Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. 2, 1953 г.

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ АЛЛЮВИАЛЬНОГО ГРУНТОВОГО ПОТОКА

С. П. АЛБУЛ

Вопросом взаимодействия гидрогеологических скважин для грунтовых вод занимались советские ученые П. П. Кусакин [3], М. Е. Альтовский [1], П. П. Аргунов [2] и др. Ими был предложен ряд формул, которыми, в основном, и пользуются в настоящее время гидрогеологи. Однако эти формулы, как известно, требуют довольно много времени

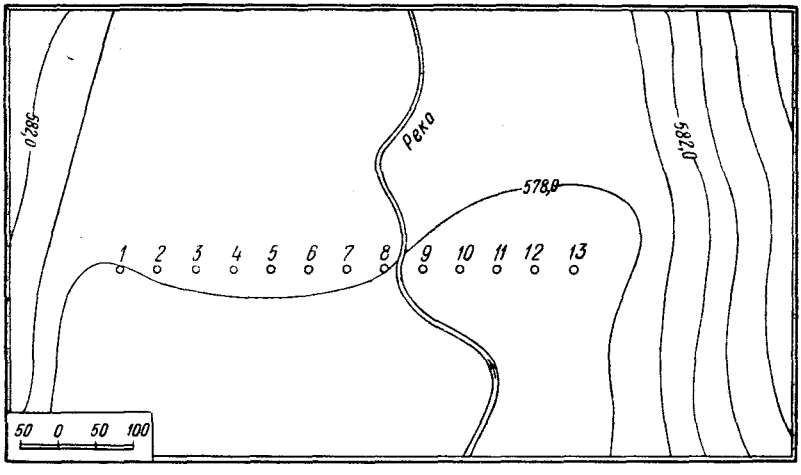


Рис. 1. План расположения скважин на участке водозабора. Кружками отмечены эксплуатационные на воду скважины; цифрой — порядковый номер скважины

на производство расчетов и в ряде случаев не дают должных результатов.

В настоящей статье кратко излагается новый метод расчета производительности взаимодействующих скважин, пройденных в аллювиальном грунтовом потоке. На основании полученных материалов по скважинам, расположенным нормально аллювиальному потоку, предлагается новая эмпирическая формула для расчета взаимодействующих скважин.

Для вывода рекомендуемой формулы предварительно приведем краткую гидрогеологическую характеристику участка водозабора.

Участок водозабора состоит из 13 эксплуатационных скважин, пройденных в одну линию, нормально подземному потоку (рис. 1, 2, 3).

Расстояние между скважинами равно 50 *м*. Они проходились ударно-механическим способом. Начальный диаметр 14″, конечный 12″. Глубина скважин изменяется от 28,7 *м* (скв. 1) до 37,2 *м* (скв. 4).

Для эксплуатации скважины оборудованы сетчатыми фильтрами, которые представляют собой 10- и 8-дюймовые перфорированные обсадные трубы с диаметром отверстий 18—20 *мм* и расстоянием между отверстиями 30—40 *мм*. На перфорированные трубы наматывалась медная проволока диаметром от 3 до 5 *мм*, после чего каркасы обшивались сеткой № 6.

