

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 518:556.33.04

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТНЫХ ВЫПУСКОВ**

М.М. БУРАКОВ

*Товарищество с ограниченной ответственностью
Гидрогеоэкологическая научно-производственная и проектная фирма «КазГИДЭК»
Казахстан, 050008, Алматы, ул. Мынбаева 43а, оф. 506; e-mail: michael.burakov@gmail.com*

На основе приближенного решения задачи о фильтрации подземных вод при опытно-фильтрационном опробовании напорного водоносного горизонта выпусками разработан метод обработки и интерпретации результатов этого опробования с целью определения фильтрационных и ёмкостных параметров горизонта. Данный метод максимально совмещён с широко применяемым в настоящее время графоаналитическим методом. Показано, что предложенный метод имеет существенно меньшие ограничения на продолжительность опытного возмущения, чем применяемый сейчас графоаналитический.

Ключевые слова: напорный водоносный горизонт; опытный выпуск; гидрогеологические параметры; метод определения.

**A METHOD OF THE DETERMINATION OF HYDROGEOLOGICAL
PARAMETERS OF THE AQUIFERS ON THE RESULTS
OF THE EXPERIMENTAL CONSTANT-RATE PUMPING TESTS**

M.M. BURAKOV

*TOO Hidrogeoeologicheskaya nauchno-proizvodstvennaya i proektnaya firma «KazGIDEK»
Kazakhstan, 050008, Almaty, ul. Mynbaeva, 43a, of. 506; e-mail: michael.burakov@gmail.com*

On the basis of the approximate solution of the problem of groundwater filtration during the experimental constant-rate pumping tests of the pressure aquifers, a method for the processing and interpreting the results of this operation has been developed in order to determine the filtration-volumetric parameters of the horizon. The method is combined as much as possible with the currently widely used graphic-analytical method. The proposed method has been shown to have substantially less restrictions on the duration of the experimental perturbation (pumping) than the currently used graphic-analytical one.

Keywords: pressure aquifer; experimental constant-rate pumping tests; hydrological parameters; method of determination.

Условия фильтрации подземных вод (ПВ) к возмущающей скважине при постоянном понижении в ней уровня характерны преимущественно для опытно-фильтрационного опробования (ОФО) напорных водоносных горизонтов пробными и опытными выпусками из самоизливающихся скважин.

Такие условия на практике встречаются достаточно часто; в процессе выпуска пьезометрический уровень в возмущающей скважине практически мгновенно устанавливается на определённой (заданной) отметке, вода из скважины изливается без применения какого-либо насосного оборудования

(т. е. самоизливается), а переменным является дебит возмущения (выпуска). Соответственно, как отмечалось в [3], влияние скважины, действующей при постоянном понижении в ней уровня ПВ, равносильно работе возмущающей скважины с переменным дебитом.

Задача фильтрации ПВ в изолированных напорных водоносных горизонтах при возмущении выпусками включает в себя на самом деле две взаимосвязанных задачи. Одна из них предполагает вычисление дебита возмущения в зависимости от заданного темпа снижения пьезометрического уровня ПВ в возмущающей скважине, вторая — оценку распределения понижения пьезометрического уровня ПВ в водоносном горизонте и темпа его снижения в любой точке горизонта (за исключением возмущающей скважины). При этом для интерпретации результатов ОФО опробуемых водоносных горизонтов используется решение именно второй задачи, т. е. уравнение, описывающее распределение понижения пьезометрического уровня ПВ в водоносном горизонте и темп его снижения в любой точке горизонта в зависимости от заданного (измеряемого на протяжении выпуска) переменного дебита возмущения.

В [3, 18, 19] достаточно подробно рассмотрены точное решение указанной задачи и его приближенное представление; именно последнее является основой для имеющейся методики обработки и интерпретации результатов прослеживания понижения пьезометрического уровня ПВ в возмущающих и наблюдательных скважинах опытных кустов при выпусках с целью определения фильтрационных и ёмкостных параметров опробуемых напорных водоносных горизонтов [2, 11, 13–16]. Как и любое приближённое представление точного решения, оно имеет свои ограничения на область существования, в пределах которой обеспечивает заданную достоверность вычислений; последняя определяется заданным уровнем предельно допустимых погрешностей (абсолютных или относительных).

Отличительной особенностью указанных приближений точных решений является такая запись асимптотического представления решения для понижения пьезометрического уровня ПВ:

$$S(r, t) = \frac{Q(t)}{4T} \ln \frac{2,25}{r^2} t, \quad (1)$$

которая в выражении дебита выпуска содержит только переменную часть вида:

$$Q(t) = \frac{4TS_0}{\ln \frac{2,25}{r_0^2} t}. \quad (2)$$

Это обеспечивает возможность применения графоаналитического метода для интерпретации результатов временного, площадного и комбинированного прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытных кустов [2, 15, 16]. В уравнениях (1) и (2) $S(r, t)$ — понижение пьезометрического напора ПВ в точке водоносного горизонта с координатой r в момент времени t от начала возмущения (выпуска) относительно исходного S^0 ; $Q(t)$ — переменный на протяжении выпуска дебит возмущения; S_0 — заданное постоянное понижение уровня ПВ в возмущающей скважине; T — водопроводимость¹ опробуемого водоносного горизонта; — пьезопроводность горизонта, $\frac{T}{*}$

(здесь * — его упругая ёмкость); r_0 — радиус возмущающей скважины.

