

УДК 556.332.4.042

**МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОПРОБОВАНИЯ
СЛОИСТЫХ ТОЛЩ ПРИ ОЦЕНКАХ ТЕХНОГЕННОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ**

Канд. геол.-минер. наук

М.М. Бураков

Предлагается методика проведения и интерпретации результатов опытных откачек из слоистых толщ для случая, когда наибольшую водопроницаемостью имеет верхний слой. Рассмотрен вариант комплексирования опытных откачек с индикаторными опытами.

В условиях аридного климата на большей части территории Казахстана практически единственным надежным источником хозяйственно-питьевого, технического, а часто и сельскохозяйственного водоснабжения являются подземные воды. Последние представляют собой один из важнейших элементов геоэкологических систем, часть которых (эколого-гидрогеологические) целиком определяются режимом и качеством подземных вод. Актуальной проблемой, поэтому становится оценка техногенного воздействия на них.

Объекты поисково-разведочных гидрогеологических работ для хозяйственно-питьевого водоснабжения, мелиоративного строительства, осушения месторождений твердых полезных ископаемых и оценки воздействия инженерных мероприятий на подземные воды характеризуются существенной неоднородностью фильтрационных разрезов, знание и учет которой в значительной мере определяет достоверность инженерных расчетов и прогнозов. В специальной литературе большое внимание уделено исследованию фильтрации в слоистых толщах при наличии перетекания через слой слабопроницаемых отложений (или подтока воды из него) и при условии возмущения скважиной одного из проницаемых пластов (обзор решений такой задачи дан, например, Т.Н. Плугиной [14]). В ряде работ ([8, 19]) рассмотрены решения задачи о фильтрации к скважине, вскрывшей несколько (два и более) водоносных слоев, разделенных непроницаемыми отложениями; слои взаимодействуют между собой только через ствол возмущающей и наблюдательной скважин.

Вместе с тем, значительные трудности возникают при обосновании гидрогеологических параметров, принимаемых для расчета водоотбора, по

результатам опытных откачек из слоистых толщ в случае, когда возмущающей скважиной вскрываются несколько водоносных слоев, отличающихся проводимостью, хотя такие условия фильтрации подземных вод на практике далеко не составляют исключения. Так, к орошаемым межгорным долинам рр. Чирчик и Ахангаран в окрестностях Ташкента приурочены крупные месторождения грунтовых вод. В разрезе водоносного пласта по проницаемости выделяются два или три слоя [1, 13, 15]. Наибольшим коэффициентом фильтрации ($K \geq 200$ м/сут) характеризуется верхний слой. Мощность его преимущественно 3-5 м, иногда достигает 10-16 м. Ниже по разрезу вскрываются галечники мощностью до 30 м с $K = 50-70$ м/сут. Последние часто подстилаются водоносными отложениями мощностью 30-40 м, для которых $K = 15-25$ м/сут. Такие же фильтрационные разрезы характерны для конусов выноса в предгорье Зайлийского Алатау.

Многослойной толщей могут быть представлены и трещинные водоносные пласты. Например, на рудном месторождении Коктенколь в Центральном Казахстане [5] в разрезе водоносного пласта по данным термометрии при откачках из 22 разведочных скважин и продолжительного водоотлива из разведочной шахты выделено (в определенной мере условно) 4 слоя с более или менее постоянными по глубине фильтрационными параметрами.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод, водопритоков в горные выработки из слоистых толщ в расчет водоотбора вводится обычно обоснованная по результатам опытно-фильтрационного опробования (ОФО) величина водопроводимости T , которая представляет собой сумму водопроводимостей всех слоев. На практике же понижение уровня на контуре водозабора часто превышает мощность верхнего (хорошо проницаемого) слоя, и характеристики водоотбора обусловлены в основном проницаемостью нижнего слоя, имеющей значительно меньшую величину по сравнению со средневзвешенной. Такой подход к оценке водоотбора приводит к его завышению, т.е. к низкой оправдываемости гидрогеологических прогнозов [13]. В этом случае существенно повышаются требования к обоснованности и достоверности методики проведения опытных откачек и расчета по их результатам необходимых для прогнозирования водозабора из слоистых толщ гидрогеологических параметров: коэффициентов фильтрации, водопроводимости и емкости проницаемых слоев. Однако разработанной методики проведения и интерпретации ОФО в литературе не имеется [15].

