Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXXII, вып. 2, 1955 г.

О РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ, РАДИУСА ВЛИЯНИЯ И ПОНИЖЕНИЯ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПО ДАННЫМ ГРУППОВОЙ ОТКАЧКИ ИЗ НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН

Научн. сотрудн. Н. Г. Паукер

При гидротехническом строительстве, в горном деле, при сооружении метро, устройстве фундаментов глубокого заложения и т. п. все чаще и чаще применяется метод искусственного понижения уровня подземных вод. Особенно широкое распространение нашло водопонижение на современных грандиозных гидротехнических стройках, таких как Волго-Дон, Каховский гидроузел, строительство гидростанций у Куйбышева и Сталинграда и др. Известен также ряд случаев проходки шахтных стволов и осушения угольных и прочих месторождений полезных ископаемых с помощью водопонизительных установок.

Вместе с тем при проектировании новых водопонизительных установок или переустройстве действующих дренажных систем, состоящих из различных по конструкции водопонижающих скважин, дренажных колодцев, иглофильтров и т. п., встречаются затруднения в расчетах основных показателей эффективности действия таких установок. Имеются в виду расчеты необходимого понижения уровня в любом пункте участка, определение суммарного притока воды при различном расположении и различной конструкции дренажных устройств, определение расхода отдельных взаимодействующих выработок и т. п. Для этих расчетов, в свою очередь, надо располагать такими показателями, как коэффициент водопроницаемости, радиус влияния и некоторые другие.

Наиболее труден расчет взаимодействия несовершенных дренажных выработок, не доведенных до водоупорного ложа дренируемого водоносного горизонта, в особенности, если эти выработки расположены по неправильному (в плане) геометрическому контуру. Такие случаи довольно часты в практике искусственного водопонижения.

В настоящей статье рассматривается взаимодействие несовершенных выработок при различных расходах и понижениях в любой из них, при различном расположении их в плане, а также случаи совместного действия несовершенных и совершенных выработок в условиях напорных вод. Полученные зависимости и формулы проверены на практике работы мощных водопонизительных установок, действовавших в 1949—1951 гг. при строительстве шахт на западном крыле Подмосковного бассейна.

Как известно из практики, когда группа скважин действует непрерывно довольно продолжительное время, то создается более или менее стабильная депрессионная воронка, иногда неправильной формы, но при установившемся движении характеризуемая относительным постоянством своей конфигурации, глубины и протяженности. [1] О величине этой воронки можно судить по усредненному или так называемому приведенному радиусу влияния $R_{пр}$ [2].

Известно также, что длительная мощная откачка создает более благоприятные условия для подтока воды к скважинам в результате выноса песчаных и глинистых частиц из водоносного горизонта, размыва трещин и т. п. Таким образом, водопроницаемость пород в зоне действия скважин, особенно при больших расходах воды, несколько увеличивается по сравнению с условиями, существовавшими до эксплуатационной откачки. Такая несколько увеличенная водопроницаемость на участке расположения взаимодействующих скважин характеризуется усредненной величиной коэффициента водопроницаемости (коэффициента фильтрации) $K_{ср}$.

При проектировании новых установок или видоизменении существующих, а также при сравнении первоначальных проектных данных с фактическими представляет несомненный интерес определение $K_{ср}$ и $R_{ср}$ по данным длительной эксплуатационной откачки.

При проведении такой откачки для контроля за работой водопонизительной установки обычно сооружается несколько наблюдательных скважин. Данные наблюдений по ним позволяют откорректировать первоначальный проект водопонижения, дают возможность установить эффективность работы всей установки в целом и т. п. По данным этих наблюдений проверяются расчеты K, R и других показателей.

Для совершенных выработок задача решается довольно успешно путем использования известного уравнения Ф. Форхгеймера для взаимодействующих скважин [6]. При несовершенных выработках в условиях напорного режима пользуются либо способом И. А. Чарного [7], основанным на использовании формулы М. Маскета [4], либо тем же уравнением Ф. Форхгеймера, но вместо полной мощности водоносного горизонта иногда подставляют так называемую «активную мощность», которую рассчитывают по Замарину, Козени или Щелкачеву. Однако этот прием в известной мере искусственен, так как для группы скважин с различной глубиной погружения водоприемной части в водонапорный пласт приходится принимать какую-то усредненную, подчас весьма условную величину активной зоны. Непосредственно же формула Ф. Форхгеймера и ее применение в расчете водопонижения по методу И. П. Кусакина [3] «несовершенства» скважин не учитывают, так как уравнение Ф. Форхгеймера выведено для случая совершенных колодцев.

П. П. Аргуновым [1] выведена специальная формула для определения понижения s в любой точке напорного горизонта при работе несовершенных скважин.

Для одиночной выработки [2] формула П. П. Аргунова имеет следующий вид:

$$s = \frac{q}{2\pi KM}\left[\frac{M-l}{l}\left(\operatorname{arsh}\frac{l}{\rho} - \operatorname{arsh}\frac{l}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho}\right], \qquad (1)$$

[1] Когда водоотбор меньше динамических ресурсов водоносного горизонта.

[2] В статье П. П. Аргунова [1] говорится не о скважинах, а о фильтрах, так как работа предназначена для расчета иглофильтровых установок. Приводимые в его статье буквенные обозначения нами частично изменены.

где s — понижение пьезометрического уровня в некоторой точке, удаленной на расстояние ρ от данной скважины;

q — расход скважины;

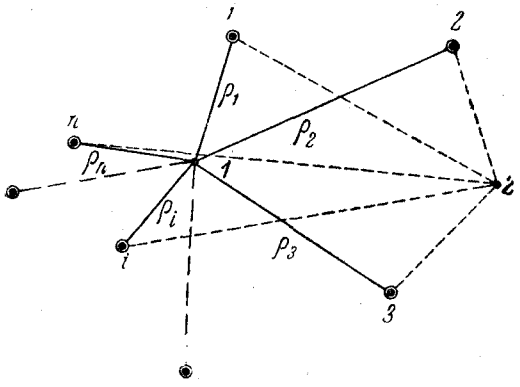
K — коэффициент фильтрации;

M — полная мощность водоносного горизонта;

l — вскрытая скважиной мощность водоносного горизонта;

R — радиус влияния.