Для интерпретации результатов прослеживания понижения пьезометрического уровня ПВ с целью определения фильтрационных и ёмкостных параметров опробуемого выпуском напорного водоносного горизонта в полном соответствии с рекомендациями из [2, 16] понижения уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста приводятся к дебиту возмущения, соответственно уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{S(r, t)}{Q(t)} = \frac{1}{4T} \ln \frac{2,25}{r^2} t. \quad (3)$$

Последняя формула и выступает основой для графоаналитического метода интерпретации индикаторных диаграмм в координатах $\frac{S}{Q(t)} (\lg t)$ по возмущающим и наблюдательным скважинам опытных кустов [2, 16]. Для этого (3) применительно к способу временного прослеживания (в рамках графоаналитического метода) приводится к виду

$$\begin{aligned} \frac{S(r, t)}{Q(t)} &= \frac{0,183}{T} \lg \frac{2,25}{r^2} t \\ &= \frac{0,183}{T} \lg \frac{2,25}{r^2} + \frac{0,183}{T} \lg t = A + C \lg t, \end{aligned} \quad (4)$$

$$C = \frac{0,183}{T}, \quad A = C \lg \frac{2,25}{r^2}.$$

Здесь C — угловой коэффициент асимптотической прямой на индикаторном графике временного прослеживания приведённого понижения уровня ПВ в возмущающей или наблюдательной скважинах; A — начальная ордината этой асимптоты для наблюдательной скважины, отсекаемая на оси $\frac{S}{Q(t)}$ при $\lg t_0 = 0$, т. е. при $t_0 = 1$ в выбранной системе измерений времени.

¹ В настоящей работе используется терминология из статьи В.М. Шестакова [17].

Формулы для расчёта параметров водовмещающих отложений, отвечающие аппроксимации (4), приобретут следующий вид:

$$C = \frac{\frac{S(r_j, t_{i+1})}{Q(t_{i+1})}}{\lg t_{i+1}} - \frac{\frac{S(r_j, t_i)}{Q(t_i)}}{\lg t_i}, \quad (5)$$

$$T = \frac{0,183}{C}, \quad 0,445 \frac{r_j^2}{t_0} 10^{\frac{A}{C}}$$

В уравнениях в (5) $\frac{S(r_j, t_{i+1})}{Q(t_{i+1})}$ и $\frac{S(r_j, t_i)}{Q(t_i)}$ — приведённые понижения уровня ПВ в j -й наблюдательной скважине на расстоянии r_j от центра возмущения соответственно в моменты времени t_{i+1} и t_i от начала опытного выпуска; $j = 0, 1, 2, \dots, n$ (n — число скважин в опытном кусте). Величины $\frac{S(r_j, t_{i+1})}{Q(t_{i+1})}$ и $\frac{S(r_j, t_i)}{Q(t_i)}$, как и при интерпретации результатов прослеживания снижения уровня ПВ при откачке с постоянным дебитом, снимаются с асимптотического прямолинейного участка графика прослеживания, при этом расчётные значения времени подбираются таким образом, чтобы $\lg \frac{t_{i+1}}{t_i} = 1$ [2, 16].

Метод предельно прост и обеспечивает возможность привлечения для интерпретации опытных диаграмм прослеживания приведённого понижения уровня ПВ всей совокупности опытных данных. Его применение на практике санкционировано методическими рекомендациями по определению параметров водоносных горизонтов по данным откачек [2].

Покажем здесь последовательность обработки опытных данных, полученных при выпуске из самоизливающей скважины № 4-АД с наблюдательной скважиной № 3263 на участке разведки ПВ, (т. е. при возмущении с постоянным понижением уровня в возмущающей скважине) и возникающие при такой обработке на первый взгляд непреодолимые затруднения.

Для выполнения ОФО продуктивного туронского водоносного комплекса ($K_2 t$) в пределах Мынбулакского артезианского бассейна сооружен опытный куст скважин, состоящий из возмущающей скважины № 4-АД и наблюдательной № 3263. Скважина № 4-АД на момент проведения ОФО водоносного комплекса имела глубину 218 м, диаметр фильтра 133 мм. Фильтр был установлен в интервалах глубин 191—202 и 208—213 м. На расстоянии 100 м от скважины № 4-АД пробурена скважина № 3263 глубиной на момент проведения ОФО 220 м, диаметр фильтра в этой скважине 168 мм; фильтр был установлен в интервалах глубин 191, 36—203 и 209—214 м.

Кровля комплекса зафиксирована в скважинах № 4-АД и № 3263 на глубине 154 м. Мощность комплекса на участке разведки ПВ составляет 66—70 м, а эффективная — 16,32 м. ПВ комплекса напорные. В скважине № 4-АД в ненарушенных условиях статический уровень ПВ зафиксирован на отметке +11,5 м выше уровня земли, а динамический — на отметке +2,0 м. Иными словами, ОФО водовмещающих отложений выполнялось при самоизливе ПВ на всем протяжении опыта.

Опробуемый водоносный комплекс на участке разведки ПВ схематизирован как изолированный напорный. Влиянием границ в плане при реальной длительности опытного выпуска в 66 ч можно пренебречь.