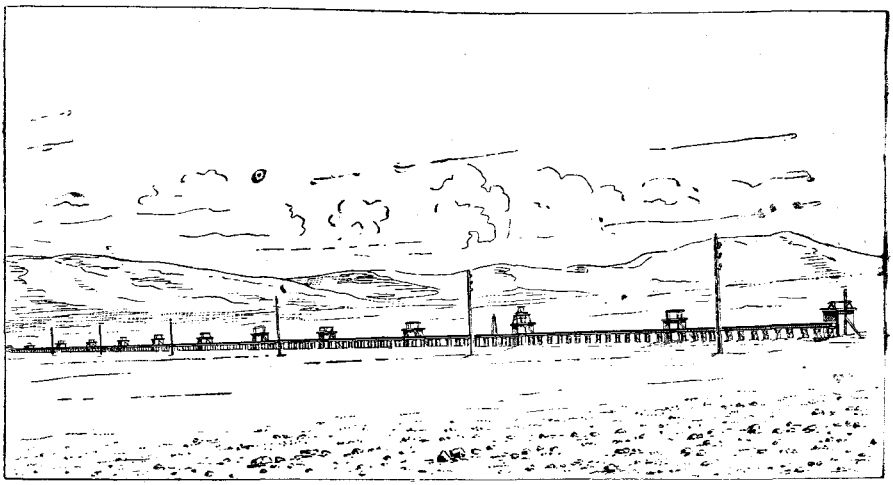


Рис. 2. Общий вид участка водозабора

Таблица 1

Номер скважины	Отметка устья скважины, *м*	Глубина, *м*	Длина рабочей части фильтра, *м*	Диаметр фильтра, дюйм	Коэффициент неоднородности аллювиальных отложений
1	578,05	28,7	18,7	10	9,2—109,0
2	577,45	31,6	23,8	10	1,01—75,4
3	577,40	34,0	27,1	10	13,3—19,2
4	577,39	37,2	18,5	10	9,2—73,0
			9,4	8	
5	577,44	35,3	27,1	10	—
6	577,63	33,1	19,8	10	2,02—25,2
			5,2	8	
7	577,62	34,9	23,1	10	7,7—41,7
8	578,05	34,6	13,1	10	—
			9,2	8	
9	578,15	35,2	17,9	10	4,6—16,07
				8	
10	577,93	35,3	25,6	10	33,3—126,8
11	577,80	34,1	23,9	10	—
12	577,81	31,5	25,7	10	4,5—22,8
13	577,81	32,0	23,3	10	7,2—11,8

В табл. 1 приводятся основные технические показатели по каждой скважине в отдельности, а на рис. 3 — гидрогеологический разрез участка водозабора.

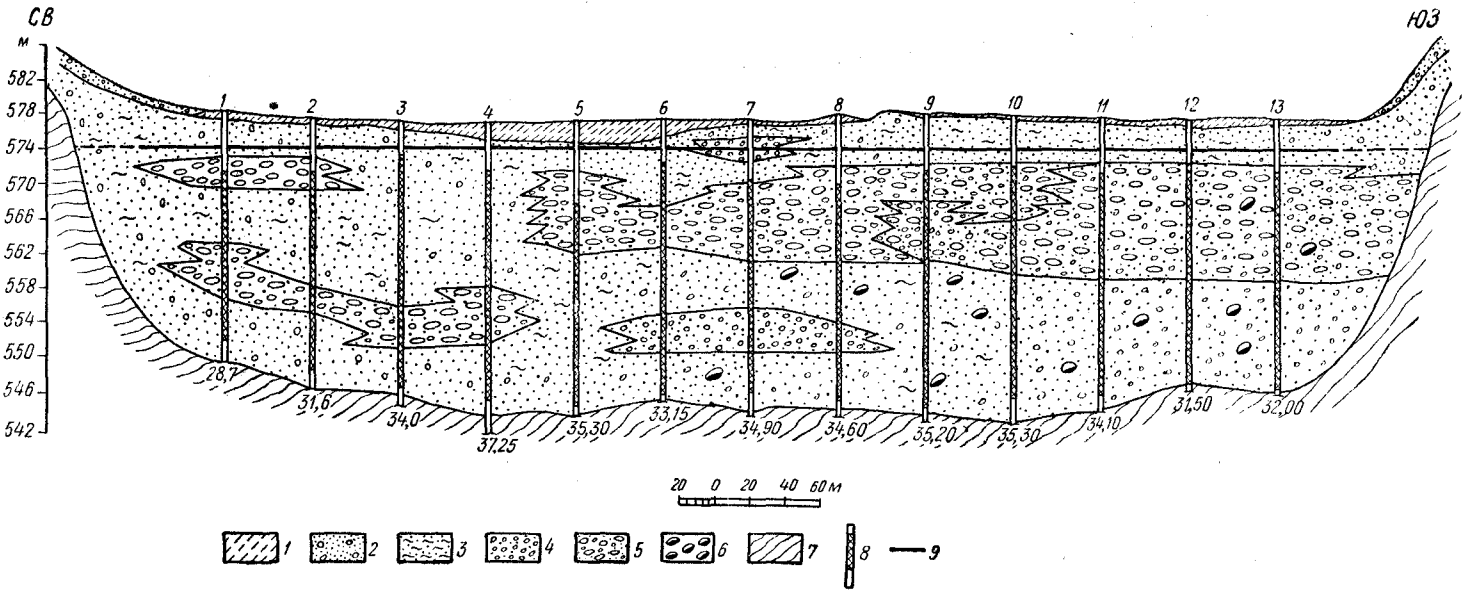


Рис. 3. Гидрогеологический разрез участка водозабора:

1 — супесь; *2* — песок с гравием; *3* — песок глинистый; *4* — гравий с песком; *5* — валуны мелкие; *7* — метаморфические породы (практически безводны); *8* — разрез скважин (верхняя цифра — порядковый номер, нижняя — глубина скважины); *9* — зеркало грунтовых вод

В геологическом строении участка, как видно из разреза (рис. 3), принимают участие породы верхней перми, слагающие борта долины и залегающие под аллювием на глубине 32—34 *м*. Аллювиальные отложения на участке водозабора имеют мощность около 32—34 *м* и представлены переслаиванием различной крупности песков, иногда переполненных гравием и галькой.

В северо-восточной части створа аллювий состоит из чередования разнозернистых песков с гравийными и галечниковыми образованиями. В районе скважины *3* аллювиальные отложения более однородны и состоят в основном из гравия с песчаным наполнением. Далее, по направлению скважины *8*, четвертичные осадки опять сложены разнозернистыми песками, гравием и реже галечником.

В юго-западной части разреза аллювий характеризуется крупными фракциями, состоящими, в основном, из гальки с гравийным и песчаным наполнением.

По всему разрезу встречаются мелкие валуны. Пылеватые и глинистые частицы присутствуют в незначительном количестве.

В целом устанавливается, что состав аллювиальных отложений участка водозабора крупнозернистый и мало изменчив по направлению потока. Подземные воды на участке водозабора встречаются в среднем на глубине 3 *м* (март) и являются безнапорными.

Суммарная фактическая производительность 13 скважин, пробуренных на участке водозабора, составляет 279 *л/сек*. Дебит отдельных скважин изменяется от 15,4 до 27,5 *л/сек*.

Таблица 2

Номер скважины	Результаты откачек	
	понижение, *м*	дебит, *л/сек*
1	1,15	27,5
2	0,90	22,0
3	1,90	15,4
4	1,80	22,0
5	2,40	23,0
6	2,03	24,0
7	1,05	23,3
8	3,00	16,5
9	2,45	22,4
10	1,40	21,0
11	3,00	20,0
12	1,00	22,0
13	2,00	20,0

В табл. 2 приводятся дебиты скважин, полученные в результате опытных откачек.

Для определения производительности водозабора, при условиях работы всех скважин, на участке была проведена групповая откачка из трех скважин (*6, 7, 8*). Методика проведения групповой откачки принята несколько отличной от существующих указаний по проведению групповых откачек из грунтовых водоносных горизонтов. [1]

Сущность ее заключается в следующем.

Перед началом откачки во всех скважинах, включенных в групповую откачку, был тщательно замерен уровень подземных вод. Затем во все три скажины одновременно были спущены насосы с погружением приемного клапана во всех скважинах на 1 *м*, т. е. на одинаковую величину. Центральной являлась скважина *7*. Она первая включалась в откачку, продолжительность которой при первом понижении равнялась одним суткам.

В процессе понижения в соседних скважинах производились наблюдения за уровнем воды. На вторые сутки в работу включалась соседняя скважина *6*, приемный клапан насоса которой находился на одной отметке с приемным клапаном насоса скважины *7*. После включения последняя скважина в результате влияния на нее скважины *6* несколько уменьшила свой дебит. На третьи сутки в откачку была включена соседняя

[1] Методика откачки была разработана автором вместе с Н. А. Мариновым.

скважина *8*. Приемный клапан ее насоса находился на той же отметке, что и в первых двух скважинах.

При втором понижении порядок откачки был принят тот же, что и при первом. Третьего понижения из-за маломощности применявшихся насосов и большой водообильности скважин, включенных в откачку, произвести не удалось.

