

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩИХ ФОРМУЛ ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕБИТА НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ НАПОРНЫХ ВОД

С. П. Албул

Сравнительная оценка существующих формул при расчете дебита несовершенных скважин, пройденных в напорном водоносном горизонте, дается на основании анализа опытных данных, полученных при гидрогеологических исследованиях в одной долине, выполненной аллювиальными отложениями, к которым приурочен напорный водоносный горизонт.

Аллювиальные отложения долины представлены в основном разнородными песками, отчасти пылеватыми и глинистыми, с гравием, галькой и единичными валунами. Общая мощность аллювиальных образований, залегающих на третичных отложениях, 40—42 м. Верхняя часть аллювия сложена глинами и суглинками мощностью до 13 м, являющимися водоупорной кровлей. Напор достигает 12,79 м, считая от кровли водоносного горизонта. Уровень этого горизонта подвержен сезонным колебаниям. Минимальное положение уровня наблюдается осенью (0,21—0,95 м ниже поверхности земли), максимальное — весной, когда уровень воды поднимается на 0,35—0,83 м выше поверхности земли, вследствие чего некоторые скважины в этот период самоизливают.

Нормально аллювиальному потоку длины был пройден ряд разведочно-эксплуатационных скважин (рис. 1). Бурение их производилось ударно-механическим способом станком УА-75 с приводом от электромотора. Начальный диаметр скважин 12", конечный — 10". Скважины оборудовались сетчатыми фильтрами, сетка которых подбиралась с учетом гранулометрии аллювиальных песков, слагающих водоносный горизонт. Фильтры опускались в скважину в «потай» на сальнике. Все скважины опробовались одиночными откачками. Результаты откачек показали, что при почти одинаковых гидрогеологических условиях три скважины, состоящие друг от друга на 50 м, имели резко различные дебиты (табл. 1).

После бурения и оборудования скважин фильтрами были произведены опытные откачки (табл. 2).

Как показывают данные табл. 2, скважины № 1 и 2 имеют дебит больший, чем скважина № 3. При понижении уровня воды на 2 м дебит скважины № 1 почти в 2 раза больше, чем скважины № 3. Такое колебание дебита можно объяснить изменением водопроницаемости аллювиальных отложений и, вероятно, конструктивными особенностями рабочей части фильтра.

Таблица 1

Общая характеристика скважин	Номер скважины		
	1	2	3
Глубина, м	30,65	29,8	32,0
Мощность верхнего водонепроницаемого слоя, м	13,0	11,5	10,0
Глубина до нижнего водопора, м	42,0	40,5	39,0
Глубина появления воды, м	13,0	11,5	10,0
Мощность водоносного горизонта, м	29,0	29,0	29,0
Глубина залегания пьезометрического уровня от поверхности земли, м	0,21	0,21	0,21
Диаметр фильтра, дм	8	8	8
Длина рабочей части фильтра, м	11,75	9,73	9,10

Конструкция фильтра для всех трех скважин была одинаковой, но длина рабочей части фильтра в скважинах № 2 и 3 была соответственно 9,10 и 9,73 м, а скважины № 1 несколько больше — 11,75 м.

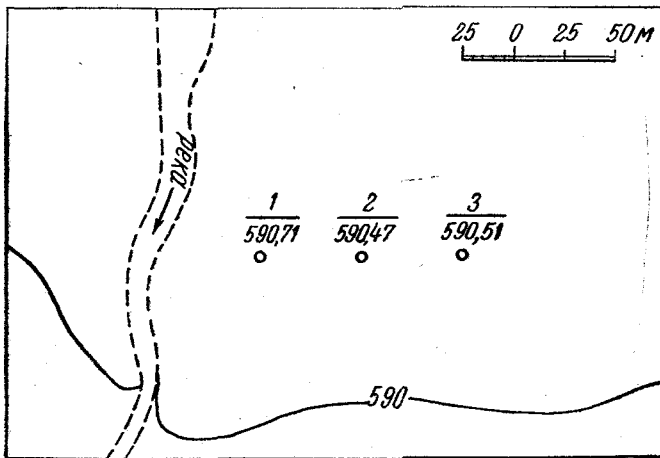


Рис. 1. План расположения скважин. Кружками отмечены эксплуатационные на воду скважины; в числителе — порядковый номер, в знаменателе — отметка устья скважины

В связи с наличием пылеватых и глинистых частиц в аллювиальных отложениях предполагалось, что в процессе опытных откачек происходила закупорка отверстий сетки фильтра, что уменьшило производительность скважины № 3 и отчасти скважины № 2.