Согласно принципу подземной гидромеханики, при действии нескольких скважин понижение в любой точке депрессионной поверхности равно сумме частных понижений, создаваемых влиянием каждой скважины на данную точку. Так, например, при круговом контуре расположения скважин для понижения в центре установки П. П. Аргунов дает следующую расчетную формулу:



● *Водопонижающая скважина*

• *Пункт наблюдения*

Рис. 1. Схема расположения водопонижающих скважин

$$s = \frac{nq}{2\pi KM}\left[\frac{M-l}{l}\left(\operatorname{arsh}\frac{l}{\rho_0} - \operatorname{arsh}\frac{l}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_0}\right], \qquad (2)$$

где n — число скважин, имеющих одинаковый расход;

l — одинаковая для всех скважин величина вскрытой части водоносного горизонта;

ρ_0 — радиус круговой установки.

Интересен более общий случай, когда имеется n скважин, расположенных как угодно на площади (рис. 1), вскрывших водоносный горизонт на различную величину l_i и имеющих различные расходы q_i, а следовательно, и различные понижения s_i.

Естественно, что форма депрессионной поверхности в этом случае будет неправильная — асимметричная и не представляющая в плане простой геометрической фигуры.

Следуя указанному выше принципу, понижение s в точке 1 (рис. 1) складывается из частных понижений (s_1, s_2, $s_3 \ldots s_i \ldots s_n$), вызываемых каждой из n взаимодействующих скважин.

Таким образом,

$$s_1 = \frac{q_1}{2\pi KM}\left[\frac{M-l_1}{l_1}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_1}{\rho_1} - \operatorname{arsh}\frac{l_1}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_1}\right];$$

$$s_2 = \frac{q_2}{2\pi KM}\left[\frac{M-l_2}{l_2}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_2}{\rho_2} - \operatorname{arsh}\frac{l_2}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_2}\right];$$

$$s_3 = \frac{q_3}{2\pi KM}\left[\frac{M-l_3}{l_3}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_3}{\rho_3} - \operatorname{arsh}\frac{l_3}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_3}\right];$$

. . . . . .

$$s_i = \frac{q_i}{2\pi KM}\left[\frac{M-l_i}{l_i}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_i}{\rho_i} - \operatorname{arsh}\frac{l_i}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_i}\right];$$

. . . . . .

$$s_n = \frac{q_n}{2\pi KM}\left[\frac{M-l_n}{l_n}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_n}{\rho_n} - \operatorname{arsh}\frac{l_n}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_n}\right]$$

$$s = \sum_1^n s_i = \frac{1}{2\pi KM}\sum_1^n q_i\left[\frac{M-l_i}{l_i}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_i}{\rho_i} - \operatorname{arsh}\frac{l_i}{R}\right) + \ln\frac{R}{\rho_i}\right].$$

Для более или менее крупных водопонизительных установок величина приведенного радиуса влияния $R_{пр}$ составляет сотни, а чаще тысячи метров и во много раз больше вскрытой части водоносного горизонта l. Поэтому выражением $\operatorname{arsh}\frac{l}{R}$ можно практически пренебречь, что не скажется на точности окончательных результатов.

Следовательно,

$$s = \frac{1}{2\pi KM}\sum_1^n q_i\left(\frac{M-l_i}{l_i}\operatorname{arsh}\frac{l_i}{\rho_i} + \ln\frac{R}{\rho_i}\right) \qquad (3)$$

или

$$s = \frac{1}{2\pi KM}\sum_1^n q_i A,$$

где

$$A = \frac{M-l_i}{l_i}\operatorname{arsh}\frac{l_i}{\rho_i} + \ln\frac{R}{\rho_i}.$$

Несмотря на то, что формула (3) учитывает индивидуальные особенности каждой скважины (степень несовершенства, различный расход и т. д.), для практических расчетов она довольно громоздка. Кроме того, в нее необходимо подставлять заранее известные значения $K_{ср}$ и $R_{пр}$, которые, как сказано выше, в ряде случаев определяются по данным предварительной работы всей установки в целом (так называемой пробной групповой откачки), а не по одиночным скважинам.

Следовательно, прежде чем находить понижение пьезометрического уровня в интересующей нас точке, необходимо сначала определить $K_{ср}$ и $R_{пр}$ для всей установки, исходя из данных фактических наблюдений по нескольким наблюдательным пунктам (на какой-либо определенный момент времени установившегося движения).

Пусть, например, имеются данные о снижении пьезометрического уровня в двух наблюдательных скважинах, расположенных на различных расстояниях от центральной части депрессии, — в точках *1* и *2* (рис. 1). Тогда

$$s_1 = \frac{\sum q_i A_{(1)}}{2\pi K_{ср} M}$$

и

$$s_2 = \frac{\sum q_i A_{(2)}}{2\pi K_{ср} M}.$$

При этом $s_1 > s_2$, т. е. в скважине *1*, находящейся ближе к центру депрессии, понижение больше, чем в наблюдательной скважине *2*.

Решим эти уравнения относительно K:

$$K = \frac{\sum q_i A_{(1)} - \sum q_i A_{(2)}}{2\pi M (s_1 - s_2)}.$$

Подставляя соответствующие значения для $A_{(1)}$ и $A_{(2)}$ и сделав необходимые преобразования, получим

$$K = \frac{\sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} +}{2\pi M (s_1 - s_2)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{+ \sum q_i \ln \frac{R}{\rho_{i\,(1)}} - \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} - \sum q_i \ln \frac{R}{\rho_{i\,(2)}}}{2\pi M (s_1 - s_2)} =$$

$$= \frac{\sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} - \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} +}{2\pi M (s_1 - s_2)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{+ \sum q_i \ln \rho_{i\,(2)} - \sum q_i \ln \rho_{i\,(1)}}{2\pi M (s_1 - s_2)}.$$

Для удобства вычислений перейдем к десятичным логарифмам, тогда

$$K = \frac{0{,}434 \left(\sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} - \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} \right) +}{2{,}73 M (s_1 - s_2)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{+ \sum q_i \lg \rho_{i\,(2)} - \sum q_i \lg \rho_{i\,(1)}}{2{,}73 M (s_1 - s_2)}. \qquad (4)$$

Заметим, что если q выражается в кубических метрах в сутки, то K — в метрах в сутки.

