

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ  
HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

УДК 518:556.33.04

**О ВОССТАНОВЛЕНИИ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОСЛЕ ОТКАЧЕК  
ИЗ СЛОИСТЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕТЕКАНИЕМ**

*М.М. БУРАКОВ, В.Г. БУРКУШ, М.М. ТЫНБАЕВ*

*ТОО НППФ «КазГИДЭК»,  
43а, ул. Мынбаева, г. Алматы, 050001, Казахстан  
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

Проанализированы закономерности восстановления пьезометрического уровня подземных вод в опробуемом водоносном горизонте слоистой водоносной системы с перетеканием воды из смежного горизонта после остановки опытной откачки; сформирована и проанализирована физико-математическая модель восстановления пьезометрического уровня. Показано, что восстановление уровня осуществляется точно так же, как и после остановки откачки из напорного изолированного водоносного горизонта. Иными словами, предполагается, что откачка с постоянным дебитом продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в опробуемый водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом. В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень подземных вод в опробуемом горизонте восстанавливается до невозмущённого положения. В дополнение к этому при опытно-фильтрационном опробовании слоистых систем с перетеканием формирующийся при нагнетании поток подземных вод, направленный из опробуемого горизонта в смежный, полностью «запирает» сформировавшийся при откачке поток подземных вод, перетекающих из смежного горизонта в опробуемый. Соответственно обработка и интерпретация результатов прослеживания восстановления уровня должны выполняться в полном соответствии с имеющимися методическими рекомендациями.

Ключевые слова: слоистая водоносная система; перетекание подземных вод; опытная откачка; восстановление пьезометрического уровня; геофильтрационные параметры.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-51-63

**ON THE RESTORATION OF THE LEVEL OF UNDERGROUND WATER  
AFTER WITHDRAWAL FROM THE LAYERED AQUIFERS WITH OVERFLOW**

*M.M. BURAKOV, V.G. BURKUSH, M.M. TYNBAYEV*

*LP RPDC «KazGIDEK»  
of. 506 , 43a, ul. Mynbaeva, Almaty 050008, The Republic of Kazakhstan  
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

The patterns of restoration of the piezometric level of groundwater in the aquifer under test in a layered aquifer system with the overflow of water from the adjacent horizon after stopping the experimental constant-rate pumping tests, have been analyzed; the physico-mathematical model of piezometric level restoration has been formed and analyzed. It has been shown that the restoration of the level is carried out in the same way as after stopping the pumping from a pressure isolated aquifer. In other words, it has been assumed that pumping with a constant flow rate continues even

after it has been stopped, and at the time of self-stopping through the well from which the pumping is performed, water is pumped into the test aquifer with the same flow rate. As a result, the disturbance flow rate becomes zero, and the groundwater level in the tested horizon is restored to an unperturbed position. In addition to this, during test filtration testing of layered systems with overflow, the groundwater flow formed during the injection, directed from the tested horizon to the adjacent one, completely “locks” the groundwater flow formed during the pumping out of the adjacent horizon to the tested one. Accordingly, the processing and interpretation of the results of tracking the recovery level should be carried out in full compliance with the existing methodological recommendations.

**Key words:** layered aquifer system; groundwater overflow; experimental constant-rate pumping tests; restoration of the piezometric level; geofiltration parameters.

Далеко не редки случаи опытно-фильтрационного опробования (ОФО) опытными кустовыми откачками слоистых водоносных толщ с перетеканием подземных вод (ПВ) в опробуемый водоносный горизонт из смежного через слабопроницаемый разделяющий слой. Имеется и значительное число методик и способов интерпретации результатов такого ОФО, обеспечивающих обработку результатов прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытных кустов, состоящих из любого их числа, вскрывших либо только тот же опробуемый горизонт, что и возмущающая скважина, либо также и смежный горизонт, из которого происходит перетекание ПВ в опробуемый горизонт. При этом программа наблюдений за уровнем ПВ при откачках очень часто включает, в том числе, и наблюдения за восстановлением уровня в возмущающей и наблюдательных скважинах опытных кустов после остановок откачек.

В настоящее время не существуют методики интерпретации результатов прослеживания восстановления уровня ПВ после завершения опытных откачек в условиях перетекания ПВ из смежных горизонтов. Соответственно весь объём информации о закономерностях восстановления уровня не используется.

Такое положение определяется существующей неопределенностью в физико-математическом представлении восстановления уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте после остановки опытной откачки в условиях перетекания ПВ. Так, для условий восстановления уровня ПВ после откачки из изолированного напорного водоносного горизонта такая интерпретация достаточно проста и понятна. В соответствии с ней полагается, что откачка с постоянным дебитом продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом. В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень ПВ в опробуемом водоносном горизонте восстанавливается [1, 16, 25]. Аналогичная интерпретация восстановлению уровня после опытной откачки, проводившейся с переменным дебитом, изменяющимся по закону, выраженному гладкой функцией, предложена и апробирована в [2, 5, 6].

Указанная ранее неопределенность в интерпретации процесса восстановления уровня ПВ в усло-

виях их перетекания в опробуемый водоносный горизонт из смежного обусловлена именно наличием процесса перетекания, который накладывается на процесс фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте. Возможность учёта этих особенностей фильтрации ПВ в слоистой толще с перетеканием в модели восстановления уровня до настоящего времени попросту не рассматривалась. Соответственно в настоящей работе предпринята попытка построения такой модели и методики интерпретации опытных данных.

#### Исходная физико-математическая модель фильтрации подземных вод в слоистых водоносных системах с перетеканием

Обоснование модели восстановления уровня воды в скважинах опытного куста после остановки опытной откачки, проведённой с постоянным дебитом в условиях перетекания ПВ в опробуемый водоносный горизонт из смежного, требует хотя бы краткого рассмотрения исходной модели фильтрации ПВ в слоистой толще.

Положим, что два проницаемых слоя — водоносных горизонта, ПВ в которых имеют исходные напоры  $H_1^0$  и  $H^0$ , разделены толщей слабопроницаемых отложений мощностью  $m_0$ . Фильтрационный поток через эту толщу, согласно предпосылке Гириного-Мятеева [11, 14], вертикальный; соотношение напоров, например  $H_1^0 > H^0$ , предполагает наличие нисходящего потока со скоростью  $v_z$ . В этом случае в стационарных условиях распределение напора в слабопроницаемых отложениях линейно [15]:

$$h_z = H_1^0 + \frac{H^0 - H_1^0}{m_0} z,$$

где  $h_z$  — напор в произвольной точке слабопроницаемой толщи на глубине  $z$  от её кровли.

Необходимо обратить внимание на следующее. Представленная схема взаимодействия водоносных горизонтов для простоты изложения предполагает их горизонтальное залегание. Понятно, что в общем случае, при наклонном залегании слоёв, напоры в них отсчитываются от единой для их всех плоскости сравнения, определяющей энергию положения.

Исходная система уравнений фильтрации ПВ в водоносных горизонтах и слабопроницаемых раз-

деляющих слоях анализировалась во многих работах (обзор их можно найти, в том числе, в работах одного из авторов [3, 4, 7–9, 12, 13, 15–17, 19, 21–24, 27]). При каждой ссылке на эти уравнения приводить перечень публикаций по этой проблеме (к тому же далеко не полный) представляется нецелесообразным. Поэтому в дальнейшем изложении эти уравнения будут даваться без ссылок на литературные источники, при этом очевидно подразумевается, что уравнения выведены не авторами, а взяты из соответствующих источников.

При возмущении одного из водоносных горизонтов (в нашем случае — нижнего) реагирует вся система. В общем случае уравнение упругого режима фильтрации в напорном горизонте, из которого производится откачка, имеет следующий вид:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H(r, t)}{\partial r} \right) + v_z = \mu^* \frac{\partial H(r, t)}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь  $H(r, t)$  — напор в нижнем (опробуемом) горизонте на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала возмущения, далее будет обозначаться как  $H$ ;  $T$  и  $\mu^*$  — соответственно водопроводимость и упругая ёмкость нижнего слоя;  $T = Km$ ;  $K$  и  $m$  — соответственно коэффициент фильтрации и мощность опробуемого горизонта. Остальные обозначения прежние.