Рассмотрим в рамках гидравлической модели движения жидкости задачу о притоке воды с постоянным дебитом Q к скважине, вскрывшей двухслойный водоносный пласт. Фильтрацию будем считать изотермической, подчиняющейся линейному закону сопротивления. Примем также, что влиянием границ пласта в плане на протяжении возмущения можно пренебречь, а мощность капиллярной каймы для отложений обоих слоев одинакова, причем приток из нее мал в сравнении с расходом потока из

зоны полного насыщения. Решение будем искать с использованием одного из наиболее общих и гибких приближенных методов – метода интегральных соотношений [2], обеспечивающего решение задачи применительно к ряду схем течения, для которых точные решения не существуют, а также высокую точность расчетов фильтрации подземных вод.

В зависимости от строения слоистой толщи и характеристик возмущения выделяются три схемы течения подземных вод к возмущающей скважине:

- верхний слой значительной мощности; уровень подземных вод на протяжении возмущения остается в пределах этого слоя;
- верхний слой значительной мощности; за период времени, соизмеримый с продолжительностью возмущения, уровень подземных вод в скважине и вблизи нее сбавляется ниже подошвы верхнего слоя;
- верхний слой небольшой мощности; уровень подземных вод в скважине сбавляется ниже подошвы этого слоя практически сразу же с пуском откачки.

Постановка задачи для первой схемы течения следующая. Проницаемые слои вскрыты гидродинамически совершенной скважиной. Взаимодействие слоев выражается тем, что в процессе возмущения депрессионные кривые по ним полностью совпадают; радиусы условной области влияния возмущения обуславливаются емкостью верхнего слоя, так как депрессия формируется только в нем. Задача сводится к отысканию понижения уровня в возмущающей скважине и за ее пределами, а также функций дебитов из проницаемых слоев.

Понижение уровня в водоносных слоях должно удовлетворять дифференциальным уравнениям (с учетом линеаризации исходного, описывающего фильтрацию воды в верхнем слое, способом Л.С. Лейбензона, Н.А. Багрова, Н.Н. Веригина)

$$a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_1}{\partial t}, \quad a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_2}{\partial t}, \quad (1)$$

при следующих начальном,

$$h_1(r, 0) = h_2(r, 0) = h_0, \quad (2)$$

и краевых условиях –

$$h_1(r, t) = h_2(r, t), \quad Q_1(r_0, t) + Q_2(r_0, t) = Q = const, \quad (3)$$

$$\frac{\partial h_1[L(t), t]}{\partial r} = \frac{\partial h_2[L(t), t]}{\partial r}, \quad h_1[L(t), t] = h_2[L(t), t] = h_0. \quad (4)$$

Здесь $u_1 = h_1^2$; $u_2 = mh_2$; h_1 и h_2 – напоры соответственно в верхнем и нижнем слоях на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала возмущения, отсчитываемые от кровли нижнего слоя; m – мощность нижнего слоя; h_0 – мощность потока в верхнем слое до начала

возмущения; $a = \frac{T}{\mu_1}$ – уровеньпроводность пласта, а μ_1 – емкость верхнего слоя; $Q_1(r_0, t)$ и $Q_2(r_0, t)$ – расходы потоков воды из проницаемых слоев; $L(t)$ – длина условной области влияния возмущения.

Распределение функций $u_1(r, t)$ и $u_2(r, t)$ в соответствии с общим правилом, изложенным в работе [2], возьмем в виде

$$\begin{aligned} u_1 &= b(t) \ln \frac{r}{L(t)} + b_0(t) + b_1(t) \frac{r}{L(t)}, \\ u_2 &= p(t) \ln \frac{r}{L(t)} + p_0(t) + p_1(t) \frac{r}{L(t)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $b_i(t)$ и $p_i(t)$ – коэффициенты, зависящие от времени. Для их отыскания воспользуемся условиями непрерывности расходов и напоров на внешней границе области возмущения (4), которые применительно к напорным функциям преобразуются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_1[L(t), t] &= h_0^2, \quad u_2[L(t), t] = mh_0, \\ \frac{\partial u_1[L(t), t]}{\partial r} &= 2 \frac{\partial u_2[L(t), t]}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

На внутренней границе области течения (боковой поверхности скважины) должны выполняться очевидные условия:

$$\pi K_1 r \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = Q_1(r_0, t), \quad 2\pi K_2 r \frac{\partial u_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = Q_2(r_0, t), \quad (7)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты фильтрации соответственно верхнего и нижнего слоев.