Для определения радиуса влияния всей установки разделим выражение s_1 на s_2:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sum q_i A_{(1)}}{\sum q_i A_{(2)}} = \frac{\sum q_i \left(\frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} + \ln \frac{R}{\rho_{i\,(1)}} \right)}{\sum q_i \left(\frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} + \ln \frac{R}{\rho_{i\,(2)}} \right)}.$$

Решая это уравнение относительно R, найдем

$$\ln R = \frac{s_2 \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} - s_1 \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} +}{(q_1 + q_2 + \ldots + q_n)(s_1 - s_2)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{+ s_1 \sum q_i \ln \rho_{i\,(2)} - s_2 \sum q_i \ln \rho_{i\,(1)}}{(q_1 + q_2 + \ldots + q_n)(s_1 - s_2)}.$$

Переходя к десятичным логарифмам и заменяя выражение $q_1 + q_2 + \ldots + q_n$ через Q, окончательно получим

$$\lg R = \frac{0{,}434 \left(s_2 \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(1)}} - s_1 \sum q_i \frac{M-l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(2)}} \right) +}{Q (s_1 - s_2)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{+ s_1 \sum q_i \lg \rho_{i\,(2)} - s_2 \sum q_i \lg \rho_{i\,(2)}}{Q (s_1 - s_2)}. \qquad (5)$$

Произведя несколько расчетов по формулам (4) и (5) и используя различные комбинации из двух наблюдательных скважин, можно найти усредненные значения коэффициента водопроницаемости для всего участка $K_{ср}$ и радиуса влияния всей установки $R_{пр}$.

Если в этих формулах l приравнять к M, т. е. сделать скважины совершенными, то все выражение в числителе, стоящее в скобках, обращается в нуль и получатся формулы, которые аналогичным путем выведены Е. Е. Керкисом из основного уравнения Ф. Форхгеймера для совершенных скважин при допущении, что

$$\lg R_1 \approx \lg R_2 \approx \lg R_3 \approx \ldots \approx \lg R.$$

К двум полученным формулам (4) и (5) можно теперь добавить третью, позволяющую определять снижение динамического уровня в любой точке депрессионной поверхности. Выводится она из формулы (3):

$$s_{(z)} = \frac{Q \lg R + 0{,}434 \sum q_i \frac{M - l_i}{l_i} \operatorname{arsh} \frac{l_i}{\rho_{i\,(z)}} - \sum q_i \lg \rho_{i\,(z)}}{2{,}73 K_{ср} M}. \qquad (6)$$

Если точка z отстоит от водопонижающих скважин на расстоянии ρ больше 2,5 l, т. е. если $\frac{l}{\rho} < 0{,}4$, то можно без особой погрешности полагать $\operatorname{arsh} \frac{l}{\rho} \approx \frac{l}{\rho}$. Тогда все эти три формулы еще более упростятся. В частности, формула (6) примет следующий вид:

$$s_{(z)} = \frac{Q \lg R + \sum_1^n q_i \frac{M - l_i}{2{,}3\rho_{i\,(z)}} - \sum_1^n q_i \lg \rho_{i\,(z)}}{2{,}73 K_{ср} M}. \qquad (6')$$

При подстановке соответствующих значений $K_{ср}$, $R_{пр}$, Q и M

$$s_{(z)} = N_1 + \frac{\sum_1^n q_i \left[\frac{M - l_i}{2{,}3\rho_{i\,(z)}} - \lg \rho_{i\,(z)} \right]}{N_2}, \qquad (6'')$$

где N_1 и N_2 — постоянные числа для выбранного момента времени.

Формулы (6), (6′) и (6″) могут быть использованы для построения депрессионной воронки или депрессионной кривой по заданному направлению, а также для расчета необходимого снижения напора в любой точке на всем участке водопонижения.

Перейдем к использованию и проверке формул (4), (5) и (6) на примерах длительной работы крупных водопонизительных установок.

Первый объект, на котором использовались полученные зависимости, представлял собой водопонизительную установку из 9 буровых скважин, оборудованных на напорный водоносный горизонт в трещиноватых известняках и доломитах. Установка создана для снижения гидростатического напора на подошву горизонтальных горных выработок во время строительства шахты. Расположение скважин в плане в данном случае не представляло правильной геометрической фигуры, так как размещение их зависело от контура подземных выработок. Поэтому задачу взаимодействия таких скважин нельзя было свести к какому-либо известному в литературе случаю правильного расположения взаимодействующих дренажных выработок. Водопонижающие скважины

Номер водопонижающей скважины	q, м³/час	l, м	$q(M-l)$	4		$s = 37{,}6$ м				2		
				ρ, м	$\frac{l}{\rho}$	$\operatorname{arsh}\frac{l}{\rho}$	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$\frac{l}{\rho}$	$\operatorname{arsh}\frac{l}{\rho}$
1	271	19,65	1450	40	0,492	0,474	35,0*	1,602	434	52	0,378	0,370
2	145	21,70	478	11	1,970	1,430	31,5*	1,042	151	32	0,678	0,634
4	184	19,35	1040	33	0,587	0,559	30,1*	1,519	280	38	0,510	0,490
5	321	20,30	1510	74	0,275	0,275	20,4	1,870	600	86	0,236	0,236
6	261	25,00	0	480	—	—	0,0	2,682	700	486	—	—
10	252	24,80	50	61	0,407	0,406	0,8*	1,784	460	40	0,620	0,589
11	291	22,00	873	87	0,253	0,253	10,2	1,940	565	113	0,195	0,195
Забивной фильтр 34	130	0	3250	291	—	—	11,1	2,464	321	318	—	—
Σ	1855		8650				139,0		3511			

Номер водопонижающей скважины	q, м³/час	l, м	$q(M-l)$	7	$s = 24{,}4$ м			3	$s = 22{,}4$ м			18	$s =$
				ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$
1	271	19,65	1450	121	12,0	2,083	565	75	19,3	1,875	509	376	3,85
2	145	21,70	478	93	5,1	1,969	286	89	5,4	1,950	283	398	1,20
4	184	19,35	1040	58	17,9	1,764	324	121	8,6	2,083	383	428	2,43
5	321	20,30	1510	10	108,0*	1,000	321	143	10,5	2,156	693	478	3,16
6	261	25,00	0	550	0,0	2,740	715	413	0,0	2,616	682	396	0,00
10	252	24,80	50	78	0,6	1,892	477	152	0,3	2,182	550	418	0,12
11	291	22,00	873	40	20,3	1,634	476	121	7,2	2,083	606	496	1,76
Забивной фильтр 34	130	0	3250	340	9,6	2,532	329	200	16,3	2,300	299	470	6,90
Σ	1855		8650		174,0		3493		67,6		4005		19,40

Примечания: 1. В верхней горизонтальной графе жирной цифрой слева показаны
2. Числа со знаком * при $\rho < 2{,}5l$ рассчитаны по формуле $q\frac{M-l}{l}\operatorname{arsh}\frac{l}{\rho}$.