Реакция в смежном водоносном горизонте может проявляться двояко: 1) на протяжении возмущения снижение напора в смежном горизонте не наблюдается; 2) в процессе возмущения фиксируется снижение напора в нём. Во втором случае уравнение движения в смежном (верхнем) проницаемом слое будет иметь вид:

$$T_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H_1(r, t)}{\partial r} \right) - v_z = \mu_1 \frac{\partial H_1(r, t)}{\partial t},$$

где  $H_1(r, t)$  — напор в произвольной точке верхнего (смежного с опробуемым) слоя в момент времени  $t$  от начала возмущения, далее будет обозначаться, как  $H_1$ ;  $T_1$  и  $\mu_1$  — соответственно водопроводимость и ёмкость смежного слоя;  $T_1 = K_1 m_1$ ;  $K_1$  и  $m_1$  — коэффициент фильтрации и мощность смежного с опробуемым водоносного горизонта.

В большинстве работ, в которых рассматриваются задачи фильтрации в слоистых системах, режим фильтрации в разделяющих слабопроницаемых слоях принимается жёстким, так что скорость фильтрации в этих слоях определяется выражением

$$v_z = k_z \frac{H - H_1}{m_0}. \quad (2)$$

Здесь  $k_z$  — коэффициент фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя. Остальные обозначения прежние.

Впоследствии было обращено внимание на существенное проявление упругого режима фильтрации в разделяющих слоях. В этом случае уравнение (1) должно решаться с учётом следующего выражения для скорости на границе водоносного горизонта и слабопроницаемой толщи:

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=m_0},$$

где  $h$  — напор в разделяющих слабопроницаемых отложениях в назначенном горизонтальном сечении на глубине  $z$  от их кровли. При этом уравнение упругого режима фильтрации в разделяющем слое имеет вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \chi_0 \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}.$$

Здесь  $\chi$  — пьезопроводность разделяющего слоя.

Обычно при проведении ОФО опытной кустовой откачкой напорного водоносного горизонта для определения параметров этого горизонта, а также и параметров слабопроницаемых разделяющих отложений, используются данные о снижении уровня ПВ преимущественно в опробуемом горизонте, на него оборудуются скважины опытного куста. В этом случае уравнение (1) после очевидных и несложных преобразований с учётом, например, (2), обычно записывается в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + b^2 (H - H_1) = \frac{1}{\chi} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\frac{k_z}{m_0 T}},$$

где  $\chi$  — пьезопроводность нижнего (опробуемого) слоя,  $\chi = \frac{T}{\mu^*}$ ;  $b$  — коэффициент перетекания<sup>1</sup>.

Остальные обозначения прежние.

Важно отметить, что все приведенные решения уравнения (3) и его аналогов ориентированы на обработку и интерпретацию данных прослеживания исключительно снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста на этапе откачки. Работы, в которых были бы изложены результаты исследований процесса восстановления

<sup>1</sup> В одной из исходных статей Хантуша [21], в которой дано теоретическое обоснование схем фильтрации с перетеканием через разделяющие слабопроницаемые отложения и решения задач о притоке ПВ к скважинам в слоистых водоносных системах, если судить по переводу этой статьи в [9], параметр  $B = \frac{1}{b}$  обозначается как *фактор перетекания*; эта величина используется в зарубежной литературе повсеместно. В отечественной методической литературе в качестве меры интенсивности перетока ПВ через слабопроницаемые разделяющие толщи часто используется *коэффициент перетекания*, определяемый вторым уравнением в (3). Очевидно, что смешивание этих понятий, как и терминов, используемых для их обозначения, принципиально недопустимо.

пьезометрического уровня в водоносных горизонтах в условиях перетекания в них ПВ, автору не известны.

### Модель восстановления уровня подземных вод в слоистой системе с перетеканием

В соответствии с современными представлениями прекращение откачки или выпуска (при самоизливе ПВ) и последующее восстановление уровня ПВ является возмущением, которое может рассматриваться как самостоятельный опыт или стадия одного опыта [1]. Обработка этой второй стадии отличается некоторой спецификой по сравнению с обработкой первой стадии — собственно откачки. Прежде всего это относится к необходимости учёта «наследства» первой стадии опыта, которое по существу заключается в нахождении правильного уровня отсчёта повышений.

Как отмечалось, процессу восстановления уровня ПВ после откачки из изолированного напорного водоносного горизонта имеется достаточно простая и понятная интерпретация. В соответствии с ней полагается, что откачка с постоянным дебитом  $Q$  продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом  $Q$ . В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень ПВ в опробуемом водоносном горизонте восстанавливается до невозмущённого положения [1, 16, 25].

Рассмотрим этот процесс и его физико-математическую модель как аналог модели восстановления уровня ПВ после остановки откачки из слоистой толщи с перетеканием подробнее.

Как это рассматривалось в многочисленных публикациях (сошлёмся здесь лишь на учебники по динамике ПВ [12, 19]), фильтрация ПВ в изолированном изотропном напорном водоносном горизонте в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости (ПВ) описывается дифференциальным уравнением эллиптического типа, записанным в понижениях уровня, вида:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S(r, t)}{\partial r} \right) = \mu^* \frac{\partial S(r, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь  $S(r, t)$  — понижение пьезометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала возмущения относительно исходного  $H^0$  (очевидно, что  $S(r, t) = H^0 - H(r, t)$ ), далее понижение уровня будет обозначаться, как  $S$ . Остальные обозначения прежние.

Применительно к откачке ПВ из водоносного горизонта с постоянным дебитом  $Q$  уравнение (4) должно решаться при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} S(r, t) \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\ 2\pi T r \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0} &= -Q, \quad S(r, 0) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r_0$  — радиус возмущающей скважины.

Решение этой задачи впервые получено Тейсом [28]; оно имеет вид

$$S = \frac{Q}{4\pi T} E_1(-u), \quad u = \frac{r^2}{4\chi t}, \quad (6)$$

где  $E_1(-u)$  — интегральная показательная функция (интегральный экспоненциал) [18]. Уравнение (6) имеет логарифмическое асимптотическое представление [1, 12, 13, 16, 17, 19, 20, 26]

$$S = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25\chi t}{r^2} \quad \text{при} \quad \frac{r^2}{4\chi t} \leq 0,1, \quad (7)$$

которое и используется обычно для обработки и интерпретации результатов опытных откачек и выпусков.

Уравнения (6) и (7), представляющие решение исходного уравнения фильтрации (4) при условиях (5), описывают непосредственно только процесс откачки ПВ, на который необходимо наложить процесс нагнетания ПВ в водоносный горизонт через ту же возмущающую скважину. Соответственно исходное уравнение (4) с условиями (5), строго говоря, не описывает процесс нагнетания.

Это обусловлено также и свойствами эллиптического уравнения фильтрации вида (4). В частности, такое уравнение в принципе не может описывать знакопеременное движение ПВ. Поэтому задача нагнетания ПВ в водоносный горизонт на этапе восстановления уровня должна формулироваться как полностью независимая самостоятельная задача, а описание процесса нагнетания — строиться точно так же, как и для описания собственно откачки, т. е. с записи дифференциального уравнения фильтрации ПВ и системы граничных и начальных условий, определяющих особенности задачи.

Нетрудно видеть, что фильтрация ПВ в изолированном изотропном напорном водоносном горизонте в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости описывается дифференциальным уравнением эллиптического типа, записанным в повышениях уровня:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t}. \quad (8)$$

<sup>2</sup> Понятно, что и исходные дифференциальные уравнения фильтрации ПВ в этом случае записываются в понижениях уровня.