Условия (6) и (7) приводят выражения в (5) к виду

$$\begin{aligned} u_1(r, t) &= h_0^2 + \frac{Q_1(r_0, t)}{\pi K_1} \left[\ln \frac{r}{L(t)} + 1 - \frac{r}{L(t)} \right], \\ u_2(r, t) &= mh_0 + \frac{Q_2(r_0, t)}{2\pi K_2} \left[\ln \frac{r}{L(t)} + 1 - \frac{r}{L(t)} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Выразив в этих уравнениях функции $u_1(r, t)$ и $u_2(r, t)$ через понижения уровня $S_1(r, t)$ и $S_2(r, t)$, решив уравнения относительно $Q_1(r_0, t)$ и $Q_2(r_0, t)$ и подставив их во второе выражение из (3), получаем

$$\begin{aligned} S(r, t) &= \frac{Q}{2\pi \left[\left(h_0 - \frac{S}{2} \right) K_1 + T_2 \right]} \left[\ln \frac{L(t)}{r} - 1 + \frac{r}{L(t)} \right], \\ S(r, t) &= S_1(r, t) = S_2(r, t). \end{aligned} \quad (9)$$

Представим теперь функции $Q_1(r_0, t)$ и $Q_2(r_0, t)$ через дебит возмущения и параметры водоносного пласта. Для этого приведем уравнения в (5) к исходным переменным и с учетом условий (4) преобразуем их следующим образом:

$$h_1(r, t) = h_0 + b'(t) \left[\ln \frac{r}{L(t)} + 1 - \frac{r}{L(t)} \right],$$

$$h_2(r, t) = h_0 + p'(t) \left[\ln \frac{r}{L(t)} + 1 - \frac{r}{L(t)} \right].$$

Для определения вида функций $b'(t)$ и $p'(t)$ воспользуемся условиями (3), а также приведенными к исходным переменным (7), которые позволяют составить систему

$$\left. \begin{aligned} b'(t) &= p'(t) \\ T_1 b'(t) + T_2 p'(t) &= \frac{Q}{2\pi} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $T_1 = K_1 \left(h_0 - \frac{S}{2} \right)$. С другой стороны, $b'(t) = \frac{Q_1(r_0, t)}{2\pi T_1}$ и $p'(t) = \frac{Q_2(r_0, t)}{2\pi T_2}$.

Тогда из (10) имеем окончательно

$$Q_1(r_0, t) = \frac{QT_1}{T}, \quad Q_2(r_0, t) = \frac{QT_2}{T}, \quad T = T_1 + T_2. \quad (11)$$

Воспользовавшись последним выводом, найдем вид функции $L(t)$. Подставим в первое интегральное соотношение – уравнение материального баланса (по Баренблатту [2]), вытекающее, например, из первого уравнения системы (1), зависимость (8) для $u_1(r, t)$ и условия (6) и (7). После несложных преобразований получаем, что $L^2(t) = 12at$. Обобщенная величина водопроницаемости, входящая в выражение уровнеступности a , в соответствии с (9) и (11) равна сумме водопроницаемостей проницаемых слоев.

Приведенное решение не учитывает упругие свойства водоносного пласта и вертикальное сопротивление потоку. Контрольное время соответствия его реальным условиям оценивается выражением [17]

$$t \geq (5 + 10) \frac{h_0 \mu_1}{K_z},$$

где K_z – коэффициент фильтрации верхнего слоя по вертикали. Применительно к схеме течения в двухслойной толще, когда высокопроницаемый слой залегает сверху, контрольное время становится относительно малым и принятая на практике продолжительность опытных откачек обеспечивает возможность получения на графиках прослеживания понижения уровня асимптотического участка, отвечающего приведенному решению.