Опытный выпуск из скважины № 4-АД продолжался 66 ч. На его протяжении по стандартной программе (такая программа приведена, в частности, в [10]) выполнялись замеры динамического уровня ПВ в возмущающей и наблюдательной скважинах куста и дебита выпуска. По завершении выпуска ещё в течение 40 ч в возмущающей и наблюдательной скважинах производились измерения восстановления уровня.

На рис. 1 показан график изменения фактического дебита выпуска и аппроксимирующая кривая, использованная для вычисления значений приведенного понижения уровня $\frac{S(r, t)}{Q(t)}$ как в возмущающей,

так и в наблюдательной скважинах. Согласно этой аппроксимации начальный дебит составил 8,19 дм³/с (или 29,49 м³/ч), а конечный — 6,57 дм³/с (или 23,65 м³/ч).

На рис. 2 представлены индикаторные диаграммы временного прослеживания приведённого понижения уровня ПВ в возмущающей и наблюдательной скважинах опытного куста $\frac{S}{Q(t)} (\lg t)$. Для

построения этих кривых использовались величины понижения уровня, снятые в соответствии с рекомендациями из [6—9] с аппроксимаций опытных графиков прослеживания понижения уровня ПВ в тех же скважинах, а также значения дебита выпуска, соответствующие аппроксимации его графика на рис. 1. На рисунке отчетливо выделены асимптотические участки, отвечающие первой расчётной формуле в (4), и выписаны также уравнения этих асимптот вида $\frac{S(r, t)}{Q(t)} = A + C \lg t$ как для возмущающей,

так и для наблюдательной скважин опытного куста.

Расчёты водопроводимости T выполнялись по второй, а пьезопроводность определялась по третьей формулам в (5), упругая ёмкость водовмещающих отложений $*$ — по формуле

$$* = \frac{T}{\dots} \quad (6)$$

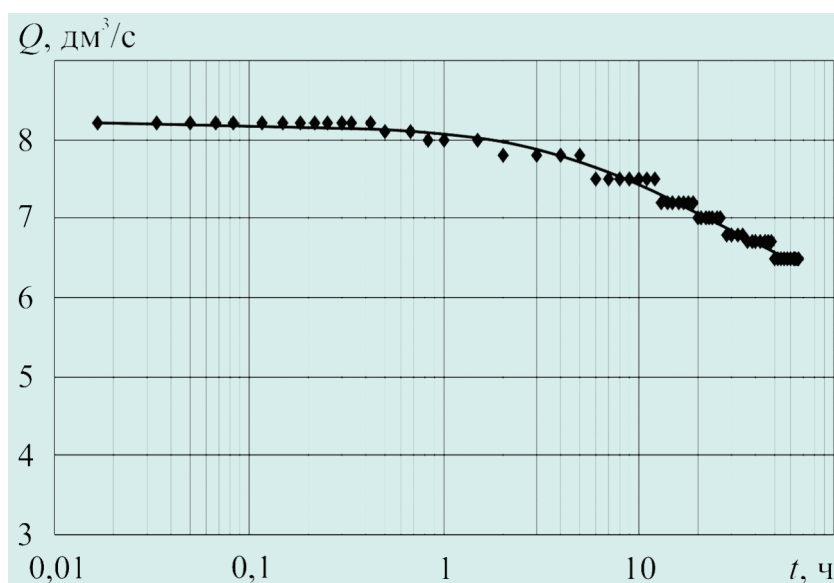


Рис. 1. График изменения дебита выпуска из скважины № 4-АД при возмущении с постоянным понижением уровня в ней

