; \\ S_2 &= 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 676} = 12,7 \text{ м.} \end{aligned}$$

6) Определим понижение уровня в точках $r_1=7500$ м и $r_2=15000$ м (в центре второй группы) за счет откачки из первой группы с расходом $6900 \text{ м}^3/\text{сутки}$ при $t_1=5000$ суток.

Учитывая, что в обоих случаях $\frac{r_{1,2}}{R_{0,1}} \gg 1,5$, можно определять влияние откачки из группы скважин по формуле (3.3). При этом будем иметь:

$$\begin{aligned} U_{1ц} &= -\frac{6900}{12,56 \cdot 30} Ei \left(-\frac{7500^2}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^3} \right) = 77,1 \text{ м}^2; \\ S_{1ц} &= 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 77,1} = 1,2 \text{ м}; \\ U_{2ц} &= -\frac{6900}{12,56 \cdot 30} Ei \left(-\frac{15000^2}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^3} \right) = 53 \text{ м}^2; \\ S_{2ц} &= 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 53} = 0,9 \text{ м.} \end{aligned}$$

7) Понижение в точке $r_1=7500$ м под влиянием откачки из обеих групп скважин к концу периода $t_2=10000$ суток определяется аналогично. Гидравлическое сопротивление при этом

$$\begin{aligned} R_{пл} &= -\beta_1 Ei \left[-\frac{r_1^2}{4at_2} \right] - \beta_2 Ei \left[-\frac{r_1^2}{4a(t_2-t_1)} \right] = \\ &= -0,286 Ei \left(\frac{7500^2}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 10^4} \right) - 0,714 Ei \left(-\frac{7500^2}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^3} \right) = 4,4. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$U = \frac{24 \cdot 180}{12,56 \cdot 30} 4,4 = 282 \text{ м}^2$$

и

$$S = 60 - \sqrt{60^2 - 2 \cdot 282} = 5 \text{ м.}$$

Найденные понижения уровня показаны на рис. 18

Пример 4.

В напорном водоносном пласте известняков весьма большой площади распространения намечено устройство водозабора с дебитом $Q_1 = 24\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$. По результатам гидрогеологических изысканий участок для размещения водозабора выбран в 12 км от существующего городского водозабора (рис. 19), производительностью $Q_2 = 13\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$, пущенного в эксплуата-

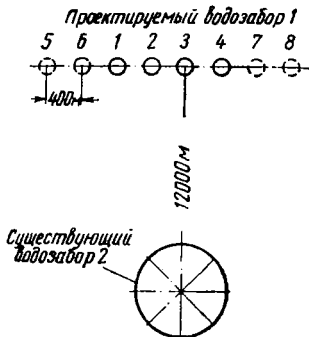


Рис. 19. Схема к примеру № 4

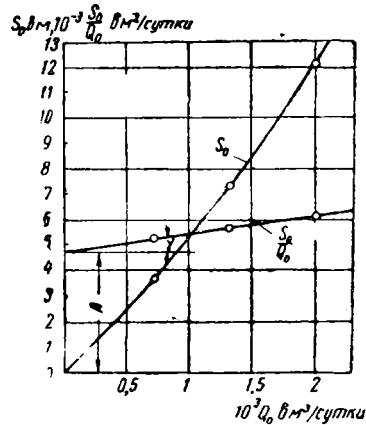


Рис. 20. Кривая дебита S_0-Q_0 и график $\frac{S_0}{Q_0}-Q_0$ к примеру № 4

цию около 12 лет назад. На этом участке пробурены 4 разведочно-эксплуатационных скважины и каждая из них опробована откачками. Результаты откачек из разведочно-эксплуатационных скважин и данные наблюдений за действующим городским водозабором приведены в табл. 5.