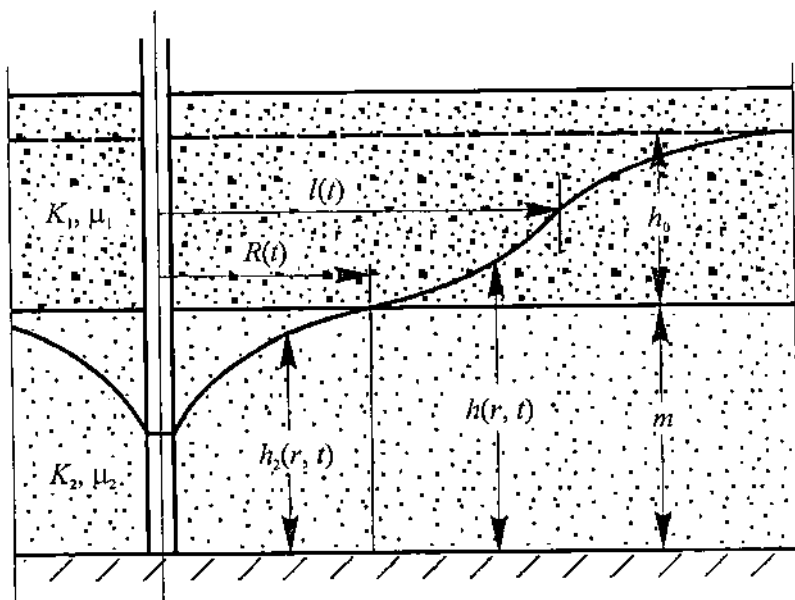


Рис. Схема фильтрации подземных вод к скважине в двухслойной толще

Использование последнего не требует внесения существенных корректив в стандартную методику расчета параметров водоносного пласта [3]. В соответствии с ней по результатам прослеживания оцениваются величины T , a и μ_1 . Данные расходомерии возмущающей скважины позволяют дифференцировать приток подземных вод в нее по вертикали, откуда на основе соотношений (11) вычисляются водопродимости проницаемых слоев T_1 и T_2 .

Возмущение применительно ко второй схеме течения подземных вод развивается в два этапа. Постановка задачи и ее решение для первого этапа остаются такими же, как и в первом случае; по результатам прослеживания уровня на первом этапе оцениваются водопродимность водоносного пласта T , уровнепродность a и емкость верхнего слоя μ_1 .

Фильтрация в двухслойной толще на втором этапе, при $t > t_0$, т.е. когда уровень подземных вод вблизи возмущающей скважины опускается ниже границы слоев (см. рис.), описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$a_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial h_2}{\partial t}, \quad r \leq R(t), \quad (12)$$

$$\alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad R(t) \leq r \leq l(t). \quad (13)$$

Вновь введенные обозначения здесь ясны из рис., остальные обозначения прежние.

Уравнения (12) и (13) должны быть решены при следующих краевых условиях:

$$\begin{aligned} r \frac{\partial h_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0} &= \frac{Q}{2\pi T_2}, \\ h[R(t), t] &= h_2[R(t), t] = m, \quad \frac{\partial h[R(t), t]}{\partial r} = \frac{\partial h_2[R(t), t]}{\partial r}, \\ h[l(t), t] &= H_0, \quad \frac{\partial h[l(t), t]}{\partial r} = 0. \end{aligned}$$

Отыскание решения подобной задачи возможно только на основе приближенных методов. Как показал В.К. Мамонтов [11] для сходной по постановке задачи, на использование метода интегральных преобразований по Лапласу или Лапласу-Карсону накладывается то ограничение, что на момент времени t_0 перехода уровня подземных вод на внутреннем контуре возмущения через границу раздела слоев не существует изображения потенциальной функции. Точно так же, на представление решения в каждой зоне течения в виде функций [6]

$$S_i(r, t) = A_i \cdot E_1 \left(\frac{r^2}{4a_i t} \right) + B_i, \quad (14)$$

в которых E_1 – интегральная показательная функция; A_i и B_i – постоянные; $i = 1, 2, \dots, n$ (где n – число выделенных зон фильтрации), – накладывается условие постоянства расходов из этих зон. Это условие (в виде $\frac{t-t_0}{t} \cong 1$) приближенно выполняется по истечении значительного времени. При реальной продолжительности откачек по второй схеме течения оно в большинстве случаев не позволяет использовать представление решения в виде (14).