Для очистки фильтра в скважины под давлением нагнеталась чистая вода. Опыт с нагнетанием продолжался 18—20 час., затем скважины опробовались откачками. Дебиты скважин № 2 и 3 изменились за 1 сек. лишь на десятые доли литра, поэтому фильтр очищался вновь. Для этого в скважины № 2 и 3 в течение 15—20 мин. с перерывами нагнетался воздух под давлением до 4 атм. Повторные откачки показали, что произво-

дительность скважин осталась без изменений. Чтобы увеличить дебит, в скважины № 2 и 3 были спущены дополнительные фильтры, и эти скважины опробовались откачками. В табл. 3 приведены сравнительные

Таблица 2

Номер скважины	Величина понижения, м	Дебит, л/сек
1	1,0	11,60
	2,0	20,00
	2,8	25,45
2	1,0	10,50
	1,5	14,51
3	1,0	7,06
	2,0	10,63
	3,0	11,30

данные откачек при первоначальной и увеличенной длине рабочей части фильтра этих скважин.

Таблица 3

Основные показатели	Номер скважины				
	1	2		3	
		при первоначальной длине фильтра	при увеличенной длине фильтра	при первоначальной длине фильтра	при увеличенной длине фильтра
Длина рабочей части фильтра, м	11,75	9,73	11,98	9,10	12,25
Величина понижения, м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0
	2,8	—	—	3,0	3,0
Дебит, л/сек	11,60	10,50	16,25	7,06	11,24
	20,00	14,51	21,66	10,63	16,62
	25,45	—	—	11,30	17,51

Как показывает сопоставление производительности и длины рабочей части фильтра, увеличение длины фильтра в $\frac{11,98}{9,73} = 1,23$ раза повышает дебит скважины в $\frac{16,25}{10,50} = 1,54$ раза при первом и в $\frac{21,66}{14,51} = 1,49$ раза при втором понижении. В скважине № 3 увеличение длины фильтра в $\frac{12,25}{9,10} = 1,34$ раза повышает дебит при первом понижении уровня воды в $\frac{11,24}{7,06} = 1,59$ раза, при втором — в $\frac{16,62}{10,63} = 1,56$ и при третьем — в $\frac{17,51}{11,30} = 1,54$ раза.

Таким образом, дебит скважин увеличивался в зависимости от удлинения рабочей части фильтра. Причем увеличение его при разных понижениях происходило в определенное, практически равное, количество раз. В скважине № 2 длина рабочей части фильтра увеличена в 1,23 раза, а дебит для двух различных понижений в среднем увеличился

в. $\frac{1,54 + 1,49}{2} = 1,51$ раза. В скважине № 3 длина рабочей части фильтра увеличена в 1,34 раза, а дебит для трех различных понижений в среднем увеличился в $\frac{1,59 + 1,56 + 1,54}{3} = 1,56$ раза.

Если через Q_1 обозначить дебит скважины, соответствующий длине рабочей части фильтра l_1 , а через Q_2 — дебит скважины, соответствующий увеличенной длине рабочей части фильтра l_2 , то зависимость между дебитом и длиной рабочей части фильтра в самой общей форме примет вид

$$\frac{Q_2}{Q_1} = f\left(\frac{l_2}{l_1}\right)$$

или

$$Q_2 = Q_1 f\left(\frac{l_2}{l_1}\right). \quad (1)$$

Аналогично зависимость между дебитом несовершенной скважины Q_n с длиной рабочей части фильтра l , дебитом совершенной скважины Q_c и мощности напорного горизонта M выразится формулой

$$Q_n = Q_c f\left(\frac{l}{M}\right). \quad (2)$$

Приведем формулы, применяемые в гидрогеологической практике для определения дебита несовершенных скважин в условиях напорных вод:

формула П. П. Аргунова [3]

$$Q_n = \frac{2\pi KMs}{\frac{M-l}{l} \left(\operatorname{arsh} \frac{l}{r} - \operatorname{arsh} \frac{l}{R} \right) + \ln \frac{R}{r}}; \quad (3)$$

формула М. Маскета [14]

$$Q_n = \frac{2\pi KMs}{\frac{1}{2\bar{h}} \left(2 \ln \frac{4M}{r} - A \right) - \ln \frac{4M}{R}}, \quad (4)$$

$$\bar{h} = \frac{l}{M},$$

$$A = \ln \left[\frac{\Gamma(0,875\bar{h}) \Gamma(0,125\bar{h})}{\Gamma(1 - 0,875\bar{h}) \Gamma(1 - 0,125\bar{h})} \right];$$

формула С. К. Абрамова [1]

$$Q_n = \frac{2\pi Kls}{\ln \frac{R}{r}} \left(1 - 7 \sqrt{\frac{r}{M}} \ln \frac{l}{M} \right); \quad (5)$$

формула И. Козени [21]

$$Q_n = \frac{2\pi Kls}{\ln \frac{R}{r}} \left(1 + 4,95 \sqrt{\frac{r}{l}} \cos \frac{\pi}{2} \frac{l}{M} \right); \quad (6)$$

формула Ф. Форхгеймера [16]

$$Q_n = \frac{2\pi KMs}{\ln \frac{R}{r}} \sqrt{\frac{l}{M}} \sqrt[4]{\frac{2M-l}{M}}; \quad (7)$$

формула В. Д. Бабушкина [4]

$$Q_n = \frac{2\pi K l s}{\ln \frac{a l}{r}}, \quad (8)$$

$$\alpha = 1,32^*.$$

В приведенных формулах приняты следующие обозначения:

- Q_n — дебит несовершенной скважины;
 K — коэффициент фильтрации;
 M — мощность напорного водоносного горизонта;
 s — понижение пьезометрического уровня;
 l — длина рабочей части фильтра;
 r — радиус фильтра;
 R — радиус депрессии;
 Γ — условное обозначение гамма функции, которая при непосредственном пользовании формулой М. Маскета определяется по специальным таблицам¹ либо в зависимости от $\bar{h}$ — с помощью графика (рис. 2), составленного И. А. Чарным.

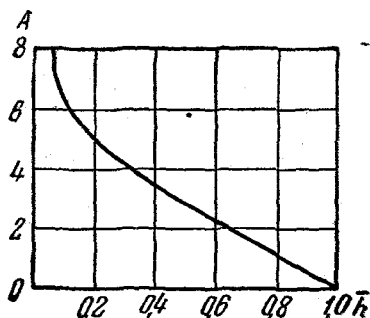


Рис. 2. Вспомогательный расчетный график для определения зависимости A от $\bar{h}$

Значение функции arsh определяется по таблице гиперболических синусов.²

По всем этим формулам нами произведен расчет дебита несовершенной скважины при различном отношении длины рабочей части фильтра к мощности напорного водоносного горизонта $\left(\frac{l}{M}\right)$.

Для удобства расчетов формулы (3) — (9) были преобразованы. Правая их часть разделена на выражение дебита совершенной скважины в напорных водах, согласно формуле Дюпюи-Тима, и умножена на Q_c . В ряде случаев числитель и знаменатель умножены на $\frac{l}{M}$. В резуль-

тате получены приведенные ниже зависимости между дебитом несовершенной и совершенной скважины. Сопоставляя полученные зависимости с наиболее простой — линейной (10), видим, что они отличаются от нее поправочными коэффициентами, представляющими выражения, стоящие в правой части формул после значения $\frac{l}{M}$.

Приближенная формула

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M}. \quad (9)$$

Формула П. П. Аргунова

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M} \frac{\ln R - \ln r}{\frac{M-l}{M} \left(\text{arsh} \frac{l}{r} - \text{arsh} \frac{l}{R} \right) + \frac{l}{M} \ln \frac{R}{r}}. \quad (10)$$

* α — коэффициент перехода от эквипотенциальной поверхности у скважины к фильтру скважины. По Н. К. Гиринскому [8], $\alpha \approx 1,60$; по В. Д. Бабушкину $\alpha = 1,32$.