Такая методика позволила вывести эмпирическим путем коэффициент влияния не только для этих трех скважин, включенных в групповую откачку, но и для тех скважин, которые по разным причинам не могли быть одновременно включены в работу. На основании полученных при этом материалов автором сделана попытка вывода эмпирической формулы для расчета взаимодействующих скважин, заложенных в грунтовом потоке.

Замеры расходов и наблюдения за пониженным уровнем воды в процессе откачки производились через каждые 30 мин. Определение времени заполнения мерного сосуда производилось секундомером. Наблюдения за динамическим уровнем воды осуществлялось при помощи свистка — хлопушки.

Результаты групповой откачки приводятся в табл. 3, 4.

Таблица 3

Первое понижение — 1,05 *м*

Время	Дебит, *л/сек*		
	скважина *6*	скважина *7*	скважина *8*
Первые сутки	—	$Q_1 - 15{,}24$	—
Вторые сутки	11,90	$Q_2 - 11{,}80$	—
Третьи сутки	11,00	$Q_3 - 9{,}70$	4,80

Таблица 4

Второе понижение — 1,50 *м*

Время	Дебит, *л/сек*		
	скважина *6*	скважина *7*	скважина *8*
Четвертые сутки	—	$Q_4 - 20{,}0$	—
Пятые сутки	13,3	$Q_5 - 15{,}7$	—
Шестые сутки	12,2	$Q_6 - 13{,}7$	7,0

На основании полученных данных приближенно определим максимально возможный дебит скважины при их одновременной работе. При первом понижении расход скажины *7* при включении в откачку скважины *6* уменьшится на величину, определяемую по формуле

$$c_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%, \qquad (1)$$

где c_1 — коэффициент снижения расхода, %;

Q_1 — дебит скважины *7* до включения в работу скважины *6*, *л/сек*;

Q_2 — дебит той же скважины после включения в работу скважины *6*, *л/сек*.

Подставляя исходные данные из табл. 3 в формулу (1), получим

$$c_1 = \frac{15{,}24 - 11{,}8}{15{,}24} 100\% = 22{,}5\%;$$

т. е. в результате подключения скважины *6* дебит скважины *7* уменьшился на 22,5%.

При дополнительном включении в работу скважины *8* дебит центральной уменьшается еще на некоторую величину и общий коэффициент снижения расхода ее определяется по формуле

$$c_2 = \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1} 100\%, \qquad (2)$$

где Q_3 — дебит скважины *7* при одновременной работе скважин *6* и *8*.

Подставляя исходные данные из табл. 3 в формулу (2), получим следующее значение общего коэффициента снижения:

$$c_2 = \frac{15{,}24 - 9{,}7}{15{,}24} 100\% = 36{,}3\%.$$

Вычитая из формулы (2) величину снижения, определенную по формуле (1), получим

$$c_2 - c_1 = 36{,}3 - 22{,}5 = 13{,}8\%.$$

Эта величина определяет влияние скважины *8* на центральную скважину при одновременной работе скважины *6*. Влияние скважины *8* на центральную скважину, очевидно, является несколько меньшим, чем влияние скважины *6*, что видно из следующей формулы:

$$\frac{\frac{Q_2 - Q_3}{Q_1} 100}{\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100} = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_1 - Q_2} = \frac{2{,}1}{3{,}44} = 0{,}61. \qquad (3)$$

Полученный коэффициент показывает, на сколько дебит каждой последующей скважины меньше разности дебитов центральной и первой работающих скважин, и, очевидно, для одного и того же понижения является величиной постоянной. Для удобства дальнейших расчетов обозначим его буквой *b*.

Аналогичные расчеты произведем для второго понижения. Расход скважины *7* при включении в откачку скважины *6* уменьшится на

$$c_3 = \frac{Q_4 - Q_5}{Q_4} 100\%, \qquad (4)$$

где c_3 — коэффициент снижения расхода, %;

Q_4 — дебит скважины *7* до включения в работу скважины *6*, *л/сек*;

Q_5 — дебит той же скважины после включения в работу скважины *6*, *л/сек*.