Приближенное решение сходной задачи приведено в работе [10]. Применительно к поставленной здесь задаче оно может быть преобразовано так:

$$\begin{aligned} S_1(r, t) &= \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{L(t)}{r} - 1 + \frac{r}{L(t)} \right] + \frac{Q_2(t)}{2\pi T_2} \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \\ &\quad R(t) \leq r \leq l(t), \\ S_2(r, t) &= \frac{Q}{2\pi T_2} \ln \frac{R(t)}{r} + \frac{Q_2(t)}{2\pi T_2} \left[1 - \frac{r}{R(t)} \right], \quad r \leq R(t), \end{aligned}$$

$$\frac{Q_2(t)}{2\pi T_2} = \frac{h_0}{\alpha(t)} - \frac{Q}{2\pi T_2} \frac{\beta(t)}{\alpha(t)},$$

$$\alpha(t) = \ln \frac{l(t)}{R(t)} - 1 + \frac{R(t)}{l(t)}, \quad \beta(t) = \ln \frac{L(t)}{R(t)} - 1 + \frac{R(t)}{L(t)}, \quad (15)$$

$$l^2(t) = 12a(t-t_0) + R^2(t), \quad R^2(t) = \lambda a_2(t-t_0). \quad (16)$$

Здесь понижение уровня $S(r, t)$ отсчитывается от статического уровня H_0 , а $S_2(r, t)$ – от отметки границы раздела слоев.

Величина λ во втором уравнении (16) на выбранный момент времени определяется выражением

$$\lambda = 12 \left[\frac{\beta \frac{Q}{2\pi T_2} - h_0}{\alpha \frac{Q}{2\pi T_2} \left(3 - 2 \frac{\beta}{\alpha} \right) + 2h_0} \right]. \quad (17)$$

Применительно к нуждам интерпретации результатов ОФО в двухслойной толще прослеживание уровня на втором этапе обеспечивает возможность, в дополнение к уже оцененным по данным первого этапа параметрам, определения емкости нижнего слоя. Порядок обработки опытных данных при этом следующий.

1. На графике прослеживания уровня в любой наблюдательной скважине, отстоящей на расстояние r , от возмущающей, определяется момент времени t , снижения уровня до границы раздела слоев, так что

$$r_i^2 = \lambda a_2(t-t_i).$$

2. По известным значениям a , t_0 и t_i определяются радиусы зон течения:

$$L^2(t_i) = 12at_i, \quad l^2(t-t_0) = 12a(t-t_0) + r_i^2, -$$

и из уравнения (15) рассчитываются параметры α и β .

3. Подстановка последних в уравнение (17) с учетом данных первого этапа опыта, обеспечивающих оценку величины $\frac{Q}{2\pi T_2}$, позволяет вычис-

лить параметр λ . С учетом его значения несложно оценить из (16) уровень проводности и емкость нижнего слоя.

Необходимо отметить, что достоверность и точность определения емкости нижнего слоя по представленной методике лимитируется, главным образом, точностью оценки фильтрационных и емкостных параметров толщи на первом этапе возмущения, например, графоаналитическим методом. Иными словами, эта методика хорошо стыкуется со стандартными методами интерпретации ОФО.

При анализе фильтрации по *третьей* схеме полагается, что с пуском откачки уровень в возмущающей скважине практически мгновенно сраба-

тывается ниже границы раздела слоев. Вблизи скважины депрессионная воронка формируется в нижнем слое (внутренняя зона), а в удалении от нее воронка формируется в верхнем слое (внешняя зона). Граница между зонами фиксируется линией пересечения уровенной поверхностью подземных вод поверхности раздела слоев и постепенно удаляется от возмущающей скважины.

Математическая постановка задачи применительно к этой схеме течения остается такой же, что и для второго этапа предыдущей схемы: при $t > 0$ фильтрация описывается системой дифференциальных уравнений (12) и (13) с теми же краевыми условиями.

В статье [18] приведено автомодельное решение задачи в сходной постановке, а в [4, 9] показано приближенное решение такой же задачи, полученное с использованием метода интегральных соотношений. Для принятой здесь схемы течения приближенное решение преобразуется следующим образом:

$$S(r,t) = \frac{h_0}{\alpha} \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad R(t) \leq r \leq l(t), \quad (18)$$

$$S_2(r,t) = \frac{Q}{2\pi T_2} \left[\ln \frac{R(t)}{r} - 1 + \frac{r}{R(t)} \right] + \frac{h_0}{\alpha} \left[1 - \frac{r}{R(t)} \right], \quad r \leq R(t), \quad (19)$$

$$\alpha = \ln \frac{l(t)}{R(t)} - 1 + \frac{R(t)}{l(t)},$$

$$l^2(t) = 12at + R^2(t), \quad R^2(t) = \lambda a_2 t = 12 \left[\frac{\alpha \frac{Q}{2\pi T_2} - h_0}{\alpha \frac{Q}{2\pi T_2} + 2h_0} \right] a_2 t. \quad (20)$$

Здесь все обозначения прежние.