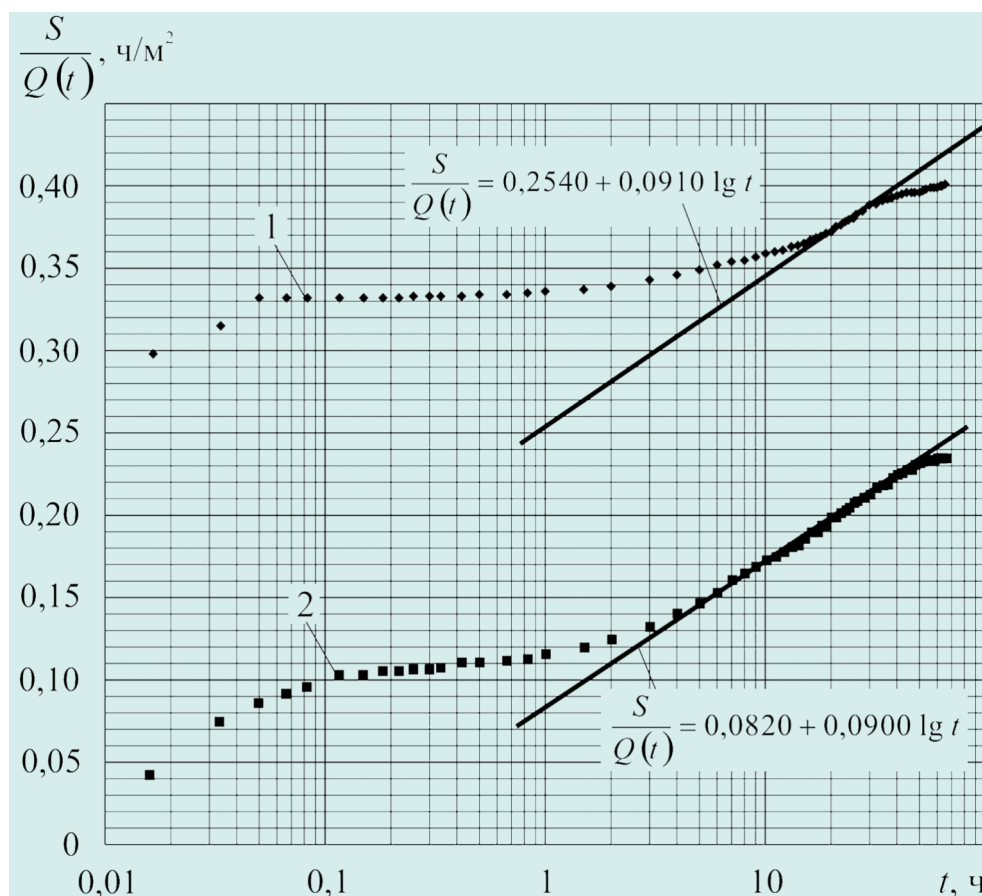


Рис. 2. Индикаторные кривые прослеживания приведённого понижения уровня в возмущающей (1) и наблюдательной (2) скважинах куста № 4-АД при выпуске с постоянным понижением уровня в возмущающей скважине

Результаты вычислений фильтрационных и ёмкостных параметров туронского водоносного комплекса на участке разведки ПВ сведены в таблице.

Изложенный здесь метод с полным основанием можно считать на настоящий момент, пожалуй, единственным теоретически обоснованным из

**Исходные данные опытного выпуска из возмущающей скважины № 4-АД
и результаты расчётов фильтрационных и ёмкостных параметров опробуемого водоносного комплекса**

Номер п/п	Параметры водоносного комплекса и возмущения	Значения параметров по скважинам	
		Возмущающей	Наблюдательной
1	Продолжительность выпуска t_1 , ч	66	66
2	Радиус возмущающей скважины или расстояние до наблюдательной скважины: r_0 , м; r_1 , м	0,065	100,0
3	Угловой коэффициент асимптотического участка графика прослеживания C , ч/м ²	0,0910	0,0900
4	Начальная ордината асимптотического участка графика прослеживания A , ч/м ²	0,2540	0,0820
5	Водопроницаемость T , м ² /ч; м ² /сут.	2,01 48,26	2,03 48,80
6	Пьезопроводность μ , м ² /ч; м ² /сут.		3,63 10 ⁴ 8,70 10 ⁵
7	Упругая ёмкость водовмещающих отложений *		5,61 10 ⁻⁵

числа методов интерпретации опытных данных, полученных при откачках с переменным дебитом, и не содержащим на первый взгляд какие-либо противоречия. Соответственно фильтрационные и ёмкостные параметры водоносных горизонтов, установленные по результатам опытных кустовых выпусков с постоянным понижением уровня в возмущающей скважине, являются вполне представительными и достоверными.

Вместе с тем, согласно следующему критерию [2, 3, 11, 12]:

$$500 \frac{r_j^2}{t_K} \quad (7)$$

(где t_K — контрольное время, по истечении которого аппроксимация (1) или (3) обеспечивают вычисления понижения (или приведенного понижения) уровня ПВ с относительной погрешностью, не превышающей 5 %), получается, что реально логарифмическая аппроксимация вида (3) точного решения задачи может использоваться для интерпретации опытных данных по наблюдательной скважине № 3263, отстоящей от возмущающей на расстояние $r_1 = 100,0$ м, лишь по истечении контрольного времени от начала выпуска $t_K = 5,75$ сут. (или $t_K = 137,9$ ч), а по возмущающей скважине № 4-АД радиусом $r_0 = 0,065$ м — при $t_K = 2,43 \cdot 10^{-6}$ сут. (соответственно $t_K = 5,83 \cdot 10^{-5}$ ч, или $t_K = 0,21$ с).

Иными словами, представленный в [2, 16] графоаналитический метод интерпретации результатов временного прослеживания приведённого понижения пьезометрического уровня ПВ применим в нашем случае исключительно только для обработки опытных данных по возмущающей скважине;

не; при продолжительности выпуска $t_1 = 66$ ч (или $t_1 = 2,75$ сут.) он в принципе не применим для обработки опытных данных по наблюдательной скважине, так как весь выделенный расчетный асимптотический участок на индикаторном графике прослеживания по этой скважине находится за пределами возможного интервала значений времени, в пределах которого этот участок теоретически может существовать.

Таким образом, становится вообще бессмысленным проведение подобных выпусков. Фильтрационные и особенно ёмкостные² параметры водовмещающих отложений в силу неприменимости метода обработки опытных данных по наблюдательным скважинам опытных кустов, на основе которого эти параметры оцениваются, оказываются неопределёнными, их достоверность весьма сомнительной.