Таблица 1

$s = 33{,}8$ м			1	$s = 27{,}2$ м					36	$s = 24{,}7$ м		
$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$\frac{l}{\rho}$	arsh $\frac{l}{\rho}$	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ
27,3*	1,716	465	8	2,46	1,549	114,3*	0,903	245	106	13,7	2,026	550
13,9*	1,505	218	35	0,620	0,589	13,7*	1,544	225	83	5,8	1,919	279
26,3*	1,580	291	77	0,251	0,251	13,5	1,886	346	66	15,8	1,820	335
17,5	1,935	621	118	0,172	0,172	12,7	2,072	666	44	34,3	1,644	528
0,0	2,687	703	433	—	—	0,0	2,637	688	520	0,0	2,716	708
1,2*	1,602	404	98	0,253	0,253	0,5	1,992	502	99	0,5	1,996	503
7,7	2,053	597	121	0,182	0,182	7,2	2,083	600	14	49*	1,146	333
10,2	2,503	327	259	—	—	12,5	2,414	314	300	10,8	2,478	322
104,0		3626				174,0		3585		130,0		3558

= 18,1 м		22	$s = 13{,}7$ м			12	$s = 11{,}6$ м			170	$s = 4{,}9$ м			91	$s = 1{,}3$ м		
lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	lg ρ	q lg ρ	ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	q lg ρ		ρ, м	$q\frac{M-l}{\rho}$	q lg ρ	
2,575	697	720	2,04	2,857	775	1276	1,14	3,106	843	в среднем 5650	1,53	6950		В среднем 7500	1,15	7220	
2,600	378	748	0,64	2,874	417	1304	0,37	3,116	453								
2,632	484	790	1,32	2,898	533	1340	0,78	3,128	575								
2,680	860	827	1,83	2,918	936	1394	1,08	3,145	1010								
2,598	678	294	0,00	2,468	645	845	0,0	2,927	765								
2,622	660	806	0,06	2,907	733	1384	0,04	3,142	790								
2,696	783	814	1,07	2,911	847	1376	0,63	3,139	913								
2,672	347	568	5,72	2,755	358	1110	2,93	3,046	397								
	4887		12,70		5244		7,00		5746		1,53	6950			1,15	7220	

номера наблюдательных скважин.

не полностью вскрыли напорный горизонт. Степень «несовершенства» их, т. е. отношение вскрытой части к полной мощности, колебалось от 0,78 и выше.

Кроме того, впоследствии к поверхностной водопонизительной установке добавлялись подземные скважины (глубокие забивные фильтры в почву выработок), которые вскрывали напорный горизонт только на 8—10 *м*. Вся же мощность водоносного слоя (на участке расположения скважин) составляет в среднем около 25 *м*.

Водоносный горизонт распространен на десятки и сотни километров во все стороны от участка водопонижения. Питание его осуществляется за счет перелива и просачивания воды из вышележащих водоносных горизонтов на водораздельных участках, расположенных к северо- и юго-западу от водопонизительной установки. Питание происходит также со стороны обводненных пород глубоких, ныне погребенных доледниковых долин, местами врезанных в породы данного водоносного горизота. Разгрузка этого горизонта осуществляется в долине современной крупной реки и ее притоков сквозь слабо проницаемые водоупоры (в кровле водоносных известняков и доломитов) в вышележащие горизонты. Некоторые из последних гидравлически связаны с поверхностными водами.

Итак, как следует из описания, все горизонты участка относятся к так называемому напорному комплексу подземных вод [5].

Для наблюдения за работой водопонизительной установки было пройдено 11 наблюдательных скважин. Большинство их работало исправно; на некоторых были установлены самопишущие уровнемеры — лимниграфы конструкции Б. П. Остроумова.

В качестве наблюдательных пунктов, кроме того, использовались еще две гидрогеологические скважины, расположенные на соседних разведочных участках, на расстоянии 5,7 и 7,7 *км* от центра водопонижения.

Откачка началась с середины ноября 1949 г. и продолжалась с некоторыми перерывами до середины мая 1951 г., т. е. около полутора лет.

Понижения во время эксплуатационной откачки в наблюдательных скважинах составляли от 1,2 до 41 *м* и более при расходах отдельных водопонижающих скважин от 130 до 380 $м^3/час$ и выше. Замеры уровней и расходов производились 3 раза в сутки.

Средняя производительность одной скважины составляла 200 $м^3/час$. Суммарный водоотбор временами доходил до 2000 $м^3/час$, т. е. около 48 000 $м^3$ воды в сутки, хотя не все скважины действовали одновременно. За все время работы водопонизительной установки откачано в общей сложности свыше 7 *млн.* $м^3$ воды.

Таким образом, было получено достаточно большое количество фактического материала, обеспечивающее возможность обстоятельной проверки приведенных выше формул.

Для расчета $K_{ср}$ по формуле (4) и R по формуле (5) взяты различные моменты времени, соответствующие разнообразным соотношениям работающих скважин при их различных расходах. Во всех случаях для расчета выбирался момент установившегося движения, при котором относительно длительное время сохранялся более или менее стабильный общий расход и неизменное положение уровней в наблюдательных скважинах.

В качестве примера приведем расчетную таблицу для момента, соответствующего состоянию откачки на 5 сентября 1950 г. (табл. 1). В это время действовали 7 водопонижающих скважин и, кроме того, вода поступала (из того же водоносного горизонта) из пункта прорыва в одном из штреков шахты (у забивного фильтра № 34). Суммарный расход всей установки составлял 1855 $м^3/час$.

Для расчета K и R использованы понижения уровня в наблюдательных скважинах № 1, 2, 3, 4, 7, 12, 18, 22, 36, 91 и 170. Так как в большинстве случаев расстояния от наблюдательных до водопонижающих скважин были больше $2{,}5\,l$, то можно было пользоваться упрощенными формулами (4), (5);

$$K = \frac{0{,}434\left[\sum_1^n q_l \frac{M - l_l}{\rho_{l\,(1)}} - \sum_1^n q_l \frac{M - l}{\rho_{(2)}}\right] + \sum_1^n q_l \lg \rho_{(2)} - \sum_1^n q_l \lg \rho_{(1)}}{2{,}73M\,(s_1 - s_2)};$$

$$\lg R = \frac{0{,}434\left[s_2 \sum_1^n q_l \frac{M - l}{\rho_{(1)}} - s_1 \sum_1^n q_l \frac{M - l}{\rho_{(2)}}\right] + s_1 \sum_1^n q_l \lg \rho_{(2)} - s_2 \sum_1^n q_l \rho_{(1)}}{Q\,(s_1 - s_2)}.$$

При $\rho < 2{,}5\,l$ расчет производился по формулам (4) и (5) с использованием таблиц обратных гиперболических функций для вычисления $\operatorname{arsh} \frac{l}{\rho}$. Все расчеты производились при помощи логарифмической линейки.