Нами на базе приближенного решения разработан метод интерпретации ОФО водоносного пласта [9], этот метод может быть применен и к анализу результатов возмущения скважиной слоистой системы по третьей схеме течения. Вместе с тем, в расчетные зависимости прямо не входит суммарная водопроводимость слоистой толщи T . Это обуславливает необходимость выполнения ОФО на два понижения.

Для проведения откачки на первое понижение подбирается дебит, обеспечивающий граничные условия на скважине, отвечающие первой схеме течения. По данным этого возмущения известными традиционными методами оцениваются параметры T и μ_1 (а привлечение расходомерии дает возможность дифференциации водопроводимости по вертикали).

Дебит откачки на второе понижение должен обеспечить возмущение при условиях на скважине по третьей схеме фильтрации. Последовательность обработки результатов такого ОФО следующая.

1. По начальным прямолинейным участкам графиков прослеживания уровня в наблюдательных скважинах (характеризующим фильтрацию во внешней зоне), для которых уравнение (18) совпадает с уравнением Тейса-Джейкоба, определяется уровнепроводность слоистой толщи a , и, с учетом оцененной по данным первого понижения, — емкости верхнего слоя μ_1 .

2. Угловые коэффициенты C этих прямых на графиках прослеживания связаны с параметром α следующим соотношением:

$$C = \frac{h_0}{2\alpha}, \quad (21)$$

откуда несложно вычислить параметр α .

3. На графиках прослеживания в наблюдательных скважинах фиксируется момент времени t_i снижения уровня до границы раздела слоев, и вычисляется величина λa_2 :

$$\lambda a_2 = \frac{r_i^2}{t_i}.$$

4. Известные значения a и t_i позволяют проверить полученный из (21) параметр α :

$$\alpha = \ln \frac{\sqrt{12at_i + r_i^2}}{r_i} - 1 + \frac{r_i}{\sqrt{12at_i + r_i^2}}.$$

5. Уравнение (19) связывает понижение уровня во внутренней зоне с параметрами нижнего слоя. Решив его относительно T_2 , имеем

$$T_2 = \frac{\frac{Q}{2\pi} \left[\ln \frac{R(t)}{r_i} - 1 + \frac{r_i}{R(t)} \right]}{\left\{ S_2(r, t) - \frac{h_0}{\alpha} \left[1 - \frac{r_i}{R(t)} \right] \right\}},$$

откуда несложно вычислить водопродимость T_2 , а с учетом интерпретации ОФО на первое понижение — водопродимость верхнего слоя.

6. На последнем этапе обработки опытных данных по известным величинам Q , T_2 , h_0 и a из второго уравнения (20) вычисляется значение параметра λ и оценивается уровнепроводность a_2 и емкость μ_2 нижнего слоя.

В последнее время многие исследователи обращают внимание на возможность и перспективы комплексирования ОФО и опытно-миграционного опробования (ОМО) для повышения информативности первых с целью изучения проницаемости по разрезу опробуемого пласта [12, 16]. Наиболее часто при этом применяются пакетные запуски трассеров в наблюдательные скважины на поздних этапах кустовых откачек [12]. Интерпретация осуществляется из предпосылки послойного переноса индикатора в условиях плановой фильтрации.

В процессе обработки результатов ОМО используются графики изменения концентрации трассера в откачиваемой воде. Если на таком графике достаточно четко выделяются отдельные пики концентрации, отвечающие времени $t_{\max,j}$ поступления индикатора с водой по слоям с существенно различающимися коэффициентами действительной скорости фильтрации k_j , то [12]

$$k_j = \frac{\pi T r_i^2}{Q_{\max,j}^t}, T_j = \frac{\pi T r_i^2 (m_j n_j)}{Q_{\max,j}^t}, \quad (22)$$

где n_j – динамическая (активная) пористость j -того слоя.