Именно поэтому автором и предложено представленное в [4, 5, 11, 12] приближённое решение задачи о возмущении напорного водоносного горизонта с постоянным понижением уровня ПВ в возмущающей скважине вида:

$$S(r, t) = \frac{Q(t)}{2T} \ln \frac{l(t)}{r} - 1 - \frac{r}{l(t)}, \quad (8)$$

$$Q(r, t) = \frac{2TS_0}{\ln \frac{l(t)}{r_0} - 1 - \frac{r_0}{l(t)}}, \quad l^2(t) = 12 \, t,$$

полученное на основе метода интегральных соотношений Г.И. Баренблатта [1]. Одним из важнейших достоинств этого решения является несоизмеримо большая область его приложений в сравнении с рассмотренной выше логарифмической ап-

² Имеется в виду в первую очередь пьезопроводность μ , которая по данным прослеживания понижения уровня ПВ в возмущающей скважине в принципе не определяется.

проксимацией точного решения — критическое время возможности его применения, как показано ранее в [11, 12], оценивается критерием

$$4 \frac{r^2}{t_K} \quad (9)$$

Так, для наблюдательной скважины № 3263 опытного куста № 4-АД из этого критерия следует, что контрольное значение времени, по истечении которого становится действительным приближенное решение, равно $t_K = 1,10$ ч (очевидно, что для возмущающей скважины контрольное время существенно меньше этих 1,10 ч). Соответственно расчётный прямолинейный асимптотический участок индикаторной кривой на рис. 2, аппроксимирующий значения приведённого понижения уровня ПВ на моменты времени, превышающие контрольное t_K , должен обеспечивать вычисление действительных параметров опробуемого водоносного комплекса.

Отсюда очевидна необходимость разработки метода для интерпретации результатов прослеживания понижения пьезометрического уровня ПВ в наблюдательных скважинах опытных кустов при проведении выпусков, базирующегося на этом приближённом решении. Желательно, чтобы этот метод был максимально совместим с графоаналитическим методом, т. е. использовал бы его методические подходы, и, как и графоаналитический метод, обеспечивал бы привлечение для интерпретации всей совокупности опытных данных.

Рассмотрим здесь этот метод подробнее.

Как и в предыдущем случае, в полном соответствии с рекомендациями из [2, 16], понижения уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста приводятся к переменному дебиту возмущения; уравнение для понижения уровня ПВ в этих скважинах (8), преобразуется к виду:

$$\frac{S(r_j, t_i)}{Q(t_i)} = \frac{1}{2T} \ln \sqrt{\frac{12}{r_j^2} t_i} - 1 \sqrt{\frac{r_j^2}{12 t_i}} \quad (10)$$

Формула (10), как и в традиционном, рассмотренном выше, варианте графоаналитического метода обработки данных прослеживания приведённого понижения уровня ПВ из [2, 16], описывает расчётный прямолинейный асимптотический участок индикаторного графика прослеживания в координатах $\frac{S}{Q(t)}(\lg t)$ и является основой для интерпретации индикаторных диаграмм по возмущающей и наблюдательным скважинам опытного куста. Для этого (10) применительно к способу временного прослеживания (в рамках графоаналитического метода) приводится к виду, полностью

аналогичному первому уравнению из (4). Соответственно параметры расчётного асимптотического участка (угловой коэффициент C и начальная ордината A этой асимптоты, отсекаемая на оси $\frac{S}{Q(t)}$

при $\lg t_0 = 0$, т. е. при $t_0 = 1$ в выбранной системе измерений времени) должны обеспечить вычисление фильтрационных и ёмкостных параметров опробованного водоносного горизонта.

Уравнения для расчёта водопроводимости T водовмещающих отложений, отвечающие (10) и первому и второму выражениям в (5), приобретут следующий вид:

$$C = \frac{\frac{S(r_j, t_{i+1})}{Q(t_{i+1})} - \frac{S(r_j, t_i)}{Q(t_i)}}{(\lg t_{i+1} - \lg t_i) - 0,2508 \sqrt{\frac{r_j^2}{t_i} - \frac{1}{\sqrt{t_i}} - \frac{1}{\sqrt{t_{i+1}}}}}, \quad (11)$$

$$T = \frac{0,183}{C}.$$

Следуя далее логике графоаналитического метода обработки опытных данных, запишем уравнение для приведённого понижения пьезометрического уровня в момент времени $t_0 = 1$ (в выбранной системе измерений времени) —

$$\frac{S(r_j, t_0)}{Q(t_0)} = A - \frac{1}{2T} \ln \sqrt{\frac{12}{r_j^2} t_0} - 1 \sqrt{\frac{r_j^2}{12 t_0}}.$$

Преобразования его с учётом второго выражения в (11) даёт

$$A - C \lg 0,2508 \sqrt{\frac{1}{t_0} \frac{r_j^2}{r_j^2}} - 2 \lg r_j = 0,2107. \quad (12)$$

Полученные соотношения (11) и (12) не обеспечивают в явном виде выражение фильтрационных и ёмкостных параметров опробуемого комплекса через геометрические параметры расчётной асимптоты. Так, величина углового коэффициента C не только определяет водопроводимость T , но и в свою очередь определяется значением пьезопроводности, входящей в вычитаемое в знаменателе первой формулы в (11). А та, как известно, прямо обусловлена водопроводимостью.

Таким образом, создаётся замкнутый круг — угловой коэффициент C не только определяет водопроводимость, но определяется ей. Точно так же величина начальной ординаты A расчётной асимптоты, как следует из (12), обусловлена не только пьезопроводностью, но и значением углового коэффициента C той же асимптоты, который в свою очередь зависит от пьезопроводности водовмещающих отложений.