¹ Шпильрейн. Таблицы специальных функций, ч. 1. ОНТИ, 1933.

² Брилинг С. Р. Математический справочник ГТТИ, 1933.

Формула М. Маскета

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M} \frac{\ln R - \ln r}{\ln \frac{4M}{r} - 0,5A - \frac{l}{M} \ln \frac{4M}{R}} \quad (11)$$

Формула С. К. Абрамова

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M} \left(1 - 7 \sqrt{\frac{r}{M} \ln \frac{l}{M}} \right) \quad (12)$$

Формула И. Козени

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M} \left(1 + 4,95 \sqrt{\frac{r}{l}} \cos \frac{\pi}{2} \frac{l}{M} \right) \quad (13)$$

Формула Ф. Форхгеймера

$$Q_n = Q_c \frac{l}{M} \sqrt{\frac{M}{l}} \sqrt{\frac{2M-l}{M}} \quad (14)$$

Формула В. Д. Бабушкина

$$Q_n = Q_c \frac{l \ln R - \ln r}{M \ln al - \ln r} \quad (15)$$

где Q_c — дебит совершенной скважины, остальные обозначения прежние.

Исходные данные для расчета дебита несовершенной скважины приведены в табл. 4.

Таблица 4 *

Коэффициент фильтрации, м/сутки	Мощность напорного водоносного горизонта, м	Длина рабочей части фильтра, м	Радиус фильтра, м	Радиус депрессии, м		Удельный дебит совершенной скважины по Дюпюи $q_{уд}$, л/сек	
				скважины № 2	скважины № 3	скважина № 2	скважина № 3
100	29	0,1M—1M	0,203	300	220	28,9	30,2

Расчеты, произведенные по формулам (9)—(15), и построенные по данным этих расчетов графики (рис. 3, 4) показали, что для приближенного определения дебита несовершенных скважин в определенных практических целях, например при предварительном обосновании водоснабжения на базе напорных вод, можно пользоваться приближенной формулой (9).

Для сравнительной характеристики дебита, полученного на основании различных расчетных формул и опытным путем по скважинам № 2 и 3, рассмотрим рис. 3 и 4, на которых показаны зависимости

$$q_{yx} = f\left(\frac{l}{M}\right) \quad \text{и} \quad q_r = f\left(\frac{l}{M}\right).$$

* В табл. 4 приведены фактические данные по скважинам, пройденным в аллювиальном напорном потоке.

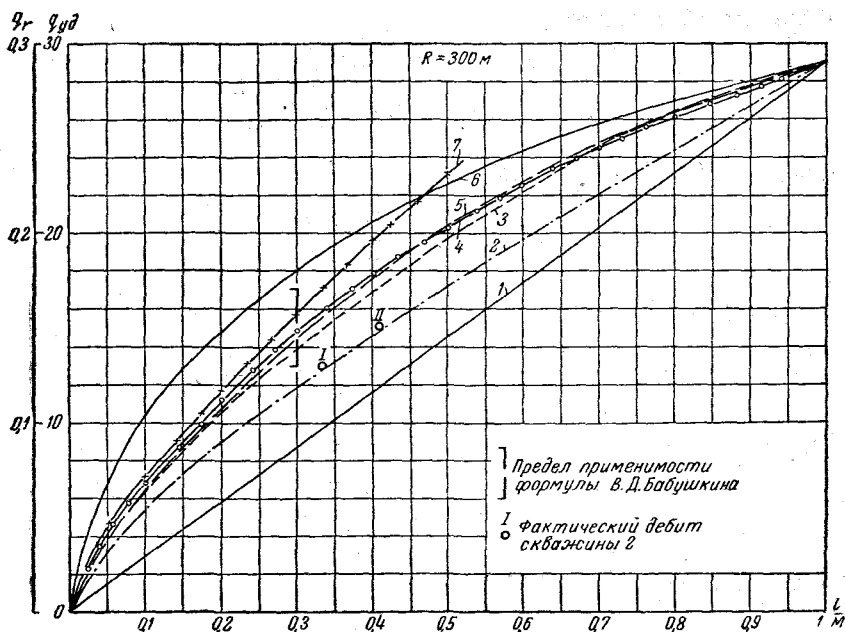


Рис. 3. Кривые удельного и приведенного дебита скважины № 2 в условиях напорных вод по формулам:

1 — приближенной; 2 — П. П. Аргунова; 3 — М. Маскета; 4 — С. К. Абрамова; 5 — И. Козени; 6 — Ф. Форхгеймера; 7 — В. Д. Бабушкина. Приведенный дебит q_r соответствует $K = 1$ м/сутки и $s = 1$ м

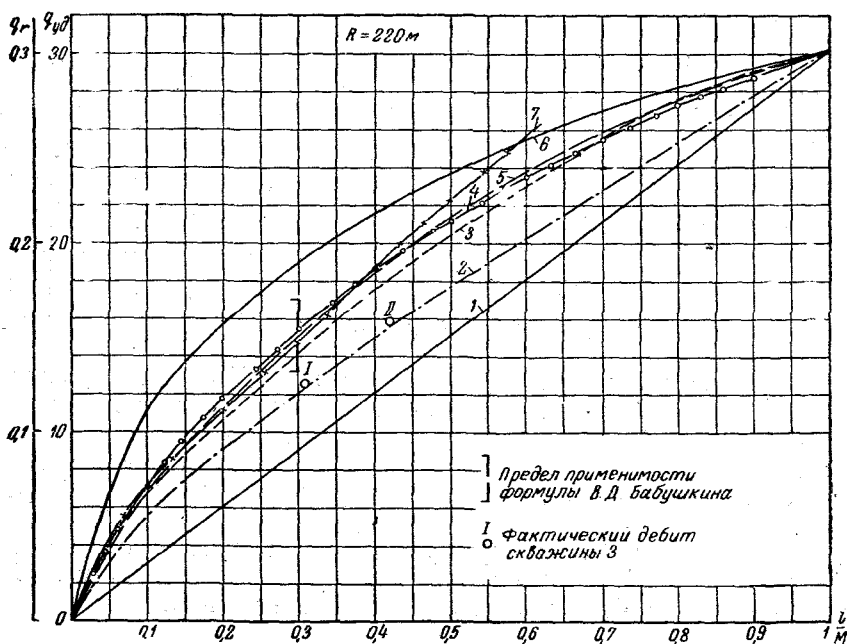


Рис. 4. Кривые удельного и приведенного дебита скважины № 3 в условиях напорных вод по формулам:

1 — приближенной; 2 — П. П. Аргунова; 3 — М. Маскета; 4 — С. К. Абрамова; 5 — И. Козени; 6 — Ф. Форхгеймера; 7 — В. Д. Бабушкина. Приведенный дебит q_r соответствует $K = 1$ м/сутки и $s = 1$ м

Исходные данные для нанесения на графики дебита, полученного опытным путем, приведены в табл. 5

Таблица 5

Номер скважины	Удельный дебит ($q_{уд}$), л/сек	Длина рабочей части фильтра, м	Коэффициент фильтрации, м/сутки ¹	Мощность напорного водоносного горизонта, м	Приведенный дебит, л/сек	$\frac{l}{M}$
2	10,50	9,73	81,4	29	0,128	0,335
	16,25	11,98	109,1		0,148	0,41
3	7,06	9,10	58,1	29	0,122	0,31
	11,24	12,25	72,1		0,155	0,42

Как видно из рисунков, дебиты скважин № 2 и 3, полученные по данным откачек, практически располагаются на кривой, построенной по формуле П. П. Аргунова.

Для упрощения расчетов дебита несовершенных скважин формулы (3)—(7) приведены к виду (при $M = 29$ м, $r = 0,203$ м и $R = 200-300$ м):

$$Q_n = 2,73 \frac{Kls}{\lg \frac{R}{r}} a; \quad (16)$$

$$Q_n = 2,73 \frac{Kls}{\lg \frac{R}{r}} b; \quad (17)$$

$$Q_n = 2,73 \frac{kls}{\lg \frac{R}{r}} c; \quad (18)$$

$$Q_n = 2,73 \frac{kls}{\lg \frac{R}{r}} d. \quad (19)$$

Коэффициенты в формулах (16)—(19) отвечают: a — формуле Ф. Форхгеймера, b — формулам С. К. Абрамова и И. Козени, c — формуле П. П. Аргунова и d — формуле М. Маскета.