Для правильной диагностики опытов необходима информация о последовательности привноса трассера в скважину из отдельных слоев, что реально при малом (2-3) их числе и при различающихся скоростях движения жидкости по ним. Соответственно точность приведенных построений существенно повышается в важном для нас варианте разреза водоносного пласта, когда пласт содержит слой с резко увеличенной проницаемостью. Вместе с тем, регистрация концентрации индикатора в возмущающей скважине возможна только применительно к первой рассмотренной схеме течения. При проведении опытов в условиях второй и третьей схем фильтрации необходимо использование двух опытных скважин, расположенных в зоне возмущения, где исключается сработка уровня подземных вод до границы раздела слоев. Требования, предъявляемые к опытным скважинам для организации в них ОМО, приведены в [12, 16] – они по важнейшим показателям совпадают с требованиями к подготовке возмущающей и наблюдательных скважин при проведении ОФО: скважины должны вскрывать пласт на всю мощность и быть оборудованными единой фильтровой колонной.

В представленном виде методика проведения и интерпретации опытов с трассерами по своим результатам слабо стыкуется с результатами обработки данных прослеживания уровня при откачках. Так, дифференциация коэффициентов фильтрации по вертикали требует определения независимыми методами величин n_j , что на практике при проведении ОФО связано с определенными трудностями и существенно снижает ценность опытов с трассерами.

Целесообразно поэтому дополнить обработку результатов ОМО методикой, рассмотренной в работе В.Г. Самойленко [16]. Она отличается тем, что с графиков изменения концентрации индикатора помимо величин $t_{\max,j}$ снимаются значения $\Delta C_j = C_{\max,j} - \sigma C_{j-1} - C^0$ ($C_{\max,j}$ – пик концентрации, C^0 – фоновая, а σC_{j-1} – остаточная концентрации трассера в зонах рассеяния предшествующих пиков).

Используя предпосылку, например, для двухслойного пласта $\frac{K_1}{K_2} = \frac{\Delta C_2}{\Delta C_1}$, нетрудно найти, что

$$K_1 = \frac{T - K_2 m_2}{m_1}, K_2 = \frac{T \cdot \Delta C_1}{m_1 \cdot \Delta C_2 + m_2 \cdot \Delta C_1} \quad (23)$$

Таким образом, эта методика в целом полнее отвечает данным ОМО, незначительно уступая в точности оценки k_f . Вычислив из уравнений (23) значения коэффициентов фильтрации слоев, а из (22) — коэффициентов действительной скорости фильтрации, получаем возможность рассчитать динамическую пористость слоев.

При планировании и выполнении ОФО главной целью их ставится получение достоверной информации о гидрогеологических параметрах водоносного пласта. Соответственно одной из важнейших задач является учет и возможно более полное исключение влияния целого ряда гидродинамических факторов, искажающих результаты опытов. Применительно к рассмотренным схемам течения такими факторами могут быть образующийся в возмущающей скважине при откачке из безнапорного пласта участок высачивания, потери напора, обусловленные инерционной составляющей сопротивления движению жидкости и нарушением естественной проницаемости водовмещающих отложений в процессе бурения скважин.

Эти дополнительные потери напора определяют, в частности, существенные систематические погрешности (или вообще делают неопределенными) оценок величины l_0 в опытах по второй схеме фильтрации. Использование затрубного пьезометра, обеспечивающего исключение искажающего влияния участка высачивания, принципиально проблему не решает. Кроме того, продолжительная сработка уровня подземных вод в возмущающей скважине в пределах верхнего слоя обуславливает малый расход потока, формирующегося во внутренней зоне (нижнем слое). Соответственно малы абсолютные значения параметра λ , так что депрессионная воронка во внутренней зоне развивается медленно, а время сработки уровня до границы раздела слоев даже в ближайшей наблюдательной скважине может превышать продолжительность откачки. Расположение же наблюдательных скважин слишком близко к возмущающей вызовет искажение понижения уровня в них вследствие проявления инерционной составляющей сопротивления движению жидкости.

Таким образом, наиболее целесообразно проводить ОФО с граничными условиями на возмущающей скважине, соответствующими первой и третьей схемам течения. При ОФО по третьей схеме необходимо возмущение на два понижения. Дебит первого должен обеспечивать граничные условия на скважине, отвечающие первой схеме, с уверенным фиксированием понижения уровня по крайней мере в ближайших наблюдательных скважинах. Соответственно этому требованию подбираются расстояния от оси возмущающей скважины до наблюдательных. При откачке на второе понижение априорно полагается мгновенная сработка уровня в возмущающей скважине ниже границы раздела слоев и дополнительные потери

напора не имеют решающего значения на достоверность и точность определяемых параметров.