Выход из такой ситуации обеспечивает метод вычисления фильтрационных и ёмкостных параметров опробованного водоносного горизонта, включающий традиционный графоаналитический, дополненный возможностями метода подбора. При этом весьма удобно вычисление искомых параметров с использованием электронной таблицы MS Excel, которая кроме всего прочего позволяет отстраивать график прослеживания в координатах $\frac{S}{Q(t)}(\lg t)$ и выводить на формируемый рисунок уравнение логарифмического тренда вида (4) — см. рис. 2, сформированный именно таким способом.

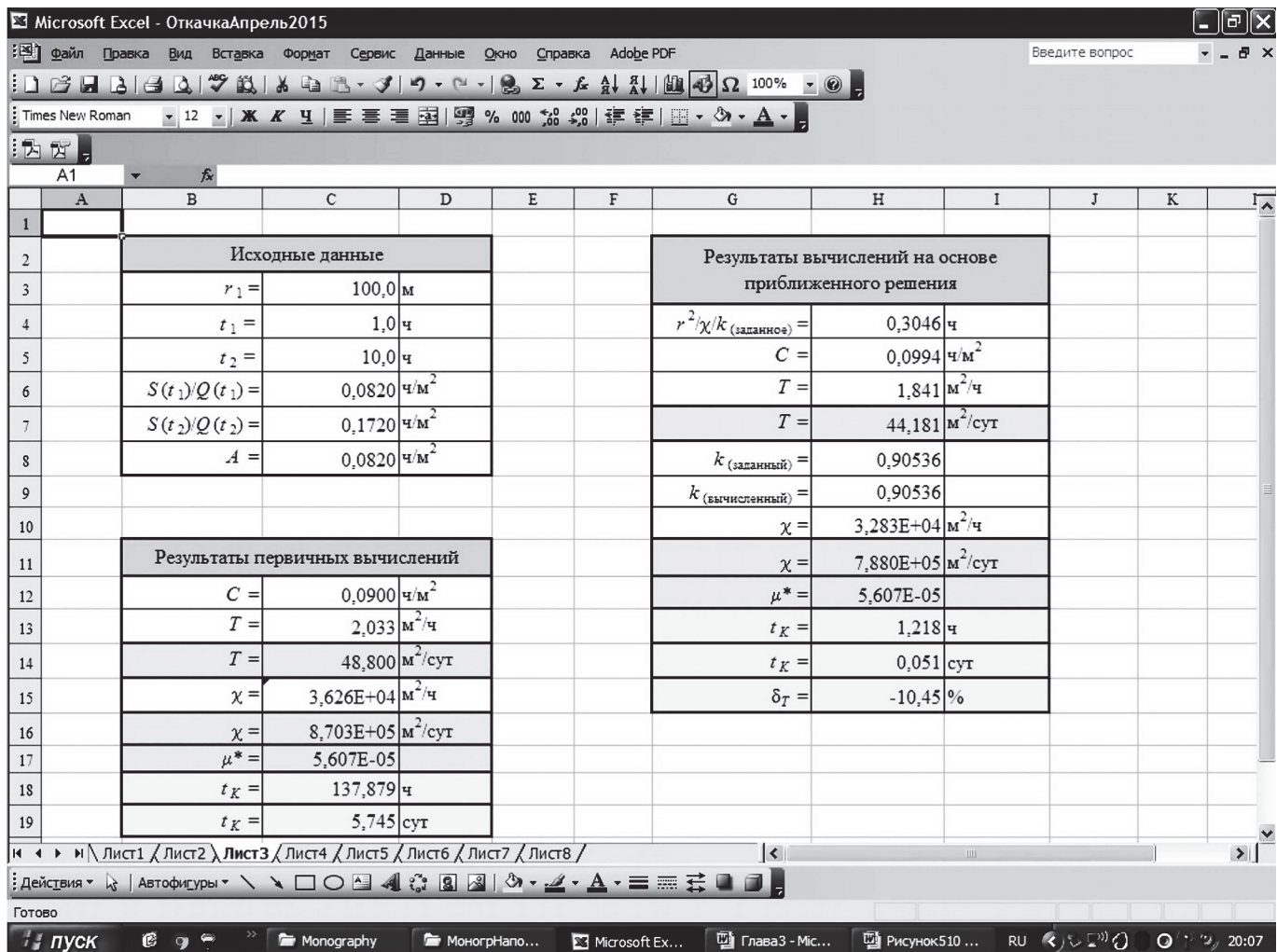
Обработка и интерпретация результатов временного прослеживания приведённого понижения пьезометрического уровня в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста выполняется в несколько этапов.

Первичная обработка индикаторных кривых прослеживания выполняется точно так же, как это было проделано ранее с учётом рекомендаций из [6–9]. В результате этой обработки с использова-

нием возможностей электронной таблицы MS Excel устанавливаются логарифмические тренды расчетных асимптотических участков графиков временного прослеживания по наблюдательным и возмущающей скважинам и их уравнения. Соответственно при последующей обработке опытных данных используются расчётные значения приведённого понижения пьезометрического уровня на назначенные моменты времени, вычисленные на основе уравнений этих трендов.