Таблица 5

Водозаборы	№ скважины	Длительность откачки t в сутках	Дебит Q в $\text{м}^3/\text{сутки}$	Понижения уровня к концу откачек в скважинах водозаборов 1 и 2 в м				
				водозабор 1				водозабор 2
				1	2	3	4	
Проектируемый водозабор 1	1	5	900	4,3	1,5	0,5	0,35	0,4
	2	4	1100	4,6	4,7	1,8	0,6	—
	3	15	700	0,5	1,1	3,7	1	—
		20	1300	1,1	2,4	7,3	2,1	0,1
		22	2000	1,6	3,5	12,2	3,8	0,3
Действующий водозабор 2	4	3	1300	0,6	0,8	2	5,2	—
		1500	8300	—	—	2,7	1	10,6
		2700	13000	—	—	1	—	19,2

Мощность водоносных известняков изменяется от 40 до 50 м. Сверху и снизу известняки перекрыты мощной толщей глин. Высота напора подземных вод над кровлей известняков 60—65 м.

Требуется определить возможность эксплуатации намеченного водозабора в течение 25 лет ($t_p=9100$ суток) при условии, что в момент пуска данного водозабора будет также увеличена производительность городского водозабора до $Q_2=22\,000$ м³/сутки, т. е. современный водозабор из него возрастет на 9000 м³/сутки.

Максимально допустимое понижение пьезометрического уровня принимается $S_{\text{доп}} \approx 65$ м (до кровли водоносных известняков).

Решение

Учитывая фильтрационную неоднородность известняков, для расчета применяем эмпирический метод.

1) Судя по результатам пробно-эксплуатационных откачек из скважин на участке проектируемого водозабора, дебит одной скважины может быть доведен до 3000 м³/сутки (около 35 л/сек). Следовательно, всего должно быть 8 скважин. Условно принимается схема линейного водозабора с расстоянием между скважинами 400 м.

2) Наиболее нагруженной является скважина № 3. Определяем для нее величину понижения S_0 по уравнению (11.1).

Для определения S_0 используем зависимость (11.2). По фактическим данным откачек из скважины № 3 строим график $\frac{S_0}{Q_0} - Q_0$ (рис. 20). Непосредственно из графика находят параметры кривой дебита: $A=4,75 \cdot 10^{-3}$, $B=\text{tg } \gamma=7,25 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом

$$S_0 = 4,75 \cdot 10^{-3} Q_0 + 7,25 \cdot 10^{-7} \cdot Q_0^2 \text{ м}$$

или при $Q_0=3000$ м³/сутки.

$$S_0 = 4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 + 7,25 \cdot 10^{-7} \cdot 3000^2 = 20,8 \text{ м.}$$

Таблица 6

Водозабор	№ скважины	Проектируемый дебит $Q_i \cdot 10^3$ в м ³ /сутки	Расстояние данной скважины от скважины № 3 r_i в м	Понижения уровня в скважине № 3 S_i в м
Проектируемый водозабор 1	2	3	400	5
	4	3	400	5
	1	3	800	2,2
	7*	3	800	2,2
	5*	3	1200	1,6
	8*	3	1200	1,6
	6*	3	1600	1,2
Действующий водозабор 2	—	22	12 000	1,8
$\Sigma S_i=20,6$				

Примечание. Звездочками в таблице отмечены вновь намечаемые скважины, из которых не производилось откачек. Понижения уровня под действием этих скважин приняты по графикам срезок, причем условно принято, что эти понижения достигаются по истечении 4 суток.

3) Понижения уровня S_i под влиянием остальных взаимодействующих скважин проектируемого водозабора и городского водозабора определяются также по фактическим данным; графики срезов, построенные по этим данным, показаны на рис. 21.

Величины S_i и суммарное понижение ΣS_i приведены в табл. 6.