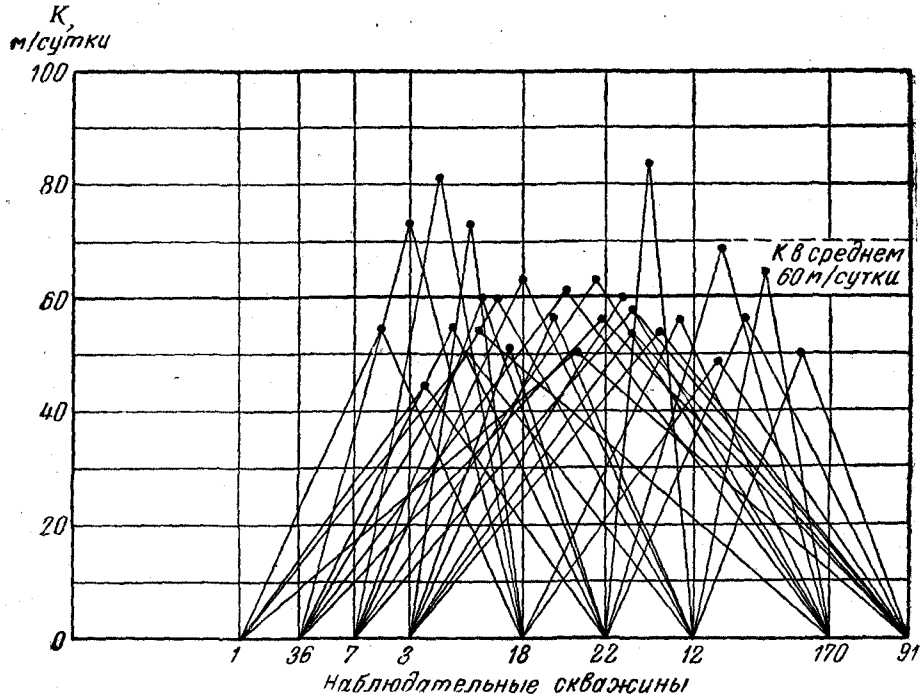


Рис. 2. Схема расчета коэффициента фильтрации

В указанные выше формулы подставлялись попарно значения понижений s_1 и s_2 для скважин, находящихся вблизи и вдали участка водопонижения, так как чем больше разность понижений $(s_1 - s_2)$ в наблюдательных пунктах, тем точнее при прочих равных условиях получается результат расчета K и R. Использованные комбинации наблюдательных скважин вместе с результатами расчетов K и R графически представлены на рис. 2 и 3. Среднее значение коэффициента фильтрации из 27 расчетов составило 60 *м/сутки*, а радиус влияния (по 26 расчетам) — около 12 500 *м*. Последняя величина является вполне реальной, так как

фактическое понижение в наиболее удаленной наблюдательной скважине, находившейся в 7500 *м* от центральной части депрессии, к 5 сентября 1950 г. достигло 1,3 *м* и впоследствии увеличилось до 2 *м*.

Получив таким образом средние значения K и R, можно построить депрессионную воронку для всей области влияния групповой откачки. Для указанного момента, т. е. по состоянию откачки на 5 сентября 1950 г., нами построена на основании формулы (6″) депрессионная воронка на участке водопонижения в масштабе 1 : 2000 (рис. 4) и для всей области влияния в масштабе 1 : 100 000 (рис. 5).[1] Для их построения понадоби-

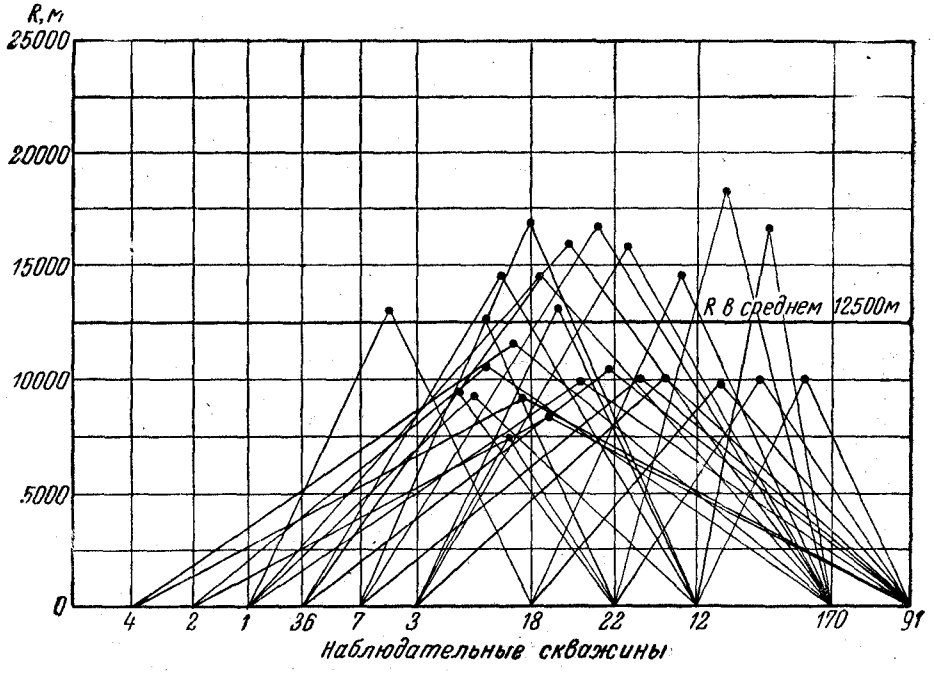


Рис. 3. Схема расчета радиуса влияния

лось вычислить положение пьезометрического уровня (или величину s_z) более чем в 80 пунктах, включая и наблюдательные скважины (чтобы сравнить расчетную величину s с фактической). Так, например, по семи наблюдательным скважинам отклонения расчетной величины s от замеренной составляли от 0,35 до 2 *м* при понижениях от 2,3 до 24,7 *м*, т. е. в среднем 6% от фактического понижения. Отклонения эти объясняются как местными изменениями водопроницаемости закарстованных известняков и доломитов, так, возможно, и неточностью первичных замеров, поскольку вся работа проводилась в производственных условиях и не носила специально методического характера. Однако по отдельным скважинам отклонения были и значительно бо́льшие. Так, по наблюдательным пунктам вблизи водопонижающих скважин разница между расчетными и фактическими понижениями доходила до 10 *м* и более. Например, по наблюдательной скважине № 4 расчетное понижение 24,85 *м*, а фактическое 37,6 *м*, т. е. разница на 12,75 *м*. И, наконец, наибольшие расхождения были между фактическим замером динамического уровня в самих водопонижающих скважинах и вычисленным положением пьезометрического уровня у внешней их поверхности. Эти расхождения состав-

[1] Приведенные в тексте рисунки уменьшены.