Здесь  $S^{**}(r, t)$  — повышение пьезометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала нагнетания относительно исходного  $H^0$ , далее повышение уровня будет обозначаться, как  $S^{**}$ . Применительно к нагнетанию ПВ в водоносный горизонт с постоянным дебитом  $Q$  уравнение (8) должно решаться при следующих граничных и начальном условиях, практически полностью совпадающих с условиями из (5):

$$S^{**}(r, t)|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad 2\pi T r \frac{\partial S^{**}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = Q, \quad S^{**}(r, 0) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (8) с учётом условий из (9) имеет вид, полностью аналогичный (6):

$$S^{**} = \frac{Q}{4\pi T} E_1 \left( -\frac{r^2}{4\chi t} \right), \quad (10)$$

с той же асимптотой вида (7) —

$$S^{**} = \frac{0,183 Q}{T} \lg \frac{2,25 \chi t}{r^2} \text{ при } \frac{r^2}{4\chi t} \leq 0,1. \quad (11)$$

Здесь все обозначения прежние.

Полное дифференциальное уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте на этапе восстановления их пьезометрического уровня (время в этом случае отсчитывается от момента  $t_0$  остановки откачки) с учётом принципа суперпозиции записывается в виде:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial r} \right) = \\ = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t} - \mu^* \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial t}, \quad (12)$$

или

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial r} \right) = \\ = \mu^* \frac{\partial S^*(r, t)}{\partial t}, \quad (13)$$

где  $T$  — продолжительность откачки от её начала до назначенного момента времени  $t_0$  её остановки;  $S^*(r, t) = S^{**} - S$  — повышение пьезометрического уровня ПВ в опробуемом горизонте на расстоянии  $r$  от возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала восстановления уровня относительно максимального понижения уровня на момент остановки откачки, далее повышение уровня будет обозначаться как  $S^*$ .

Соответственно асимптотическое представление решения уравнения (13), являющееся алгебра-

ической суммой частных решений — уравнений (7) и (11), имеет окончательно вид:

$$S^* = \frac{0,183 Q}{T} \lg \frac{T+t}{t}. \quad (14)$$

Именно это уравнение используется как основа для обработки и интерпретации результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в изолированном напорном водоносном горизонте после остановки откачки, проводившейся с постоянным дебитом  $Q$  [1, 17, 25].

Перейдем теперь к физико-математической модели восстановления пьезометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте слоистой толщи с перетеканием, отталкиваясь от уже рассмотренной выше.

Совершенно аналогично предыдущей задаче запишем уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте вида (3) в понижениях следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S}{\partial r} \right) - b^2 (S - S_1) = \frac{1}{\chi} \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (15)$$

где  $S_1(r, t)$  — понижение пьезометрического уровня ПВ в смежном с опробуемым водоносном горизонте на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала возмущения, далее понижение уровня будет обозначаться, как  $S_1$ . Остальные обозначения прежние.

В силу обратимости процессов откачки и нагнетания дифференциальное уравнение фильтрации ПВ эллиптического типа, описывающее их нагнетание в опробуемый водоносный горизонт с учётом перетока воды из опробуемого в смежный водоносный горизонт, в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости, записанное в повышениях уровня, имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) =$$

$$= \frac{1}{\chi} \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t}, \quad (16)$$

где  $S_1^{**}(r, t)$  — повышение пьезометрического уровня ПВ в смежном с опробуемым горизонте на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала возмущения относительно исходного  $H_1^0$ , далее повышение уровня будет обозначаться, как  $S_1^{**}$ .

Очевидно, что, как и в предыдущем случае, полное дифференциальное уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте слоистой водоносной системы с перетеканием на этапе восстановления их пьезометрического уровня (время в этом случае отсчитывается от момента  $t_0$  остановки откачки) на основе принципа суперпозиции записывается в виде

$$\begin{aligned} & T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial r} \right) - \\ & - b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) + \\ & + b^2 (S(r, (T + t)) - S_1(r, (T + t))) = \\ & = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t} - \mu^* \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial t}, \end{aligned} \quad (17)$$

где все обозначения прежние.

Из уравнения (17) отчетливо следует, что формирующееся с началом нагнетания перетекание ПВ из опробуемого водоносного горизонта в смежный должно либо полностью «запирать» уже сформировавшийся к моменту остановки откачки переток ПВ из смежного горизонта в опробуемый, либо многократно его уменьшить. Это обстоятельство четко отражает алгебраическая сумма третьего и четвертого слагаемых в левой части выражения (17), которая с высокой вероятностью:

$$\begin{aligned} & -b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) + \\ & + b^2 (S(r, (T + t)) - S_1(r, (T + t))) \cong 0 \end{aligned}$$

А тогда уравнение (17) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial r} \right) = \\ & = \mu^* \frac{\partial S^*(r, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (18)$$

полностью идентичном виду уравнения в (13).

Как показано, например, в работе [23], система дифференциальных уравнений фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте (15) и (16), следовательно, и (18) должны решаться при тех же граничных и начальных условиях для этого горизонта, что и представленные в (5) и (9). Таким образом, мы имеем задачу, полностью идентичную задаче восстановления пьезометрического уровня в изолированном напорном водоносном горизонте после остановки откачки с постоянным дебитом, рассмотренную выше. А раз так, то и решение этой задачи может быть представлено как алгебраическая сумма частных решений вида (6) и (10) с их асимптотическими представлениями (7) и (11). Соответственно асимптотическое представление решения уравнения (18) должно быть полностью идентично выражению (14).

Иными словами, восстановление пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста после остановки откачки, проводимой из водоносного горизонта в условиях перетекания воды в него из смежного горизонта, происходит аналогично таковому при откачке с постоянным дебитом из напорного изолированного водоносного горизонта. Восстановление уровня описывается тем же асимптотическим представлением решения задачи вида (14), а обработка и интерпретация ре-

зультатов прослеживания уровня должны выполняться с использованием методических рекомендаций из [1, 13, 17].

### Обработка и интерпретация результатов опытной кустовой откачки из слоистой водоносной системы с перетеканием

Рассмотрим обработку и интерпретацию результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста на примере опытной кустовой откачки на участке проектируемого производственно-технического водозабора строящегося рудника на урановом месторождении Жалпак в Туркестанской области Южного Казахстана, приуроченного к северо-восточному пологому борту Шу-Сарысусской депрессии на границе с Казахским мелкосопочником [10]. Здесь продуктивный водоносный коньяк-сантонский (инкудукский) горизонт [ $K_2sn (in)$ ] практически на всей площади своего распространения является напорным и по отношению к участку разведки ПВ прослеживается на значительные расстояния. Для оценки его геофильтрационных параметров выполнено ОФО — опытная кустовая откачка. В качестве возмущающей, центральной, скважины опытного куста использовалась скважина № 8058 (2ц), а в качестве наблюдательных — скважины № 8059 (1ю) и № 8060 (3н).

Опытный куст конструктивно выполнен как однолучевой. Расстояние от центральной скважины № 8058 (2ц) до первой наблюдательной № 8059 (1ю)  $r_1$  составляет 25,80 м, а до второй наблюдательной № 8060 (3н) —  $r_2 = 71,20$  м. Продуктивный инкудукский горизонт, представленный разнотекстурными песками с гравием и галькой, вскрыт скважинами опытного куста в интервале глубин 150—180 м. В кровле водоносного горизонта залегает толща плотных глин мощностью более 10 м, отделяющая инкудукский горизонт от рудного жалпакского, а в подошве — слой плотных глин мощностью до 2,5 м, являющихся кровлей подстилающего мынкудукского горизонта. Центральная скважина оборудована фильтром КДФ 118 диаметром  $D = 118$  мм (соответственно радиусом  $r_0 = 0,060$  м) и длиной  $l = 20$  м; фильтр установлен в интервале глубин 160—180 м. Аналогично оборудованы и наблюдательные скважины опытного куста.

Опытная откачка общей продолжительностью  $T = 96$  ч проводилась при постоянном дебите, среднее значение которого составило  $Q = 2,36$  дм<sup>3</sup>/с (8,48 м<sup>3</sup>/ч или 203,6 м<sup>3</sup>/сут.). По завершении откачки еще на протяжении 24 ч производились наблюдения за восстановлением уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста.

На рис. 1 представлены индикаторные кривые временного прослеживания снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста.