Подставляя исходные данные из табл. 4 в формулу (4), получим

$$c_3 = \frac{20{,}0 - 15{,}7}{20{,}0} 100\% = 21{,}5\%,$$

т. е. в результате подключения скважины *6* дебит скважины *7* уменьшится на 21,5%. При дополнительном включении в работу скважины *8* дебит центральной скважины уменьшится еще на некоторую величину и общий коэффициент снижения расхода ее определится по формуле

$$c_4 = \frac{Q_4 - Q_6}{Q_4} 100\%, \qquad (5)$$

где Q_6 — дебит скважины *7* при одновременной работе скважин *6* и *8*

Подставляя исходные данные в формулу (5), получим следующее значение общего коэффициента снижения:

$$c_4 = \frac{20{,}0 - 13{,}7}{20{,}0} 100\% = 31{,}5\%.$$

Вычитая из формулы (5) величину снижения, определенную по формуле (4), получим

$$c_4 - c_3 = 31{,}5 - 21{,}5 = 10{,}0\%.$$

Эта величина определяет влияние скважины *8* на центральную скважину при одновременной работе скважины *6*.

Определим коэффициент b для второго понижения:

$$b = \frac{\frac{Q_5 - Q_6}{Q_4} 100}{\frac{Q_4 - Q_5}{Q_4} 100} = \frac{Q_5 - Q_6}{Q_4 - Q_5} = \frac{2{,}0}{4{,}3} = 0{,}46. \qquad (6)$$

В дальнейших расчетах будем пользоваться коэффициентом b, полученным при первом понижении, так как он оказался несколько бо́льшим. При этом сделаем два допущения: 1) на скважину, находящуюся в средней части створа, будут влиять все скважины, расположенные слева и справа от нее; 2) на краевые скважины будет влиять только половина створа, а остальная часть скважин будет иметь настолько незначительное влияние, что им можно пренебречь. На центральную скважину *7* слева будут влиять скважины *1—6*, справа — *8—13*.

Откачка показала, что при одновременной работе скважин *7* (центральной) и *6* расход первой уменьшается на величину

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%.$$

При включении в работу скважины *8* расход скважины *7* уменьшится на

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} b\ 100\%.$$

Очевидно, при включении в работу одной из следующих скважин дебит центральной уменьшится еще на коэффициент b

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} b^2\ 100\%$$

и т. д.

Общее выражение суммарного коэффициента снижения дебита всех скважин, которое мы обозначим буквой m, будет иметь следующее выражение:

$$m = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100 + \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} b\ 100 + \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} b^2 100 + \\ + \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} b^3\ 100\% \ldots$$

Эту формулу можно преобразовать так:

$$m = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\,(1 + b + b^2 + b^3 + b^4 + \ldots).$$

Так как в скобках получилась геометрическая прогрессия, формулу можно упростить:

$$m = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\ \frac{b^{n-1}b - 1}{b - 1}.$$

Выражение $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ является постоянной величиной и может быть заменено постоянным коэффициентом a, после чего формула примет вид

$$m = a\,100\,\frac{b^{n-1}b - 1}{b - 1}.$$

Преобразуя эту формулу, получим

$$m = a\,100\,\frac{b^n - 1}{b - 1}. \qquad (7)$$

Пользуясь зависимостью (7), можно определить дебит центральной скважины 7 при одновременной работе всего участка водозабора. Если обозначить максимально возможный расход скважины, рассчитанный по существующим формулам, за Q_p, то он, очевидно, при одновременной работе водозабора уменьшится на $\frac{Q_p m}{100}$ и дебит скважины может быть определен по формуле

$$Q = Q_p - \frac{Q_p m}{100}$$

или

$$Q = Q_p\left(1 - \frac{a(b^n - 1)}{b - 1}\right), \qquad (8)$$

где Q — дебит центральной скважины участка водозабора при одновременной работе всех скважин, *л/сек*;

Q_p — максимально возможный дебит скважины, рассчитанный по существующим формулам, *л/сек*;

n — число одновременно работающих скважин без центральной;

a, b — постоянные коэффициенты.