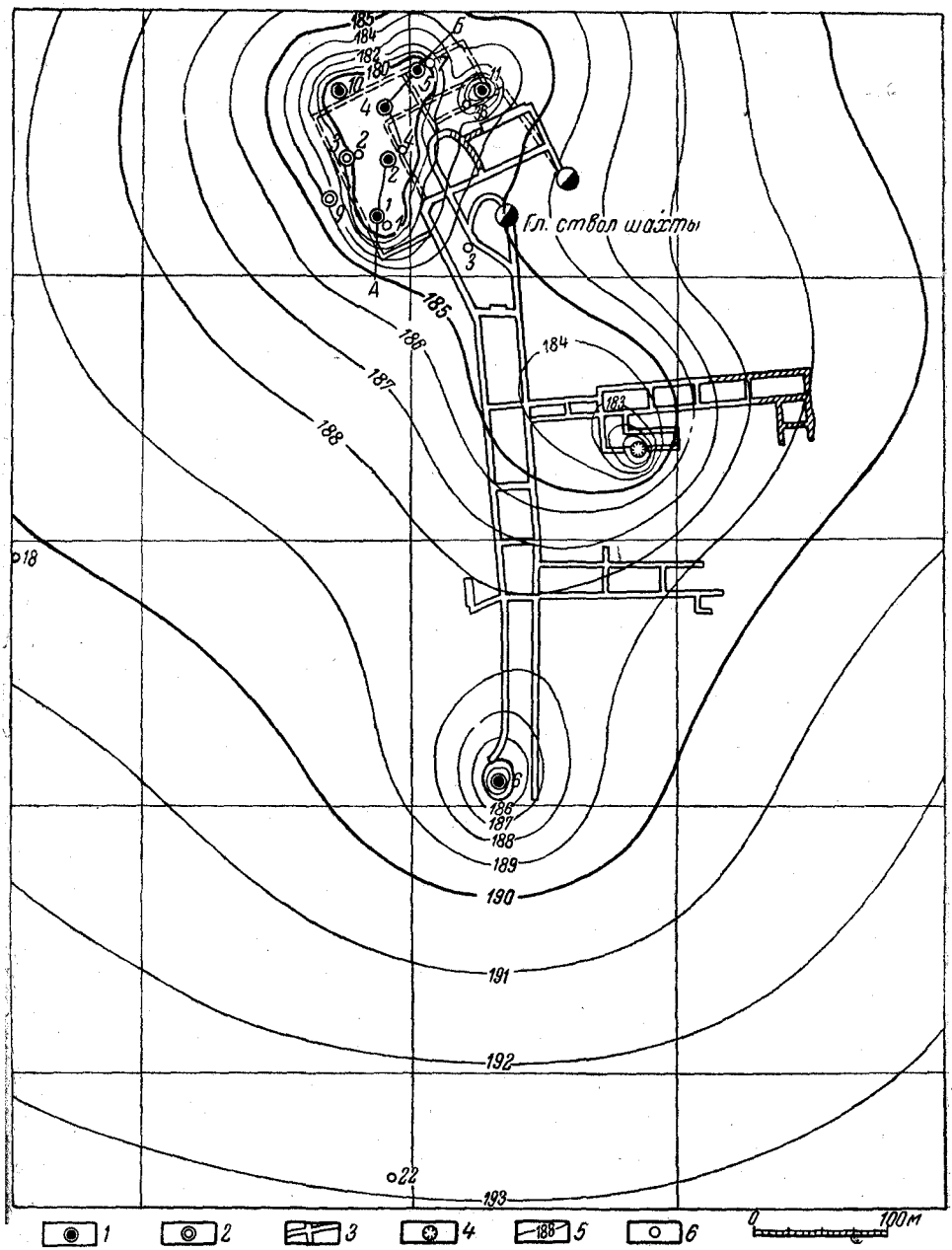


Рис. 4. Депрессионная воронка на момент откачки 5 сентября 1950 г.:

1 — действующая водопонижающая скважина; *2* — неработающая водопонижающая скважина; *3* — горные выработки; *4* — место прорыва напорных вод у забивного фильтра № 34; *5* — гидроизопьезы напорного горизонта во время откачки воды (по состоянию на 5 сентября 1950 г.); *6* — наблюдательная скважина

ляли от 24 до 53 *м* и свидетельствовали об явном нарушении линейного закона фильтрации. Дополнительные потери напора в десятки метров объясняются главным образом развитием турбулентного режима в ближайшей к скважине зоне.

На рис. 6 изображена воронка депрессии в разрезе по *АБ*. Из сопоставления кривой депрессии, рассчитанной по формуле (6″), и факти-