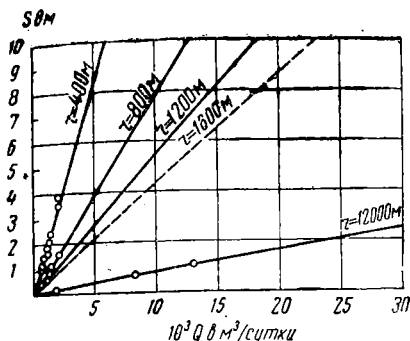


Рис. 21. Графики срезов к примеру № 4

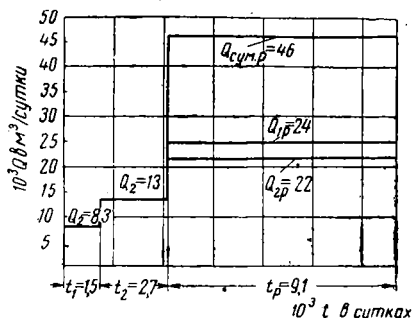


Рис. 22. График режима эксплуатации водозабора к примеру № 4

4) Теперь по формуле (11.7) определяем величину $\Delta S(t)$. Предварительно находим средние значения $t_{p.c.p}$ и $t_{o.c.p}$, для чего используем выражения (11.12) и (11.13).

Заметим, что в данном случае городской водозабор следует как бы расчленить на три водозабора согласно графику, данному на рис. 22. Расходы и время их действия следующие:

$$Q'_{2p} = 8300 \text{ м}^3/\text{сутки}; \quad t'_{1p} = t_p + t_{11,1} + t_{11,2} = 9100 + 1500 + 2700 = 13300 \text{ суток};$$

$$Q''_{2p} = 13300 - 8300 = 4700 \text{ м}^3/\text{сутки}; \quad t''_{1p} = t_p + t_{11,2} = 9100 + 2700 = 11800 \text{ суток};$$

$$Q'''_{2p} = 22000 - 13000 = 9000 \text{ м}^3/\text{сутки}; \quad t'''_{1p} = t_p = 9100 \text{ суток}.$$

Период эксплуатации для всех скважин проектируемого водозабора, как уже указывалось, принимается $t_p = 9100$ суток.

В соответствии с этим имеем: по выражению (11.12)

$$t_{p.c.p} = \frac{3000 \cdot 8 \ln 9100 + 8300 \ln 13300 + 4700 \ln 11800 + 9000 \ln 9100}{46000} = 9,2$$

и по выражению (11.13)

$$t_{o.c.p} = \frac{3000 (\ln 5 + \ln 4 + \ln 22 + \ln 3 + 4 \ln 4) + 22000 \left(\frac{8300}{13000} \ln 4200 + \frac{4700}{13000} \ln 2700 \right)}{46000} = 4,8.$$

Таким образом, по (11.7)

$$\Delta S(t) = \frac{46\,000}{12,56 \cdot 700} (9,2 - 4,8) = 23 \text{ м.}$$

Здесь принято среднеарифметическое значение проводимости, определенное по данным откачек из всех скважин проектируемого и городского водозабора $(km)_{\text{ср}} \approx 700 \text{ м}^2/\text{сутки}$.

5) Суммарное понижение

$$S_p = 20,8 + 20,6 + 23 = 64,4 \text{ м,}$$

что не выходит из пределов допустимого.

Точно так же, по имеющимся данным, производится расчет городского водозабора. Понижение уровня в нем к концу принятого расчетного периода времени $t_p = 9100$ суток при расходе $Q_{zp} = 22\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ составит 58 м.