Для удобства определения коэффициентов a , b , c и d построен график (рис. 5).

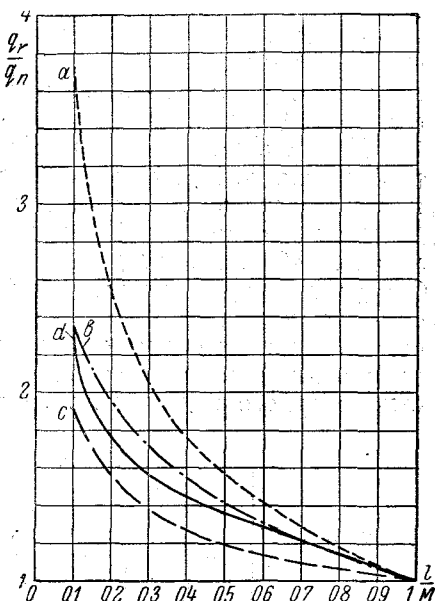


Рис. 5. График для определения переходных коэффициентов a , b , c , d : q_r — приведенный дебит при $K = 1$ м/сутки и $s = 1$ м; q_n — приведенный дебит, рассчитанный по формуле (9). График построен для случая, когда $M = 29$ м, $r = 0,203$ м и $R = 200-300$ м.

Выводы

1. Кривые дебита несовершенных скважин, построенные по формулам (9)—(15), как и следовало ожидать, различаются по форме и положению относительно осей координат.

¹ Определен по формуле П. П. Аргунова [3].

Сопоставление кривых показывает, что завышенный дебит дает формула Ф. Форхгеймера, заниженный — приближенная формула, основанная на линейной зависимости, средний — формулы П. П. Аргунова, М. Маскета, С. К. Абрамова и И. Козени. Кривые, построенные по формулам П. П. Аргунова, располагаются наиболее близко к прямой, отвечающей формуле (9). Особое положение занимает линия, соответствующая формуле В. Д. Бабушкина. Она выходит за пределы семейства кривых уже при $l = 0,4 \div 0,6$ м, что подтверждает указание о возможности применения ее только при малых значениях $\frac{l}{M}$ [4].

2. Анализ формул и кривых, построенных по этим формулам, дает возможность говорить о пределах применимости отдельных формул при гидрогеологических расчетах, производимых для практических целей.

При сопоставлении различных формул за основу принята формула проф. П. П. Аргунова, отвечающая более строгому математическому выводу, дающая кривую, занимающую среднее положение, и в достаточной степени проверенная в гидрогеологической практике. Отклонения дебита, рассчитанного по отдельным формулам, от дебита, определенного по формуле П. П. Аргунова, сведены в табл. 6.

Дебиты, полученные по формулам М. Маскета, С. К. Абрамова, И. Козени и приближенной формуле (9), отличаются от дебита, рассчитанного по формуле П. П. Аргунова, на 0—48%. Наибольшее расхождение (до 91%) дает формула Ф. Форхгеймера.

Дебит, определенный по формуле (9), несколько ниже полученного по формуле П. П. Аргунова, при этом величина расхождения находится в зависимости от длины рабочей части фильтра l .

При l , изменяющейся в пределах 0,1 — 0,3 м, расхождение составляет 26—48%, а при l , изменяющейся в пределах 0,3 — 1,0 м, — 0 — 26%. Следовательно, приближенной формулой, основанной на линейной зависимости, можно пользоваться при предварительных расчетах дебита скважин, проектируемых в напорных аллювиальных водах для водоснабжения, особенно когда отношение длины рабочей части фильтра к мощности напорного водоносного горизонта превышает 0,3.