Анализ решений задачи о фильтрации в трехслойной толще, полученные в работе [7], показывает нецелесообразность оценки параметров слоев на базе ее ОФО. Предпочтительным в этом случае становится использование результатов ОМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдулин Р.Н., Сидоренко В.Ф., Пономарев В.Н., Чеботарева О.В.* Особенности методики анализа опытных откачек и результатов эксплуатации крупных водозаборов в межгорных орошаемых речных долинах (на примере Чирчикского и Ахангаранского месторождений грунтовых вод) // Методы анализа и обработки гидрогеологических данных для прогноза ресурсов подземных вод. – Таллинн: Изд. АН ЭССР, 1984. – С. 172-175.
2. *Баренблатт Г.И.* О некоторых приближенных методах в теории неустановившейся фильтрации при упругом режиме // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1954. – № 9. – С. 35-49.
3. *Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Недра, 1979. – 326 с.
4. *Бураков М.М.* О неустановившейся напорно-безнапорной фильтрации // Известия АН КазССР. Серия геологическая. – 1984. – № 6. – С. 65-70.
5. *Бураков М.М.* Исследование водоотбора в неоднородных по фильтрационным и емкостным свойствам водоносных пластах (на примере месторождений Центрального Казахстана). Автореферат диссертации... кандидата геол.-минер. наук. – Алма-Ата, 1987. – 25 с.
6. *Веригин Н.Н.* Нагнетание вязких растворов в горные породы в целях повышения прочности и водонепроницаемости оснований гидротехнических сооружений // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1952. – № 5. – С. 674-687.
7. *Веригин Н.Н., Дзекцер Е.С.* Неустановившаяся фильтрация вблизи каналов и дрен в многослойных грунтах // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1967. – № 1. – С. 170-174.
8. *Гершанович И.М.* Гидрогеологические исследования в скважинах методом расходомерии. – М.: Недра, 1981. – 295 с.
9. *Жапарханов С.Ж., Бураков М.М.* О фильтрации к скважине при частичном осушении напорного пласта // Гидрогеологические и инженерно-геологические аспекты охраны окружающей среды: Межвузовский сборник. – Новочеркасск: НПИ, 1985. – С. 94-105.
10. *Жапарханов С.Ж., Бураков М.М.* О напорно-безнапорной фильтрации к выработкам большого диаметра // Алма-Ата, 1986. – 12 с. – Рукопись деп. в ВИНТИ 28.07.86, № 5463-В86.

11. *Мамонтов В.К.* Прогноз водопритоков в горные выработки в условиях напорно-безнапорной нестационарной фильтрации. Автореферат диссертации... кандидата геол.-минер. наук. – М., 1983. – 18 с.
12. *Мироненко В.А., Румынин В.Г.* Опытнo-миграционные работы в водоносных пластах. – М.: Недра, 1986. – 240 с.
13. *Нагевич П.П.* Учет фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод речных долин // Ресурсы подземных вод и их охрана от истощения и загрязнения. – Ташкент: САИГИМС, 1986. – С. 33-40.
14. *Плугина Т.А.* Определение геофильтрационных параметров слабопроницаемых отложений натурными методами // Обзор. ВИЭМС. Гидрогеология и инженерная геология. – М.: ВИЭМС, 1978. – 56 с.
15. *Пономарев В.Н., Сидоренко В.Ф., Чеботарева О.В.* Определение коэффициентов фильтрации двухслойной толщи при малой мощности и большой проницаемости верхнего слоя для подсчета эксплуатационных запасов грунтовых вод // Применениe ЭВМ при решении задач гидрогеологии и инженерной геологии. – Ташкент: САИГИМС, 1987. – С. 56-53.
16. *Самойленко В.Г.* Гидрохимическая дифференциация вертикальной неоднородности водопроницаемости водоносных горизонтов // Управление ресурсами подземных вод. – Ташкент: САИГИМС, 1985. – С. 3-16.
17. *Шестаков В.М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. – М.: МГУ, 1965. – 233 с.
18. *Moench A.F., Prickett T.A.* Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions // Water Resources Research. – 1972. – 8. – № 2. – P. 494-499.
19. *Papadopoulos I.S.* Nonsteady flow to multiaquifer wells // Journal of Geophysical Resources. – 1966. – 71. – № 3. – P. 4791-4797.

Институт гидрогеологии и гидрофизики
им. У.М. Ахмедсафина МО и Н РК