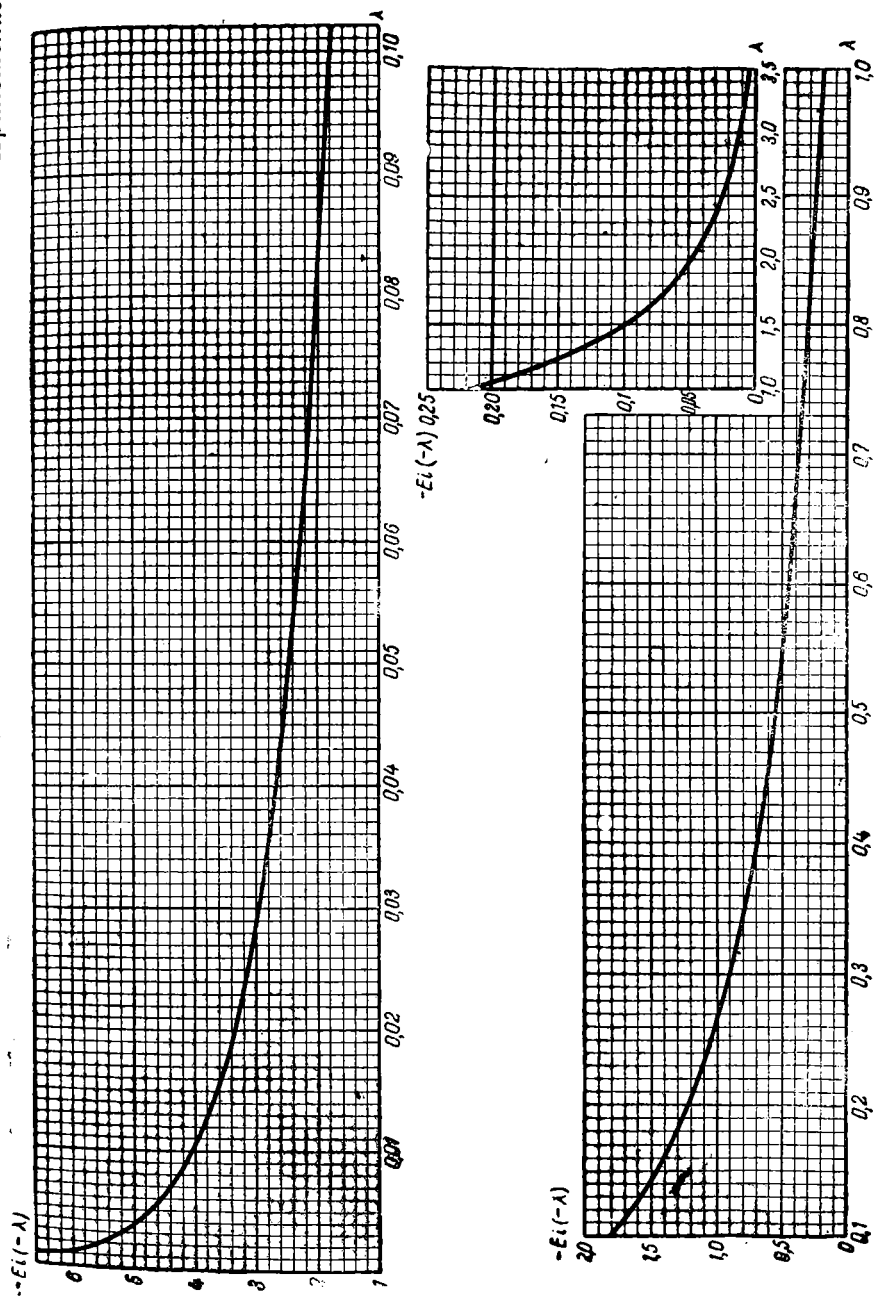


График интегральной показательной функции $Ei(-\lambda) = \int_{\lambda}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$