Таблица 6

Формула	Отношение длины рабочей части фильтра к мощности водоносного горизонта $\frac{l}{M}$, %										Характер отклонения цифровых величин в сопоставлении с формулой П. П. Аргунова
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
М. Маскета . .	19	18	15	15	14	11	10	8	5	0	Завышены
Приближенная формула (9)	-48	-35	-26	-20	-15	-11	-8	-5	-2	0	Занижены
С. К. Абрамова	19	24	23	22	16	14	9	6	2	0	Завышены
И. Козени . .	18	21	21	20	17	15	12	8	4	0	.
Ф. Форхгеймера	91	63	52	41	31	23	17	10	6	0	.

Формулы М. Маскета, П. П. Аргунова, С. К. Абрамова и И. Козени пригодны для разнообразных гидрогеологических расчетов, связанных как с проектированием водоснабжения на базе напорных вод, так и с проведением осушительных и прочих мероприятий. Из них особо следует отметить формулу П. П. Аргунова, данные которой практически совпали с фактическими дебитами, что дает возможность рекомендовать ее для контрольных расчетов.

Это не исключает возможности применения для предварительных гидрогеологических расчетов приближенной формулы (9), не требующей

сложных вычислений и дающей удовлетворительные для целей практики результаты, заниженность которых имеет значение своеобразного коэффициента запаса, необходимого при решении вопроса водоснабжения на базе напорных вод с непостоянным режимом водоносных горизонтов, связанных с аллювиальными отложениями.

Формула Ф. Форхгеймера мало пригодна для определения дебита несовершенных скважин, пройденных в напорных водоносных горизонтах, используемых для водоснабжения.

3. Графики рис. 3 и 4 $\left[q_r = f\left(\frac{l}{M}\right) \right]$ позволяют определить дебит скважин при различных значениях коэффициента фильтрации K и понижения уровня воды s по формулам (9) — (15).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К. Гидрогеологические расчеты притока воды в котлованы и искусственного понижения уровня грунтовых вод. Углетехиздат, 1952.
2. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехтеориздат, 1953.
3. Аргунов П. П. Расчет водопонижительных установок. Сб. «Строительное водопонижение и гидромеханика грунтовых вод». Труды Научно-исследовательского института по основаниям и фундаментам. Машстройиздат, 1950, № 15.
4. Бабушкин В. Д. Определение коэффициента фильтрации путем откачек из опытных узлов с несовершенными скважинами. «Разведка недр», 1949, № 2.
5. Бабушкин В. Д. Указания по определению коэффициента фильтрации при опытных откачках из несовершенных скважин. Изд. Всесоюзного научно-исследовательского института ВОДГЕО, 1950.
6. Биндеман Н. Н. Выборы формул для определения коэффициента фильтрации по данным откачек из несовершенных скважин. «Гидротехническое строительство», 1944.
7. Биндеман Н. Н. Ускоренные вычисления дебита буровых скважин, колодцев и родников. Стройиздат, 1945.
8. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации. Госгеолиздат, 1950.
9. Глазовский М. М. Дебит скважин, не совершенных по степени вскрытия пласта. Труды Московского нефтяного института им. И. М. Губкина. Гостоптехиздат, 1951, вып. 11.
10. Дружинин Н. И. О точности определения фильтрационного расхода при исследовании пространственной фильтрации методом ЭГДА. Известия ВНИИГ, 1948, т. 37—38; 1949, т. 40; 1950, т. 42; 1951, т. 44.
11. Каменский Г. Н., Климентов П. П., Овчинников А. М. Гидрогеология месторождений полезных ископаемых. Госгеолиздат, 1953.
12. Козлов В. С. Расчет дренажных сооружений. Стройиздат, 1940.
13. Крылов А. П., Глазовский М. М., Мирчик М. Ф., Николаевский Н. М., Чарный И. А. Научные основы разработки нефтяных месторождений. Гостоптехиздат, 1948.
14. Маскет М. Течение однородной жидкости в пористой среде. Гостоптехиздат, 1949.
15. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Гостехтеориздат, 1952.
16. Форхгеймер Ф. Гидравлика. ОНТИ, 1935.
17. Храмушев А. С. Исследование водоносности пластов одиночными разработками. Госгеолиздат, 1940.
18. Чарный И. А. Об интерференции несовершенных скважин. Известия АН СССР, ОТН, 1946, № 11.
19. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. Гостоптехиздат, 1948.
20. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949.
21. Kozeny J. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1933, Н. 8—10.