Результаты обработки опытных данных по каждой наблюдательной скважине опытного куста на первом этапе вводятся в соответствующие ячейки на странице электронной таблицы. Сюда, как исходные данные, заносятся значения расстояния от центра возмущения до назначенной наблюдательной скважины опытного куста r_j , выбранных расчётных моментов времени t_1 и t_2 , отвечающие этим моментам величины $\frac{S(t_1)}{Q(t_1)}$ и $\frac{S(t_2)}{Q(t_2)}$, рассчитанные по

уравнениям тренда расчетной асимптоты, а также начальной ординаты A этой асимптоты. Как ре-



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1											
2		Исходные данные				Результаты вычислений на основе приближенного решения					
3		$r_1 =$	100,0	м		$r^2/\chi/k$ (заданное) =	0,3046	ч			
4		$t_1 =$	1,0	ч		$C =$	0,0994	ч/м ²			
5		$t_2 =$	10,0	ч		$T =$	1,841	м ² /ч			
6		$S(t_1)/Q(t_1) =$	0,0820	ч/м ²		$T =$	44,181	м ² /сут			
7		$S(t_2)/Q(t_2) =$	0,1720	ч/м ²		k (заданное) =	0,90536				
8		$A =$	0,0820	ч/м ²		k (вычисленное) =	0,90536				
9						$\chi =$	3,283E+04	м ² /ч			
10						$\chi =$	7,880E+05	м ² /сут			
11		Результаты первичных вычислений					$\mu^* =$	5,607E-05			
12		$C =$	0,0900	ч/м ²			$t_K =$	1,218	ч		
13		$T =$	2,033	м ² /ч			$t_K =$	0,051	сут		
14		$T =$	48,800	м ² /сут			$\delta_T =$	-10,45	%		
15		$\chi =$	3,626E+04	м ² /ч							
16		$\chi =$	8,703E+05	м ² /сут							
17		$\mu^* =$	5,607E-05								
18		$t_K =$	137,879	ч							
19		$t_K =$	5,745	сут							

Рис. 3. Страница электронной таблицы с расчётами фильтрационных и ёмкостных параметров опробованного опытным выпуском туронского водоносного комплекса по данным прослеживания приведённого понижения пьезометрического уровня в наблюдательной скважине № 3263 опытного куста № 4-АД

зультаты первичных расчётов на страницу заносятся вычисленные: по первой формуле (5) значение углового коэффициента расчётной асимптоты C ; по второй формуле в (5) — водопроницаемости T ; по третьей формуле в (5) — пьезопроводности β ; и, наконец, по формуле (6) — упругой ёмкости α .

Такая страница электронной таблицы с исходными данными и результатами первичных расчётов по наблюдательной скважине № 3263 опытного куста представлена на рис. 3. Очевидно, что все исходные данные и результаты первичных расчётов полностью совпадают с аналогичными данными и результатами расчётов фильтрационных и ёмкостных параметров туронского водоносного комплекса, приведенными в таблице.

Для выполнения вычислений параметров на втором этапе в ячейку Н4 электронной таблицы на рис. 3 вводится значение комплексного параметра $\frac{r_j^2}{k}$, в котором k — коэффициент, учитывающий отношение величин водопроницаемости, установленных на втором (T_{II}) и первом (T_I) этапах обработки опытных данных, т. е.

$$k = \frac{T_{II}}{T_I}. \quad (13)$$

Этот коэффициент позволяет автоматически уточнять пьезопроводность в зависимости от уточнённого по результатам вычислений на втором этапе значения водопроницаемости T_{II} . Такая возможность уточнения определяется известным простым соотношением (6), согласно которому пьезопроводность прямо пропорционально зависит от водопроницаемости.

Ясно, что на начальном шаге вычислений величина коэффициента k не известна. Поэтому на этом шаге в ячейку Н8 электронной таблицы вводится начальное значение $k = 1$ (на странице электронной таблицы на рис. 3 оно обозначено как «заданное»).

Далее по первой формуле в (11) рассчитывается уточнённая величина углового коэффициента расчётной асимптоты C и заносится в ячейку Н5 электронной таблицы, а с учётом этой величины по второй формуле в (11) — уточнённая водопроницаемость T_{II} (см. ячейки Н6 и Н7 электронной таблицы на рис. 3).

Теперь имеется возможность уже вычисления (а не задания, как в ячейку Н8 электронной таблицы) коэффициента k на основе того же соотношения (13). Полученное значение помещается в ячейку Н9 электронной таблицы (оно обозначено как «вычисленное»); им завершается начальный шаг вычислений.

Для инициации второго и последующих шагов вычислений фильтрационных и ёмкостных параметров опробованного туронского водоносного

комплекса (как и любого водоносного горизонта) на втором этапе необходимо в ячейку Н8 задать уже эту рассчитанную на предыдущем шаге величину коэффициента k . При этом начиная со второго шага вычислений выполняется уточнение пьезопроводности водовмещающих отложений, согласно уравнениям:

$$k, \frac{T_{II}}{\alpha}, k \frac{T_I}{\alpha}; \quad (14)$$

рассчитанные значения пьезопроводности помещены в ячейки Н10 и Н11 электронной таблицы на рис. 3. Из этих уравнений следует также, что единственной постоянной величиной на всех этапах обработки и интерпретации результатов прослеживания приведённого понижения уровня ПВ в наблюдательной скважине № 3263 опытного куста № 4-АД является упругая ёмкость туронского водоносного комплекса (ср. значения упругой ёмкости α в ячейках С17 и Н12 электронной таблицы).