Приложение 2

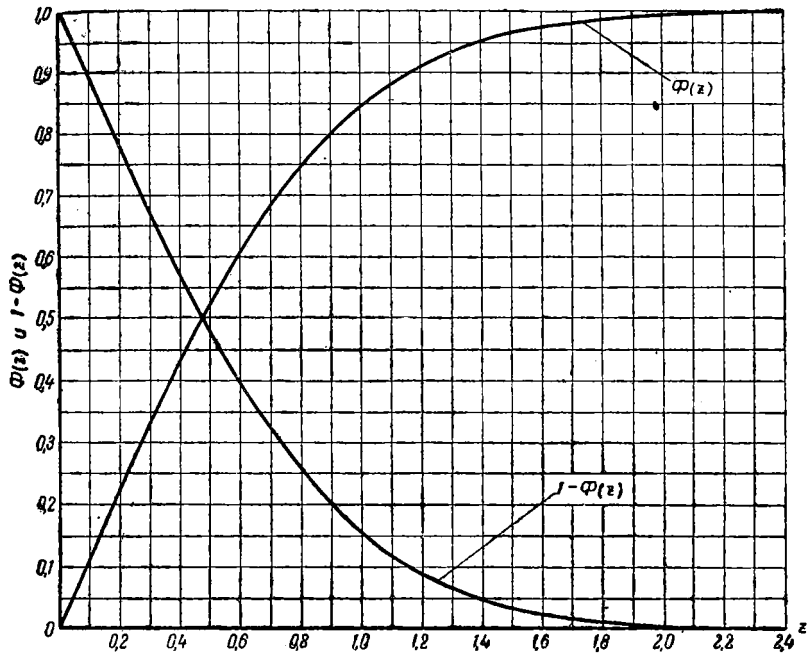


График функции Краппа (интеграл вероятности)

$$\Phi(z) = \int_0^z e^{-u^2} du$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаджанов А. М. Расчет дебитов взаимодействующих скважин в артезианском потоке. «Азербайджанское нефтяное хозяйство» № 1, 1938.
2. Альтовский М. Е. Методическое руководство по расчету взаимодействующих грунтовых и артезианских водозаборов. Госгеолиздат, 1947.
3. Борисов Ю. П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин. Труды МНИ имени Губкина, вып. 11, 1951.
4. Бочеввер Ф. М. Гидрогеологические расчеты осушения при карьерной разработке месторождений полезных ископаемых, «Разведка и охрана недр» № 8, 1959.
5. Бочеввер Ф. М. Типизация гидрогеологических условий для целей расчета эксплуатационных запасов подземных вод, «Советская геология» № 9, 1958.
6. Бочеввер Ф. М. Расчет сработки запасов подземных вод в долинах рек засушливых областей. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, ВНИИ Водгео. Госстройиздат, 1960.
7. Бочеввер Ф. М. и Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. Госстройиздат, 1961.
8. Бочеввер Ф. М. Приближенные гидрогеологические расчеты крупных водозаборов и водопонизительных установок (обобщенные системы взаимодействующих скважин). Информационные материалы гидрогеологической лаборатории ВНИИ Водгео, 1961.
9. Веригин Н. Н. Расчет водопонижения в котлованах гидросооружений, «Гидротехническое строительство» № 6, 1957.
10. Веригин Н. Н. О методе расчета водопонижения с помощью несовершенных скважин. Сб. трудов совещания по водопонижению в гидротехническом строительстве. Госстройиздат, 1959.
11. Гиринский Н. К. Некоторые вопросы динамики подземных вод. Сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», № 9. Госгеолиздат, 1947.
12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Гостехтеориздат, 1952.
13. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Гостоптехиздат, 1949.
14. Насберг В. М. Обобщенная формула Дюпюи — Краснополяского для скважины. Известия «ТНИС ГЭИ», № 1, 1947.
15. Огильви Н. А. К вопросу о расчетах каптажных буровых скважин в пластонапорных системах. Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, т. X, 1951.
16. Павловская Л. Н. Вопросы фильтрационных расчетов водопонизительных установок в котлованах гидротехнических сооружений. Сб. трудов совещания по водопонижению в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.
17. Павловская Л. Н. Фильтрационные расчеты водопонизительных установок в строительных котлованах гидротехнических сооружений. Известия ВНИИГ имени Веденеева, т. 64, 1960.
18. Павловская Л. Н., Шестаков В. М. Методические указания по фильтрационным расчетам водопонижения в гидротехническом строительстве. Госэнергоиздат, 1961.