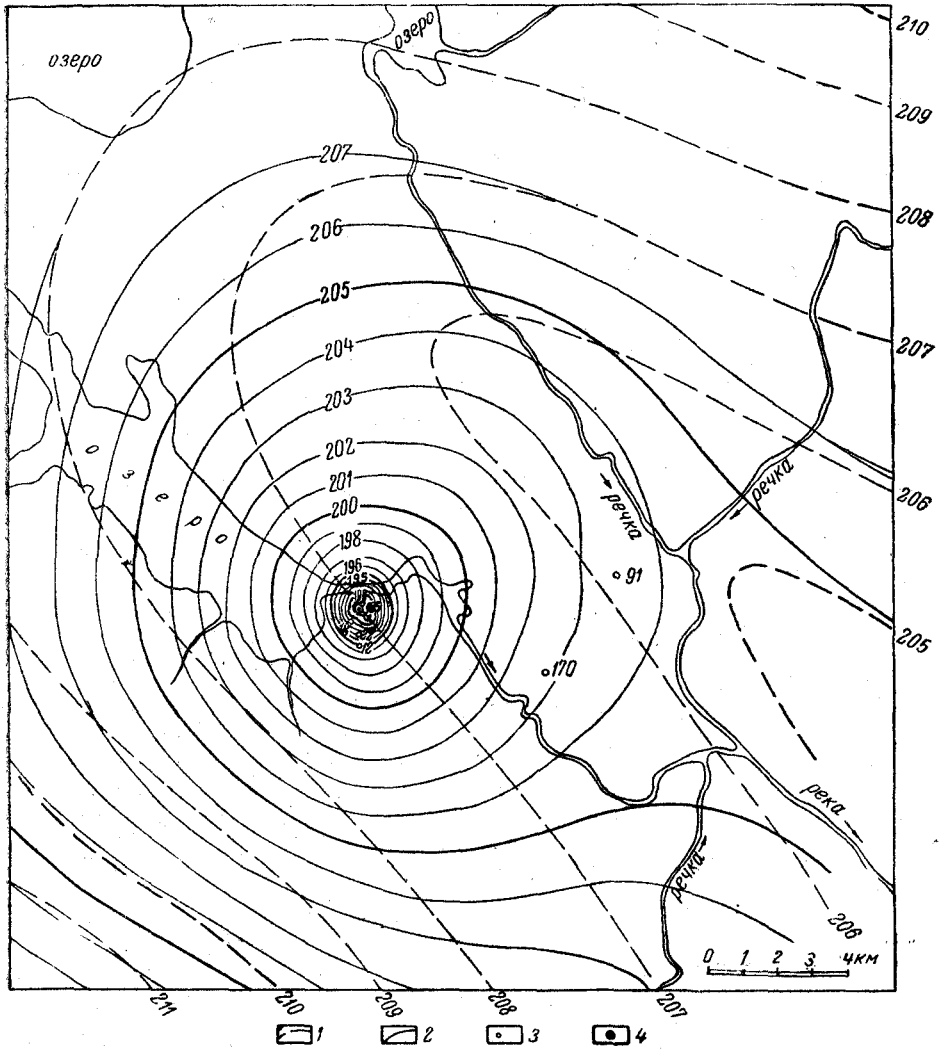


Рис. 5. Депрессионная воронка и гидроизопьезы естественного потока подземных вод для всей области влияния на 5 сентября 1950 г.:

1 — гидроизопьезы естественного потока напорных вод; *2* — гидроизопьезы при групповой откачке; *3* — пункты наблюдения; *4* — центральная часть депрессии

ческой депрессионной кривой (во внутренней части воронки депрессии) следует, что область движения воды, отличная от линейного закона фильтрации, захватывает довольно значительное пространство в водоносном горизонте. Во всяком случае, вблизи водопонижающих скважин зона турбулентного движения распространяется от внешней поверхности водопонижающих скважин на 10—14 *м*, что проконтролировано наблюдательными скважинами. А во внутренней части депрессионной воронки

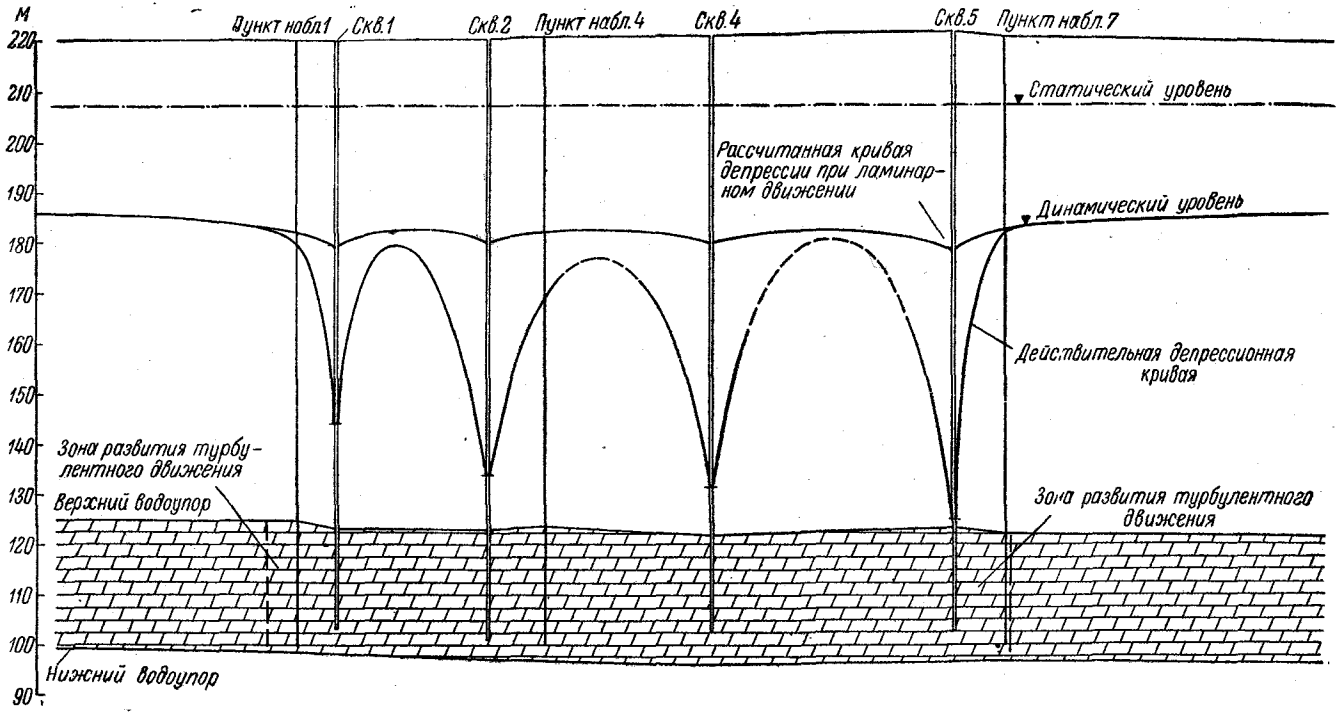


Рис. 6. Разрез по депрессионной воронке (по линии скважин *1*, *2*, *4* и *5*)

(в контуре гидроизопьезы с отметкой 180, рис. 4) зона турбулентного режима, вероятно, еще шире. На это указывает, например, значительно большее понижение, чем это необходимо при ламинарном режиме, в наблюдательной скважине № 2. Таким образом, сравнение фактических понижений с расчетными дает возможность выявить приблизительные контуры области турбулентного режима в водоносном горизонте при групповой откачке. Для внешней же части депрессионной воронки, несмотря на довольно сложный характер самой депрессионной поверхности, совпадение фактических данных с рассчитанными по формуле (6″) вполне приемлемо для практики. Это показывает, что видоизмененная нами формула П. П. Аргунова для групповой водопонизительной установки в трещиноватых породах дает положительные результаты.