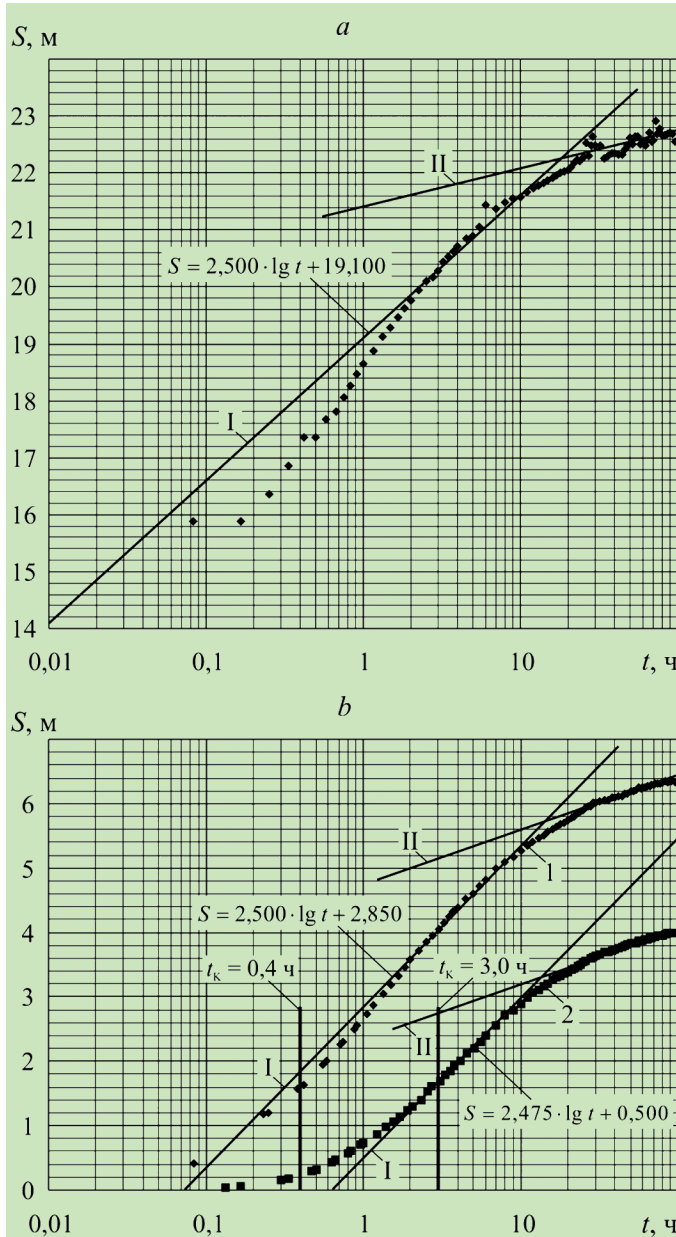


Рис. 1. Индикаторные графики временного прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод в центральной (а) и наблюдательных (б) скважинах опытного куста при откачке: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н)

Аномалии этих кривых характерны для графиков прослеживания при откачках в условиях перетекания ПВ в опробуемый водоносный горизонт из смежного (или смежных) горизонта слоистой водоносной системы. Так, на графиках прослеживания и по возмущающей скважине № 8058 (2ц), и по наблюдательным скважинам № 8059 (1ю) и № 8060 (3н) достаточно отчётливо фиксируются перегибы, соответствующие началу перетока ПВ из смежного водоносного горизонта через толщу слабопроницаемых разделяющих отложений.

При этом, в соответствии с современными представлениями [1, 17], первые асимптотические прямолинейные участки индикаторных графиков (обозначенные на рис. 1 римской цифрой I) отвечают

условиям фильтрации ПВ в неограниченном в плане изолированном однородном напорном водоносном горизонте, т.е. предполагается, что перетекание ПВ из смежного горизонта в закономерностях снижения пьезометрического уровня в опробуемом горизонте на этом этапе откачки еще не проявляется. Соответственно фильтрационные и ёмкостные параметры опробуемого индуктского водоносного горизонта должны рассчитываться только по этим первым асимптотическим участкам графиков временного прослеживания уровня [1, 4, 7, 8, 17].

Вторые, выположенные, асимптотические участки индикаторных графиков прослеживания (обозначенные на рис. 1 римской цифрой II) характеризуют второй этап возмущения, при котором в опробуемый водоносный горизонт начинает поступать вода из смежного горизонта.

Напомним при этом, что расчётные формулы для вычисления геофильтрационных параметров, соответствующие способу временного прослеживания снижения уровня воды в возмущающей и наблюдательных скважинах при откачках, для которого решение задачи о притоке к скважине, вытекающее из исходного дифференциального уравнения фильтрации, аппроксимируется уравнением [1, 13, 17, 20, 26]:

$$S = A_i + C_i \lg t, \quad (19)$$

представляются в виде [3]:

$$T = \frac{0,183Q}{C_i}, \quad C_i = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (20)$$

$$\chi = 0,445 \frac{r^2}{t_0} 10^B, \quad B = \frac{A_i}{C_i},$$

где  $r$  — радиус возмущающей скважины  $r_0$  или расстояние между возмущающей и  $i$ -й наблюдательной скважинами  $r_i$ ;  $i$  — номер наблюдательной скважины опытного куста, начиная от возмущающей;  $S_1$  и  $S_2$  — понижения уровня в скважинах опытного куста, измеренные соответственно в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  от начала возмущения (откачки); остальные обозначения прежние. Угловой коэффициент  $C_i$  и начальная ордината  $A_i$  — понижение уровня в момент времени  $t^0$  — снимаются с выделенного асимптотического прямолинейного участка графика прослеживания, при этом время  $t^0$  назначается равным 1 в выбранных единицах измерения, так что  $\lg t^0 = 0$ .

Отметим, что на рис. 1 вынесены уравнения вида (19) для первых асимптотических прямолинейных участков индикаторных графиков временного прослеживания пьезометрического уровня в скважинах опытного куста. Соответственно результаты промежуточных расчётов по уравнениям (19) и (20) и рассчитанные применительно к этим участкам графиков геофильтрационные парамет-

Таблица 1

Результаты обработки индикаторных графиков прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод инкудукского водоносного горизонта при откачке

| Номер | Параметры возмущения, индикаторных графиков прослеживания и водоносного горизонта                                   | Значения параметров по скважинам опытного куста |                      |                      |                               |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|
|       |                                                                                                                     | Временное прослеживание                         |                      |                      | Комбинированное прослеживание |
|       |                                                                                                                     | 8058 (2п)                                       | 8059 (1ю)            | 8060 (3н)            | 8059 (1ю) — 8060 (3н)         |
| 1     | Расчётный дебит возмущения $Q$ , м <sup>3</sup> /ч;<br>м <sup>3</sup> /сут.                                         | 8,48<br>203,6                                   | 8,48<br>203,6        | 8,48<br>203,6        | 8,48<br>203,6                 |
| 2     | Радиус возмущающей скважины $r_0$ или расстояние от центра возмущения до возмущающей скважины $r_1$ , м             | 0,060                                           | 25,80                | 71,20                | 25,80—71,20                   |
| 3     | Расчётный участок индикаторного графика прослеживания пьезометрического уровня                                      | I                                               | I                    | I                    | I                             |
| 4     | Расчётное значение времени $t_1$ на асимптотическом участке графика, ч                                              | 0,01                                            | 0,1                  | 1                    |                               |
| 5     | Расчётное значение приведенного времени $\left(\frac{t}{r^2}\right)_1$ , ч/м <sup>2</sup>                           |                                                 |                      |                      | 0,001                         |
| 6     | Расчётное значение понижения пьезометрического уровня $S_1$ , м                                                     | 14,10                                           | 0,35                 | 0,50                 | 2,30                          |
| 7     | Расчётное значение времени $t_2$ на асимптотическом участке графика, ч                                              | 10                                              | 10                   | 100                  |                               |
| 8     | Расчётное значение приведенного времени $\left(\frac{t}{r^2}\right)_2$ , ч/м <sup>2</sup>                           |                                                 |                      |                      | 0,01                          |
| 9     | Расчётное значение понижения пьезометрического уровня $S_2$ , м                                                     | 21,60                                           | 5,35                 | 5,45                 | 4,85                          |
| 10    | Расчётное значение углового коэффициента асимптотического участка индикаторного графика $C_t$ , м                   | 2,500                                           | 2,500                | 2,475                | 2,550                         |
| 11    | Расчётное значение начальной ординаты $A_0$ , м (при $t^0 = 1$ ч)                                                   |                                                 | 2,85                 | 0,50                 |                               |
| 12    | Расчётное значение приведенной начальной ординаты $A_K$ , м (при $\frac{t^0}{r^2} = 1$ ч/м <sup>2</sup> )           |                                                 |                      |                      | 9,950                         |
| 13    | Водопроницаемость $T$ , м <sup>2</sup> /сут.                                                                        | 14,90                                           | 14,90                | 15,05                | 14,60                         |
| 14    | Расчётное значение параметра В.                                                                                     |                                                 | 1,1400               | 0,2020               | 3,9020                        |
| 15    | Пьезопроводности $\chi$ , м <sup>2</sup> /сут.                                                                      |                                                 | $9,81 \cdot 10^4$    | $8,62 \cdot 10^4$    | $8,55 \cdot 10^4$             |
| 16    | Контрольное время наступления квазистационарного режима фильтрации $t_K$ , ч                                        | $2,2 \cdot 10^{-6}$                             | 0,4                  | 3,0                  |                               |
| 17    | Контрольное приведенное время наступления квазистационарного режима фильтрации $\frac{t_K}{r^2}$ , ч/м <sup>2</sup> |                                                 |                      |                      | 0,0006                        |
| 18    | Расчётное значение упругой ёмкости $\mu^*$                                                                          |                                                 | $1,52 \cdot 10^{-4}$ | $1,75 \cdot 10^{-4}$ | $1,71 \cdot 10^{-4}$          |