19. Пилатовский В. П. Взаимодействие круговых концентрических галерей, дренирующих пласт в условиях упругого режима, Инженерный сборник, т. XV, 1953.

20. Пилатовский В. П. К задаче о неустановившейся фильтрации упругой жидкости к круговой галерее, ДАН АН СССР, т. 89, № 4, 1953.

21. Пискунов Н. С. Определение передвижения контура нефтеносности и падения давления при эксплуатации крупных месторождений, Сб. «Вопросы гидродинамики нефтяного пласта», Труды ВНИИ нефти и газа, вып. VI, 1954.

22. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод, Гостехтеориздат, 1952.

23. Романов А. В. Приток воды к водозаборным сооружениям и дренам. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сборник № 1. Госстройиздат, 1952.

24. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. Гостехиздат, 1958.

25. Чарный И. А. Методы расчета неустановившегося притока грунтовых вод к скважинам при глубинном водопонижении. Инженерный сборник, т. XXIII, 1956.

26. Шестаков В. М. Расчет водопонижительных установок сложных контуров в плане. Сб. «Опыт искусственного понижения уровня грунтовых вод на строительстве электростанций». Госэнергоиздат, 1956.

27. Шестаков В. М. Вопросы расчета водопонижительных установок сложных контуров в плане. Труды ВНИИ Водгео. Госстройиздат, 1958.

28. Шестаков В. М. Вопросы расчета крупных водопонижительных установок. Труды совещания по водопонижению в гидротехническом строительстве. Госстройиздат, 1959.

29. Шестаков В. М. О фильтрации из экранированных бассейнов. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии. Водгео, № 4, Госстройиздат, 1962.

30. Щелкачев В. Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостоптехиздат, 1948.

31. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1959.

32. Щелкачев В. Н. Исследование неустановившегося фильтрационного потока упругой жидкости к круговой батарее стоков, ДАН АН СССР, т. 4 и 79, 1951.

33. Щелкачев В. Н. Особенности восстановления пластового давления в процессе законтурного заводнения «Нефтяное хозяйство» № 2 и 4, 1952.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Основные задачи гидрогеологических расчетов водозаборов и водопонижительных установок	5
2. Общий вид расчетных зависимостей для определения расхода и понижения уровня	7
3. Основы методики расчета обобщенных систем взаимодействующих скважин	9
4. Линейная система скважин в безграничном пласте	11
5. Кольцевая система скважин в безграничном пласте	16
6. Площадная система скважин в безграничном пласте	19
7. Системы, состоящие из небольшого количества отдельных скважин («дискретные» группы)	22
8. Системы скважин в пластах ограниченных размеров	23
9. Взаимодействующие системы скважин	30
10. Определение понижения уровня в скважине	32
11. Оценка производительности скважин по данным откачек	35
12. Исходные гидрогеологические параметры для расчета	41
13. Примеры расчета	45
Приложение 1	55
Приложение 2	56
Литература	57

ВНИИ ВОДГЕО
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
КРУПНЫХ ВОДОЗАБОРОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
И ВОДОПониЗИТЕЛЬНЫХ
УСТАНОВОК

* * *

Госстройиздат
Москва, Третьяковский проезд, д. 1

* * *

Редактор издательства
Горбачева О. С.
Технический редактор
Комаровская Л. А.
Корректор *Е. Н. Кудрявцева*

Сдано в набор 8.XII 1962 г.
Подписано к печати 26.I 1963 г.
Т 02436. Бумага 60X90/₁₆ = 1.875 бум.
л. — 3,75 печ. л. (3,3 уч.-изд. л.).
Тираж 1800 экз. Изд. № VI—7470
Зак. № 2658 Цена 17 коп.

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