Кроме рассмотренного случая, нами произведены аналогичные расчеты для других моментов откачки, когда действовали различные скважины, в том числе некоторые совершенные, а также забивные фильтры при различных расходах и различном взаимном соотношении действовавших дренажных выработок (табл. 2).

Таблица 2

Дата	Суммарный расход, *м³/час*	Число действовавших выработок	Число расчетов *K*	Среднее значение *K*, *м/сутки*
1/XII 1949 г.	592	3	7	55
15/XII 1949 г.	735	3	8	63
27/XII 1949 г.	1080	4	10	68
24/II 1950 г.	175	1	9	59
9/III 1950 г.	750	2	7	69
29/VIII 1950 г.	1970	8	20	60
5/IX 1950 г.	1855	8	27	60
20/X 1950 г.	1635	8	27	57
21/XII 1950 г.	1980	9	21	50

Средневзвешенное значение коэффициента фильтрации по 136 расчетам составило 59 *м/сутки*. Отклонения от этого среднего значения для отдельных случаев составляли от 0,5 до 17,5%. Среднее значение радиуса влияния при групповой откачке по 112 расчетам выразилось в 13,5 *км*.

Другой объект, на котором проверялись предлагаемые расчетные формулы, представлял собой также крупную водопонизительную установку, состоящую из 11 скважин. Скважины располагались вокруг шахтных стволов, но не по правильному в плане контуру, а на различных расстояниях, причем конструкция водоприемной части отдельных скважин также была различной. Скважины были оборудованы насосами АТН-8, АТН-10, АТН-14 и погружными электронасосами.

Расходы по отдельным скважинам при групповой их работе составляли от 10 до 200 *м³/час*. Суммарный дебит в различные периоды откачки варьировал от 450 до 1090 *м³/час* и более. Все скважины были несовершенными. Отношение вскрытой части к полной мощности напорного водоносного горизонта составляло от 15 до 54%. В качестве наблюдательных пунктов использовались 7 скважин, находившихся на различных расстояниях от центральной части депрессии — от 50 до 3620 *м*. Аналогично предыдущему случаю было вычислено среднее значение коэффициента фильтрации по данным работы водопонизительной установки в различные периоды времени. Так, например, для момента откачки 23—24 сентября 1950 г., когда действовали 10 скважин с суммар-

ным расходом 918 *м*³/*час*, среднее значение коэффициента фильтрации трещиноватых известняков составило 12,4 *м*/*сутки*, а величина радиуса влияния 13 *км* при полной мощности водоносного горизонта 47 *м*. Сравнение фактических данных с расчетными показало и в этом случае вполне удовлетворительную сходимость. Зона турбулентного режима была значительно меньше. Построенная депрессионная воронка оказалась близкой к фактической, т. е. понижения в удаленных наблюдательных скважинах были близкими расчетным. Влияние откачки сказалось на значительном расстоянии от центра понижения. Так, например, по разведочным скважинам, отстоявшим в 3,6 и 3,7 *км* от водопонизительной установки, понижения в конце 1950 г. составили от 4,3 до 6,2 *м*. Поэтому рассчитанная величина радиуса влияния в 13 *км* является вполне реальной.

Наконец, формула (6) была использована также и при проектировании водопонижения в песчаных породах при строительстве одного гидротехнического сооружения, при этом величина необходимого понижения была проверена в опытной модели по методу ЭГДА. Полученные значения оказались близкими.

Выводы

1. Видоизмененная формула П. П. Аргунова для несовершенных скважин в напорном водоносном горизонте применима для разнообразных условий работы групповой водопонизительной установки (разнообразное расположение скважин, различная глубина вскрытой части водоносного горизонта, различные расходы и т. п.), а также для комбинированной работы совершенных и несовершенных выработок.

2. Полученные результаты по расчету коэффициента фильтрации, понижения уровня, радиуса действия и приведенного радиуса влияния всей установки показывают вполне удовлетворительную сходимость с фактическими данными.

3. Предлагаемая методика расчета указанных гидрогеологических величин наиболее пригодна в том случае, когда имеются предварительные данные пробной групповой откачки из нескольких скважин, так как полученное значение коэффициента фильтрации уже отражает все конкретные условия данного участка.

4. Проверка предлагаемых формул на опыте крупных водопонизительных установок показала, что разработанная методика вполне применима для практических целей водопонижения как в горном деле, так и в других областях капитального строительства. Результаты получаются вполне удовлетворительными при наличии выдержанного напорного горизонта с обеспеченным питанием в пределах контуров, значительно удаленных от объекта водопонижения.

5. Как показывают фактические данные, для значительной части депрессионной воронки (в трещиноватых и слабо закарстованных породах) вполне применимы расчетные формулы, основанные на линейном законе фильтрации, однако в ближайшей к скважинам зоне развивается турбулентное движение и для внутренней части воронок депрессии эти формулы уже не применимы. Сравнение расчетных величин понижений по формуле (5) по наблюдательным пунктам с фактическими позволяет в первом приближении оконтурить область развития турбулентного режима фильтрации. Для практики же важно учитывать и уметь рассчитывать понижения в этой области. Поэтому возникает настоятельная необходимость в создании новых формул, учитывающих наличие двух режимов фильтрации, причем как для совершенных, так и для несовершенных выработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аргунов П. П. Расчет водопонизительных установок. Сб. Строительное водопонижение и гидромеханика грунтовых вод. Машстройиздат, 1950, № 15.

2. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете притока воды к колодцам, котлованам и горным выработкам и при проектировании водопонижения. Углетехиздат, 1955.

3. Кусакин И. П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. ОНТИ, 1935.

4. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Гостехиздат, 1949.

5. Мятиев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы. Известия АН СССР, ОТН, 1947, № 9.

6. Форхгеймер Ф. Гидравлика (перевод с немецкого). ОНТИ, 1935.

7. Чарный И. А. Об интерференции несовершенных скважин. Известия АН СССР, ОТН, 1946, № 11.