ры опробуемого инкудукского водоносного горизонта представлены в табл. 1.

Логарифмическая аппроксимация формулы Тейса справедлива для условий квазистационарного фильтрационного потока [1, 12, 13, 17, 29]; момент наступления квазистационарного режима фильтрации ПВ определяется аналитическим критерием  $t_K$ :

$$t_K = \frac{r^2}{0,4\chi}. \quad (21)$$

Контрольное время  $t_K$  с учётом округлённого значения пьезопроводности  $\chi \cong 10^5$  м<sup>2</sup>/сут (или 4167 м<sup>2</sup>/ч) для скважин опытного куста показаны в табл. 1. Значения  $t_K$  вынесены также на рис. 1.

Своего рода контроль качества выполненного ОФО слоистой водоносной системы в условиях перетекания ПВ в опробуемый горизонт из смежного обеспечивает комбинированный способ обработки результатов прослеживания пьезометри-

ческого уровня ПВ в наблюдательных скважинах опытного куста. Особенностью индикаторных графиков комбинированного прослеживания, построенных в координатах и  $S - \lg \frac{t}{r^2}$ , так же, как и

графиков временного прослеживания, является наличие перегибов, ограничивающих прямолинейные асимптотические участки с разным темпом изменения скорости снижения уровня. При этом вторые асимптотические участки по наблюдательным скважинам, удалённым на разное расстояние от центра возмущения, должны отходить от общей для тех же наблюдательных скважин первой асимптоты [1]. Совпадение первых асимптот и является контрольным индикатором качества выполненного ОФО водоносного горизонта в условиях перетекания ПВ.

На рис. 2 представлены индикаторные кривые комбинированного прослеживания пьезометри-

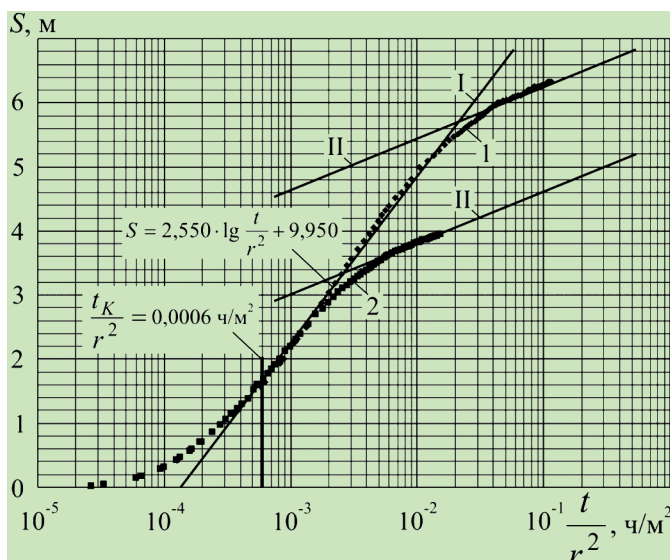


Рис. 2. Индикаторные графики комбинированного прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод в наблюдательных скважинах опытного куста при откачке: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюда-

ческого уровня в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н) опытного куста. Как и указывалось ранее, обе эти кривые имеют единую прямолинейную асимптоту, обозначенную на рис. 2 римской цифрой I. Это однозначно свидетельствует о качественном проведении опытной откачки и о достоверности ее результатов. Параметры этой первой асимптоты — угловой коэффициент  $C_K$  и начальная ордината  $A_K$  — должны обеспечить вычисление действительных геофильтрационных параметров опробуемого инкудукского водоносного горизонта [1, 17].

Как и в предыдущем случае, вторые, выположенные, асимптотические участки индикаторных графиков комбинированного прослеживания (обозначенные на рис. 2 римской цифрой II) характеризуют второй этап возмущения, при котором в опробуемый водоносный горизонт начинают поступать воды из смежного горизонта.

Расчётные формулы для вычисления геофильтрационных параметров, соответствующие способу комбинированного прослеживания уровня воды в наблюдательных скважинах при откачках из изолированного напорного водоносного горизонта, для которого решение задачи о притоке к скважине аппроксимируется уравнением [1, 13, 17, 20, 26]:

$$S = A_K + C_K \lg \frac{t}{r^2}, \quad (22)$$

представляются в виде [3]:

$$T = \frac{0,183Q}{C_K}, \quad C_K = \frac{S_2 - S_1}{\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_2 - \lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_1}, \quad (23)$$

$$\chi = 0,445 \cdot 10^B, \quad B = \frac{A_K}{C_K}.$$

Здесь все обозначения прежние.

На рис. 2 выписано уравнение вида (22) для первой (общей) асимптоты индикаторного графика комбинированного прослеживания пьезометрического уровня в наблюдательных скважинах опытного куста. Результаты промежуточных расчётов по уравнениям из (23) и рассчитанные геофильтрационные параметры опробуемого инкудукского водоносного горизонта представлены в табл. 1. В таблицу помещено также значение контрольного приведенного времени наступления квазистационарного режима фильтрации ПВ  $\frac{t_K}{r^2}$ , оценка которого выполнена с учётом того же округленного значения пьезопроводности  $\chi \cong 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. (или 4167 м<sup>2</sup>/ч).

Таким образом, результаты обработки и интерпретации данных опытной откачки способом комбинированного прослеживания также обеспечили получение достоверных значений геофильтрационных параметров инкудукского водоносного горизонта на участке производственно-технического водозабора рудника Жалпак. Эти параметры прекрасно согласуются с геофильтрационными параметрами того же горизонта, установленными в результате обработки опытных данных способом временного прослеживания.

Другой важной задачей обработки результатов ОФО инкудукского водоносного горизонта является определение параметров перетока ПВ из смежного горизонта через слой слабопроницаемых разделяющих отложений, в первую очередь, фактора перетекания  $B$ .

В [4, 7, 8] предложен метод интерпретации результатов ОФО многослойных систем, для которого значительно сняты ограничения на область существования теоретического решения, положенного в его основу — способ отношения понижений пьезометрического уровня в комбинации с методом подбора. На базе редактора MS Excel в [4, 7, 8] предложен алгоритм реализации метода, обеспечивающий комплексное вычисление водопроводимости опробуемого водоносного горизонта  $T$ , его пьезопроводности  $\chi$  и фактора перетекания  $B$ ; Результаты расчетов этих параметров представлены на рис. 3.