В нашем случае

$$a = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{15{,}24 - 11{,}8}{15{,}24} = 0{,}225;$$

$$b = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_1 - Q_2} = \frac{11{,}8 - 9{,}7}{15{,}24 - 11{,}8} = 0{,}61.$$

В соответствии с полученными коэффициентами расчетная формула максимально возможного дебита скважин участка водозабора при одновременной работе их примет вид

$$Q_1 = Q_p\left(1 - 0{,}225\,\frac{0{,}61^n - 1}{0{,}61 - 1}\right)$$

или, заменяя выражение $\left(1 - 0{,}225\,\frac{0{,}61^n - 1}{0{,}61 - 1}\right)$ величиной d, получим

$$Q_p = dQ. \qquad (9)$$

Для скважин, расположенных в различных местах водозабора, n будет иметь значения, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Номер скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
n	6	7	8	9	10	11	12	11	10	9	8	7	6

В табл. 6 указаны максимально возможные расходы скважин, определенные на основании одиночных откачек по формуле Альтовского (Q_p). Суммарный расход составляет 712,88 *л/сек*.

Таблица 6

Номер скважины	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*
Расход, *л/сек*	70,0	70,0	39,05	46,84	53,02	44,16	74,12	29,63	43,36	66,13	38,96	70,0	67,59

В табл. 7 приведены значения *d* и *Q*, рассчитанные по формуле (9).

Таблица 7

Номер скважины	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	Сумма
d	0,453	0,441	0,434	0,430	0,427	0,426	0,424	0,426	0,427	0,430	0,434	0,441	0,453	—
Q	31,71	30,87	16,95	20,14	22,64	18,81	31,43	12,62	18,51	28,44	16,91	30,87	30,62	310,52
Q_p	70,0	70,0	39,05	46,84	53,05	44,16	74,12	29,63	43,36	66,13	38,96	70,0	67,59	712,88

Как видно из табл. 7, суммарный расчет дебита скважин при одновременной работе их по сравнению с расчетными данными по одиночным откачкам уменьшился почти в два раза.

После месячной эксплуатации водозабора был произведен единовременный замер расхода всех скважин участка, сравнительные результаты фактических и расчетных данных приводятся в табл. 8.

Таблица 8

Номер скважины	По формуле (9) Q, *л/сек*	Фактическая производительность, *л/сек*	Разница между расчетной и фактической производительностью, *л/сек*
1	31,71	30,0	— 1,71
2	30,87	32,2	+ 1,33
3	16,95	48,0	+ 31,05
5	22,64	30,3	+ 7,66
6	18,81	32,2	+ 13,39
7	31,43	32,2	+ 0,77
9	18,51	26,3	+ 7,79
10	28,44	30,3	+ 1,86
11	16,91	24,4	+ 7,49
12	30,87	31,2	+ 0,33
13	30,62	32,2	+ 1,58
	277,76	349,3	+ 74,94

При единовременном замере не работали скважины *4* и *8*. Как следует из табл. 8, фактические расходы скважин *1*, *2*, *7*, *10*, *12*, *13* близки к расчетным. Скважины *3*, *5*, *6*, *9*, *11* показали значительные расхождения с расчетными дебитами, причем все с плюсовым знаком. Объясняется это, повидимому, тем, что в процессе эксплуатации из водоносного горизонта, питающего их, были вынесены глинистые частицы

и скважины увеличили свой дебит, чего при кратковременных пробных откачках не могло быть достигнуто.

Кроме того, незначительное увеличение дебита объясняется также и тем, что две скважины участка водозабора в период замера не работали.

Выводы

1. Предлагаемая эмпирическая формула позволяет с достаточной для практики точностью определить производительность взаимодействующих скважин и всего водозабора в условиях грунтового потока.

2. Формула отвечает частному случаю расчета взаимодействующих скважин. Применение ее требует выполнения следующих опытных работ: а) определения расхода каждой скважины опытной откачкой обычным способом; б) проведения групповой откачки из трех скважин предлагаемым методом.

3. Для других частных случаев грунтового потока, а возможно и для грунтовых вод вообще, применение указанной методики групповой откачки и приведенной формулы возможно в экспериментальном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтовский М. Е. Методическое руководство по расчету взаимодействующих артезианских и грунтовых водозаборов. Госгеолиздат, 1947.

2. Аргунов П. П. Расчет водопонизительных установок. Сборник трудов № 15, Машстройиздат, 1950.

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

4. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.

5. Форхгеймер Ф. Гидравлика. ОНТИ, 1935.

6. Щелкачев В. Н. и Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949.

Поступило 1/III-1952 г.