Такая процедура повторяется до совпадения «заданного» и «вычисленного» значений коэффициента (в соседних ячейках электронной таблицы Н8 и Н9) с точностью до четвертого знака после запятой.

Как следует из страницы электронной таблицы на рис. 3, уточнённое значение водопроницаемости оказывается примерно в 1,1 раза (точнее на 10,45 % по отношению к этому уточнённому значению) меньшим водопроницаемости, установленной с использованием графоаналитического метода, рекомендованного для этой цели в методической литературе [2, 16]. Точно так же в 1,1 раза оказалась меньшей пьезопроводность.

С учётом этой уточнённой величины пьезопроводности, равной, как это следует из рис. 3, $\beta = 7,88 \cdot 10^5$ м²/сут., получаем, что для наблюдательной скважины № 3263 опытного куста из критерия (9) следует — контрольное значение времени, по истечении которого становится действительным приближённое решение, равно $t_K = 0,051$ сут. (или $t_K = 1,22$ ч) — см. рис. 3. Соответственно, как указывалось ранее, расчётный прямолинейный асимптотический участок индикаторной кривой на рис. 2, безусловно, обеспечивает вычисление действительных параметров опробованного туронского водоносного комплекса.

Итак, в настоящей работе представлен авторский метод вычисления фильтрационных и ёмкостных параметров водоносных горизонтов и комплексов по результатам прослеживания приведённого понижения пьезометрического уровня в возмущающих и наблюдательных скважинах опытных кустов при проведении опытных выпусков. Метод проиллюстрирован примером обработки и интерпретации опытных данных, полученных в процессе проведения опытного выпуска из скважины № 4-АД.

Он основывается на приближённом решении задачи фильтрации ПВ при таких выпусках, полученном автором. Алгоритм предполагает использование графоаналитического метода, дополненного элементами метода подбора, с реализацией на базе электронной таблицы MS Excel.

Подчеркнём еще раз, основное значение предложенного здесь метода в том, что он обеспечивает возможность обработки и интерпретации опытных данных, полученных при опытных выпусках реальной продолжительности. Как уже отмечалось ранее, согласно критерию (7), для наблюдательной скважины № 3263 опытного куста № 4-АД контрольное значение времени от начала возмущения,

по истечении которого становится возможным использование графоаналитического метода обработки в его традиционной постановке [2, 16], составляет $t_k = 5,75$ сут. при реальной продолжительности возмущения 2,75 сут. Приближённое же решение (8) и базирующийся на нём авторский метод обработки применимы для несоизмеримо меньших значений критического времени; последнее, согласно критерию (9), составляет, например, для наблюдательной скважины № 3263 лишь $t_k = 1,22$ ч. Это контрольное время полностью отвечает расчетной асимптоте на индикаторном графике временного прослеживания приведённого понижения пьезометрического уровня в скважине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г.И. О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1954. № 9. С. 35–49.
2. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 327 с.
3. Бочеввер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 328 с.
4. Бураков М.М. Фильтрация к скважине с частичным осушением напорного пласта вблизи нее // Редкол. ж. «Вестник АН КазССР». 1984. 25 с. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 3301-84 Деп.
5. Бураков М.М. Исследование водоотбора в неоднородных по фильтрационным и емкостным свойствам водоносных пластах (на примере месторождений Центрального Казахстана). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Алма-Ата, 1987. 195 с.
6. Бураков М.М. Об оценке достоверности фильтрационных параметров // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 5. С. 539–547.
7. Бураков М.М. Об оценках достоверности фильтрационных и емкостных параметров, полученных по данным прослеживания восстановления уровня подземных вод // Гидрометеорология и экология. 2005. № 2. С. 153–170.
8. Бураков М.М. Методические основы оценок случайных погрешностей фильтрационных и емкостных параметров водоносных горизонтов. Алматы: «ProService LTD», 2007. 74 с.
9. Бураков М.М. Случайные погрешности параметров слоистых водоносных систем, установленных по данным откачек. Алматы: «ProService LTD», 2007. 112 с.
10. Бураков М.М. Опытные откачки из слоистых водоносных систем с перетеканием. Методы интерпретации результатов. Saarbrücken: LAP, 2014. 145 с.
11. Бураков М.М. Теоретические и методические проблемы интерпретации результатов опытных откачек с переменным дебитом. Алматы: Apple-print, 2017. 132 с.
12. Бураков М.М. Возмущение с постоянным понижением уровня подземных вод в возмущающей скважине // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 3.
13. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков. М.: Недра, 1977. 272 с.
14. Грабовников В.А., Самсонов Б.Г. Опробование водоносных пластов групповыми выпусками // Экспресс-информация. ВИЭМС. Серия VIII. Гидрогеология и инженерная геология. 1974. В. 2. С. 1–14.
15. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 328 с.
16. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006. 796 с.
17. Шестаков В.М. Вопросы терминологии в гидрогеодинамике // Водные ресурсы. 1984. Т. 8. № 5. С. 156–159.
18. Jacob C.E., Lohman S.W. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer // Transactions. American Geophysical Union. 1952. Vol. 33. P. 559–569.
19. Jaeger J.C. Numerical values for the temperature in radial heat flow // Journal of Mathematics and Physics. 1956. Vol. 34. № 4. P. 316–321.