При расчётной величине фактора перетекания  $B = 341,6$  м и мощности опробуемого инкудукского водоносного горизонта  $m = 30$  м получаем, что условие применимости решения Хантуша и Джейкоба [24] и его альтернативного представления из [27], использованного для обработки и интерпретации результатов прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытного куста и имеющего вид:

$$\frac{m}{B} = 0,088 \leq 0,1,$$

безусловно выполняется.

|    |                                         |              |             |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
|----|-----------------------------------------|--------------|-------------|----------|---------------------|--------------|---------|----------------------------------------|--------------------------|---------------------|---|---|---|--|
| A1 |                                         |              |             |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
|    | A                                       | B            | C           | D        | E                   | F            | G       | H                                      | I                        | J                   | K | L | M |  |
| 1  |                                         |              |             |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 2  | Исходные данные                         |              |             |          |                     |              |         | Критериальные оценки                   |                          |                     |   |   |   |  |
| 3  |                                         |              | $Q =$       | 203,6    | м <sup>3</sup> /сут |              |         |                                        | $S^{(1)}/S^{(2)}$        | $K_0(z_1)/K_0(z_2)$ |   |   |   |  |
| 4  |                                         |              | $S^{(1)} =$ | 6,10     | м                   |              |         |                                        | 1,62667                  | 1,62663             |   |   |   |  |
| 5  |                                         |              | $S^{(2)} =$ | 3,75     | м                   |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 6  |                                         |              | $r_1 =$     | 25,80    | м                   |              |         |                                        | Расчет водопроницаемости |                     |   |   |   |  |
| 7  |                                         |              | $r_2 =$     | 71,20    | м                   |              |         |                                        | Угловые коэффициенты     |                     |   |   |   |  |
| 8  |                                         |              | $t_1 =$     | 40,00    | ч                   |              |         |                                        | $C_1$                    | $C_2$               |   |   |   |  |
| 9  |                                         |              | $t_1 =$     | 1,666667 | сут                 |              |         |                                        | 2,38658                  | 2,38653             |   |   |   |  |
| 10 |                                         |              |             |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 11 | Задаваемое значение фактора перетекания |              |             |          |                     |              |         | Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут |                          |                     |   |   |   |  |
| 12 |                                         |              | $B =$       | 341,6    | м                   |              |         |                                        | $T^{(1)}$                | $T^{(2)}$           |   |   |   |  |
| 13 | Задаваемое значение пьезопроводности    |              |             |          |                     |              |         |                                        | 13,6                     | 13,6                |   |   |   |  |
| 14 |                                         |              | $\chi =$    | 100000   | м <sup>2</sup> /сут |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 15 |                                         |              |             |          |                     |              |         |                                        | Упругая емкость, м*      |                     |   |   |   |  |
| 16 | Расчеты функций Бесселя                 |              |             |          |                     |              |         |                                        | 0,00014                  |                     |   |   |   |  |
| 17 |                                         | $z_1 =$      | 0,08776     |          |                     | $I_0(z_1) =$ | 1,00193 |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 18 |                                         | $z_2 =$      | 0,24218     |          |                     | $I_0(z_2) =$ | 1,01472 |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 19 |                                         | $z_1/2 =$    | 0,04388     |          |                     | $K_0(z_1) =$ | 2,55596 |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 20 |                                         | $z_2/2 =$    | 0,12109     |          |                     | $K_0(z_2) =$ | 1,57132 |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 21 |                                         | $z_1/3,75 =$ | 0,02340     |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |
| 22 |                                         | $z_2/3,75 =$ | 0,06458     |          |                     |              |         |                                        |                          |                     |   |   |   |  |

Рис. 3. Результаты вычислений геофильтрационных параметров опробуемого индукционного водоносного горизонта способом отношения понижений пьезометрического уровня в комбинации с методом подбора

Из рис. 3 следует, что полученное на основе метода отношения понижений уровня значение водопроницаемости примерно на 7,4–10,7 % (по отношению к определенной методом отношения уровней величине  $T = 13,6$  м<sup>2</sup>/сут.) меньше величин водопроницаемости, определенной по результатам обработки опытных данных способами временного и комбинированного прослеживания понижения пьезометрического уровня ПВ (см. табл. 1). Эти систематические отклонения, как отмечалось в [4, 7, 8], являются следствием достаточно условного предположения о том, что на первых выделенных асимптотических участках графиков прослеживания, отвечающих первому этапу возмущения, не отражается влияние перетекания.

Достаточно подробное изложение выше результатов обработки и интерпретации результатов прослеживания пьезометрического уровня ПВ на этапе откачки имело очевидную цель. Эти результаты необходимы для обеспечения возможности сравнения геофильтрационных параметрах опробуемого индукционного водоносного горизонта с параметрами, полученными по результатам обработки и интерпретации результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня.

Как уже отмечалось ранее, по завершении опытной откачки на участке производственно-технического водозабора рудника Жалпак на протяжении еще 24 ч производились наблюдения за восстановлением пьезометрического уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста.

Известно [1, 17], что при условии  $t < 0,1 T$  влиянием «наследства» откачки можно пренебречь. В этом случае обработка данных восстановления пьезометрического уровня ПВ производится точно так же, как и для его понижения на этапе откачки, т. е. способами временного, площадного и комбинированного прослеживания.

Если же указанное условие не выполняется, т. е. при  $t \geq 0,1 T$ , то опытные индикаторные графики прослеживания строятся в координатах  $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$ , а обработка данных прослеживания восстановления уровня производится только способом временного прослеживания [1]. При этом ординатой служит повышение уровня, т. е. разность между динамическими уровнями в данный момент восстановления и в конце откачки. В этом случае выражение (14) аппроксимируется уравнением вида:

$$S^* = C \cdot \lg \frac{t}{T+t}, \quad (24)$$

где  $C$  — угловой коэффициент расчетного прямолинейного асимптотического участка индикаторного графика прослеживания восстановления уровня.

Соответственно формулы для вычисления геофильтрационных параметров опробуемого водоносного горизонта имеют вид:

$$T = \frac{0,183 Q}{C}, \quad \chi = 0,445 \frac{r^2}{T} 10 B, \quad B = \frac{S_{\max}}{C}. \quad (25)$$

Здесь  $S_{\max}$  — максимальное понижение пьезометрического уровня ПВ, достигнутое на завершающем этапе откачки. Остальные обозначения прежние.

Как было показано ранее, восстановление пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста после остановки откачки, проводимой из водоносного горизонта в условиях перетекания воды из смежного с опробуемым горизонта, происходит точно так же, как и при откачке с постоянным дебитом из напорного изолированного водоносного горизонта. Восстановление уровня описывается тем же уравнением (14), а обработки результатов прослеживания уровня выполняется с использованием уравнений (25). Очевидно, что в этом случае в качестве  $S_{\max}$  в (25) должны назначаться значения понижения пьезометрического уровня ПВ, полученные в результате экстраполяции первого (I) асимптотического участка индикаторных графиков временного прослеживания снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста на этапе откачки на момент её остановки.

На рис. 4 представлены индикаторные графики временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста. На этих графиках выделяется только по одному расчётному прямолинейному асимптотическому участку. Применительно к этим участкам на рисунках выписаны уравнения этих асимптот вида (24), в которых в явном виде представлены их угловые коэффициенты  $S$ .

Приведённое ранее условие  $t < 0,1 T$  при общей продолжительности откачки в  $T = 96$  ч показывает, что пренебрежение «наследством» откачки возможно только для значений времени от момента её остановки  $t \leq 9,6$  ч. Очевидно, что расчётный асимптотический участок графика временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста отстраивается с учетом измеренных значений  $S^*$  для моментов времени  $t \geq 9,6$  ч. Поэтому обработка опытных данных выполнена на основе графиков временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в координатах  $S^* - \lg \frac{t}{T + t}$  (см. рис. 4).

Результаты расчётов значений водопроницаемости  $T$  и пьезопроводности  $\chi$  по результатам временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня сведены в табл. 2.

Вычисленные значения сложного критического времени для наблюдательных скважин опытного куста вынесены на рис. 4; они отчётливо показывают, что выделенные прямолинейные асимптотические участки полностью удовлетворяют условию применимости уравнения (14) для обработки и интерпретации результатов прослеживания восста-

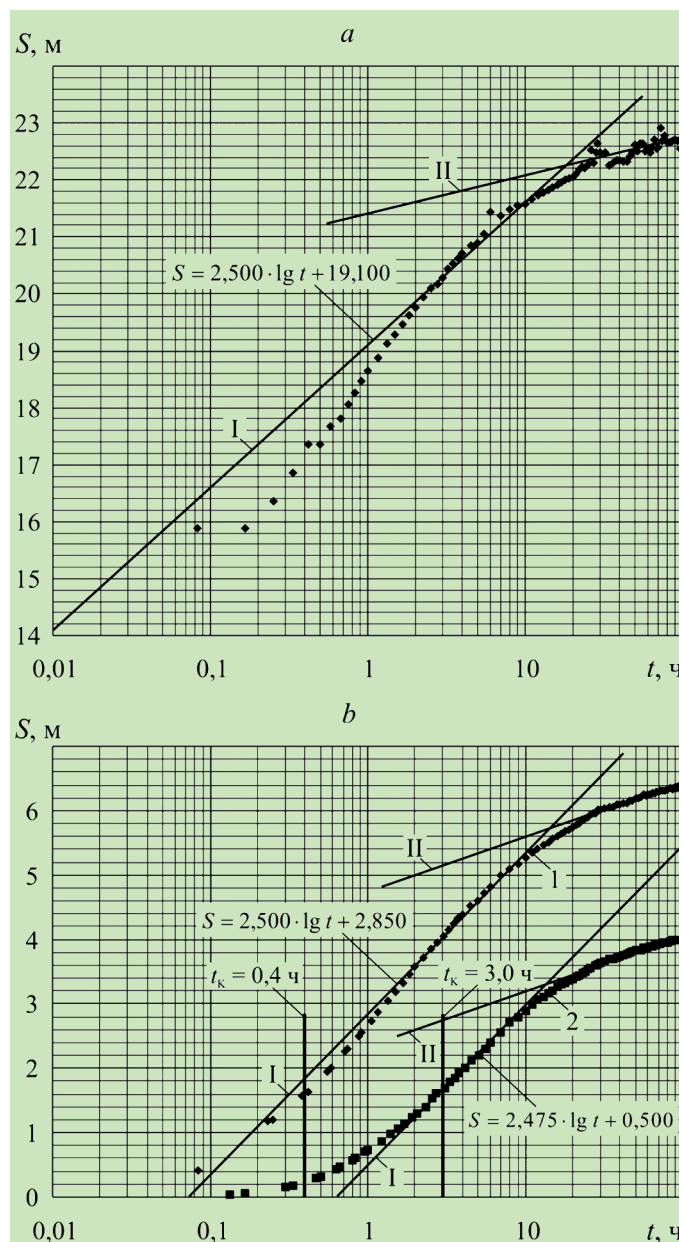


Рис. 4. Индикаторные графики временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня подземных вод в центральной (а) и наблюдательных (б) скважинах опытного куста после остановки откачки: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н)

новления пьезометрического уровня ПВ. Соответственно рассчитанные геофильтрационные параметры индукского водоносного горизонта на участке производственно-технического водозабора уранового месторождения Жалпак вполне представительны.

Вычисленные по данным временного и комбинированного прослеживания снижения пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста на этапе откачки и методом отношения понижений уровня геофильтрационные параметры индукского водоносного горизонта прекрасно согласуются с теми же параметрами, вычисленными на этапе восстановления пьезометрического уровня

Таблица 2

Результаты обработки индикаторных графиков прослеживания восстановления пьезометрического уровня подземных вод индукционного водоносного горизонта после остановки откачки

| Номер<br>пп | Параметры возмущения, индикаторных графиков прослеживания<br>и водоносного горизонта                                       | Значения параметров по скважинам опытного куста |                      |                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
|             |                                                                                                                            | 8058 (2п)                                       | 8059 (1ю)            | 8060 (3н)            |
| 1           | Расчётный дебит возмущения $Q$ , м <sup>3</sup> /ч;<br>м <sup>3</sup> /сут.                                                | 8,48<br>203,6                                   | 8,48<br>203,6        | 8,48<br>203,6        |
| 2           | Радиус возмущающей скважины $r_0$ или расстояние от центра<br>возмущения до возмущающей скважины $r$ , м                   | 0,060                                           | 25,80                | 71,20                |
| 3           | Расчётное значение сложного времени $\frac{t}{T + t_1}$ на асимптотическом<br>участке графика                              | 0,001                                           | 0,001                | 0,01                 |
| 4           | Расчётное значение повышения пьезометрического уровня $S_1^*$ , м                                                          | 16,60                                           | 0,35                 | 0,60                 |
| 5           | Расчётное значение сложного времени $\frac{t_2}{T + t_2}$ на асимптотическом<br>участке графика                            | 0,1                                             | 0,1                  | 1                    |
| 6           | Расчётное значение повышения пьезометрического уровня $S_2^*$ , м                                                          | 21,60                                           | 5,45                 | 5,55                 |
| 7           | Расчётное значение углового коэффициента асимптотического<br>участка индикаторного графика $C$ , м                         | 2,500                                           | 2,550                | 2,475                |
| 8           | Экстраполированное значение максимального понижения<br>пьезометрического уровня на момент остановки откачки $S_{\max}$ , м |                                                 | 7,95                 | 5,55                 |
| 9           | Водопроницаемость $T$ , м <sup>2</sup> /сут.                                                                               | 14,90                                           | 14,61                | 15,05                |
| 10          | Расчётное значение параметра В                                                                                             |                                                 | 3,1177               | 2,2424               |
| 11          | Пьезопроводность $\chi$ , м <sup>2</sup> /сут.                                                                             |                                                 | $9,75 \cdot 10^4$    | $9,89 \cdot 10^4$    |
| 12          | Сложное контрольное время наступления квазистационарного<br>режима фильтрации $\frac{t_K}{T + t_K}$                        | $2,3 \cdot 10^{-8}$                             | 0,0043               | 0,031                |
| 13          | Расчётное значение упругой ёмкости $\mu^*$                                                                                 |                                                 | $1,50 \cdot 10^{-4}$ | $1,52 \cdot 10^{-4}$ |

по данным временного прослеживания его повышения (см. табл. 1 и 2). Это является прямым свидетельством корректности предложенной интерпретации процессу восстановления уровня после остановки откачки, проведенной в условиях перетекания ПВ из смежного горизонта в опробуемый.

### Выводы

Итак, в настоящей работе выполнено обоснование физико-математической модели восстановления пьезометрического уровня ПВ после оста-

новки откачки из опробуемого водоносного горизонта слоистой водоносной толщи в условиях перетекания воды из смежного горизонта через слой разделяющих слабопроницаемых отложений. Эта модель полностью идентична модели восстановления уровня в напорном изолированном водоносном горизонте. Соответственно обработка и интерпретация результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня в скважинах опытных кустов в процессе ОФО слоистых водоносных систем с перетеканием должны выполняться на основе имеющихся методических приёмов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 327 с.
- Бураков М.М. Модель восстановления уровня после откачки с переменным дебитом // Водные ресурсы. 1991. Т. 18. № 2. С. 38–43.
- Бураков М.М. Случайные погрешности параметров слоистых водоносных систем, установленных по данным откачек. Алматы: «ProService LTD», 2007. 113 с.
- Бураков М.М. Опытные откачки из слоистых водоносных систем с перетеканием. Методы интерпретации результатов. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 145 с.
- Бураков М.М. Теоретические и методические проблемы интерпретации результатов опытных откачек с переменным дебитом. Алматы: Apple-print, 2017. 132 с.
- Бураков М.М., Павличенко Л.М. О восстановлении уровня после откачки с переменным дебитом // Вестник АН КазССР. 1989. № 10. С. 58–66.
- Бураков М.М., Хабиев С.Х. Методика определения фильтрационных и емкостных параметров слоистых водоносных систем по данным кустовых откачек. Алматы: АО «НЦНТИ», 2010. 67 с.
- Бураков М.М., Хабиев С.Х. Методика интерпретации результатов опытных откачек из слоистых систем с перетеканием при реакции смежных горизонтов на возмущение. Алматы: АО «НЦНТИ», 2011. 88 с.
- Вопросы гидрогеологических расчетов. Сборник статей / Под ред. Ф.М. Бочверова и В.М. Шестакова. М.: Мир, 1964. 180 с.
- Гидрогеология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан / Под ред. В.И. Дмитриевского. М.: Недра, 1970. 460 с.
- Гиринский Н.К. Некоторые вопросы динамики подземных вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. 1947. № 9. С. 3–102.
- Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Недра, 1983. 358 с.
- Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.

14. Мятлев А.Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1947. № 9. С. 1069–1088.
15. Плугина Т.А. Определение геофильтрационных параметров слабопроницаемых отложений натурными методами. Обзор. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИАМС, 1978. 56 с.
16. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
17. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006. 796 с.
18. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 831 с.
19. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
20. Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history // Transactions. American Geophysical Union. 1946. Vol. 27. P. 526–534.
21. Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers // Transactions. American Geophysical Union. 1956. Vol. 37. P. 702–714.
22. Hantush M.S. Non-steady flow to a well partially penetrating an infinite leaky aquifer // Proceedings of the Iraqi Scientific Societies. 1957. Vol. 1. P. 10–19.
23. Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65. P. 3713–3725.
24. Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions. American Geophysical Union. 1955. 36. P. 95–100.
25. Horner D.R. Pressure buildups in wells // Third World Petroleum Congress Proceedings. The Hague, 1951. Vol. 2. P. 503–521.
26. Jacob C.E. Radial flow in a leaky artesian aquifer // Transactions. American Geophysical Union. 1946. Vol. 27. P. 198–205.
27. Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // Journal of Hydrology. 1969. Vol. 33. No. 2. P. 158–166.
28. Theis C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions. American Geophysical Union. 1935. Vol. 16. P. 519–524.
1. Borevskii B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. *Metodika opredeleniya parametrov vodonosnykh gorizontov po dannym otkachek* [Methods for Determining Aquifer Characteristics by Pumping Test Data]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 326 p. (in Russian).
2. Burakov M.M. Model of Restoring the Level After Pumping with a Variable Flow Rate. *Vodnyye resursy — Water Resources*, 1991, Vol. 18, no. 2, pp. 38–43. (in Russian).
3. Burakov M.M. *Sluchainnye pogreshnosti parametrov sloistnykh vodonosnykh sistem, ustanovlennyykh po dannym otkachek* [Random Errors in Multi-Layer Aquifer Characteristics Derived from Pumping Tests]. Almaty, ProService LTD, 2007, 113 p. (in Russian).
4. Burakov M.M. *Opytnyye otkachki iz sloistnykh vodonosnykh sistem s peretekaniyem. Metody interpretatsii rezul'tatov* [Experienced Pumping from Layered Aquifer Systems with Overflow. Methods of Interpretation of the Results]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 145 p. (in Russian).
5. Burakov M.M. *Teoreticheskiye i metodicheskiye problemy interpretatsii rezul'tatov opytnykh otkachek s peremennym debitom* [Theoretical and Methodological Problems of Interpreting the Results of Pilot Pumpings with Variable Flow Rates]. Almaty, Apple-print, 2017, 132 p. (in Russian).
6. Burakov M.M., Pavlichenko L.M. On the Restoration of the Level After Pumping with Variable Debit. *Vestnik AN KazSSR — Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR*, 1989, no.10, pp. 58–66. (in Russian).
7. Burakov M.M., Khabiev S.Kh. *Metodika opredeleniya fil'tratsionnykh i yemkostnykh parametrov sloistnykh vodonosnykh sistem po dannym kustovykh otkachek* [The Method for Determining the Filtration and Capacitive Parameters of Layered Aquifer Systems According to the Pumping Data]. Almaty, AO NCNTI [JSC National Center for Scientific and Technical Information], 2010, 67 p. (in Russian).
8. Burakov M.M., Khabiev S.Kh. *Metodika interpretatsii rezul'tatov opytnykh otkachek iz sloistnykh sistem s peretekaniyem pri reaktzii smezhnykh gorizontov na vozmushcheniye* [The Method of Interpretation of the Results of Experimental Pumping out of Layered Systems With Overflow During the Reaction of Adjacent Horizons to Disturbances]. Almaty, AO NCNTI [JSC National Center for Scientific and Technical Information], 2011, 88 p. (in Russian).
9. *Voprosy gidrogeologicheskikh raschetov. Sbornik statey* [Questions of Hydrogeological Calculations. Collection of Articles]. Ed. F.M. Bochever, V.M. Shestakov. Moscow, Mir Publ., 1964, 180 p. (in Russian).
10. *Gidrogeologiya SSSR. T. XXXVI. Yuzhnyy Kazakhstan* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXXVI. South Kazakhstan]. Ed. V.I. Dmitrovsky. Moscow, Nedra Publ., 1970, 460 p. (in Russian).
11. Girinsky N.K. Nekotoryye voprosy dinamiki podzemnykh vod (Some Questions of Groundwater Dynamics). *Voprosy gidrogeologii i inzhenernoy geologii — Hydrogeology and Engineering Geology Issues*, 1947, no. 9, pp. 3–102. (in Russian).
12. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater Dynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 358 p. (in Russian).
13. Mironenko V.A., Shestakov V.M. *Teoriya i metody interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh rabot* [Theory and Methods of Interpretation of Experimental Filtration Works]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 328 p. (in Russian).
14. Myatiev A.N. Pressure Complex of Groundwater and Wells. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk — News of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences*. 1947, no. 9, pp. 1069–1088. (in Russian).
15. Plugina T.A. *Opredeleniye geofil'tratsionnykh parametrov slabopronitsayemykh otlozheniy naturnymi metodami. Obzor. gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya* [Determination of Geofiltration Parameters of Low-Permeable Sediments Using Natural Methods. Overview. Hydrogeology and Engineering Geology]. Moscow, VIEMS Publ., 1978, 56 p. (in Russian).
16. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of Groundwater Movement]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 664 p. (in Russian).
17. Sindalovskiy L.N. *Spravochnik analiticheskikh resheniy dlya interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh oprobovaniy* [Handbook of Analytical Solutions for the Interpretation of Test Filtration Tests]. SPb, SPbGU Publ., 2006, 796 p. (in Russian).
18. *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Special Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Ed. M. Abramowitz, I. Stegun. Moscow, Nauka Publ., 1979, 831 p. (in Russian).
19. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, MGU Publ., 1995, 368 p. (in Russian).
20. Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well-Field History. *Transactions. American Geophysical Union*, 1946, Vol. 27, pp. 526–534.
21. Hantush M.S. Analysis of Data From Pumping Tests in Leaky Aquifers. *Transactions. American Geophysical Union*, 1956, Vol. 37, pp. 702–714.
22. Hantush M.S. Non-Steady Flow to a Well Partially Penetrating an Infinite Leaky Aquifer. *Proceedings of the Iraqi Scientific Societies*, 1957, Vol. 1, pp. 10–19.
23. Hantush M.S. Modification of the Theory of Leaky Aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 1960, Vol. 65, pp. 3713–3725.
24. Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquifer. *Transactions. American Geophysical Union*, 1955, 36, pp. 95–100.
25. Horner D.R. Pressure Buildups in Wells. Third World Petroleum Congress Proceedings. The Hague, 1951, Vol. 2, pp. 503–521.
26. Jacob C.E. Radial Flow in a Leaky Artesian Aquifer. *Transactions. American Geophysical Union*, 1946, Vol. 27, pp. 198–205.
27. Sternberg Y.M. Some Approximate Solutions of Radial Flow Problems. *Journal of Hydrology*, 1969, Vol. 33, no. 2, pp. 158–166.
28. Theis C.V. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage. *Transactions. American Geophysical Union*, 1935, Vol. 16, pp. 519–524.

## REFERENCES