

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.3

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ  
ПО ДАННЫМ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ  
В УСЛОВИЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

*А.В. МАЛКОВ<sup>1</sup>, И.М. ПЕРШИН<sup>2</sup>, И.С. ПОМЕЛЯЙКО<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ООО «Нарзан-гидроресурсы»,  
43, Кирова ул., Кисловодск 357700, Ставропольский край, Россия  
e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru*

*<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, филиал г. Пятигорск,  
56, 40 лет Октября ул., Пятигорск, Ставропольский край, 357500, Россия  
e-mail: ivmp@yandex.ru*

Предложена методика определения гидродинамических параметров в условиях гидравлической связи водоносных горизонтов. Тестовым моделированием показано, что существующие методы определения параметра перетекания (Тейс, Джейкоб, Хантуш) дают существенные погрешности. Они могут применяться только при тех допущениях, которые приняты при выводе известных расчетных зависимостей. Показано, что точность определения параметра перетекания во многом определяется соотношением водоотдачи изучаемого водоносного горизонта и смежного, являющегося источником дополнительного питания. Для целого круга задач, когда речь идет о поступлении некачественных загрязненных вод из горизонта-донора или при изучении динамики кондиционного состава минеральных вод, процессы перетекания могут являться определяющим фактором. Предлагаемая методика свободна от этих недостатков, но требует проведения цикла кустовых опытно-фильтрационных работ по всем взаимодействующим водоносным горизонтам.

Ключевые слова: опытно-фильтрационные работы; водопроницаемость; водоотдача; параметр перетекания; понижение уровня; кустовая откачка.

A METHOD OF ESTIMATION THE PARAMETERS OF THE AQUIFERS BASED  
ON THE DATA OF TESTING FILTRATION WORKS UNDER CONDITIONS  
OF HYDRAULIC COUPLING

*A. V. MALKOV<sup>1</sup>, I. M. PERSHIN<sup>2</sup>, I. S. POMELYAYKO<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Limited Liability Company «Narzan-hydroresources»  
43 Kirov street, Kislovodsk 357700, Russia  
e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru*

*<sup>2</sup>North-Caucasian Federal University, a branch of Pyatigorsk  
56 avenue of the 40 years of October, Pyatigorsk 357500, Stavropol Territory, Russia  
e-mail: ivmp@yandex.ru*

The paper proposes a technique for determining the hydrodynamic parameters under conditions of the hydraulic coupling of the aquifers. A test modeling has shown that the existing methods of determining the flow parameter (Teys, Jacob, Hantush) give significant errors. They can be used only under the assumptions that are made in the derivation of the known calculated dependencies. The accuracy of the determining the overflow parameter has been shown to be largely determined by the ratio of the water loss of the aquifer under study and the adjacent one, which is a source of additional nutrition. For a whole range of tasks, such as income of the poor-quality polluted waters from the donor horizon or studying the dynamics of the mineral water conditioning composition, the processes of overflow can be a determining factor. The proposed technique is free from these shortcomings, but requires a cycle of cluster testing filtration work on all interacting aquifers.

Keywords: testing filtration work; water conductivity; water recoil; the flow parameter; lowering of the level; cluster pumping.

Водоупорные отложения, разделяющие толщу обводнённых горных пород на более или менее самостоятельные водоносные горизонты в той или иной степени являются водопроницаемыми, и количественно оцениваются параметром перетекания. Во многих задачах водоносные горизонты можно принимать как изолированные в разрезе, однако существует довольно большой круг задач, когда такие допущения принимать нельзя. Как пример можно привести случаи, когда эксплуатируемый водоносный горизонт перекрывается в кровле грунтовым, санитарно-гигиеническое состояние которого не соответствует требованиям безопасности, или же месторождения минеральных вод, для которых кондиционный состав является определяющим. Игнорирование процессов перетекания в таких случаях может привести к очень серьёзным просчётам.

В настоящее время известны два метода определения параметра перетекания: метод эталонной кривой Тейса-Джейкоба [1, 3] и графоаналитический метод Хантуша. Оба метода достаточно подробно изложены в литературных источниках и не требуют каких-либо комментариев. Единственное, что требуется уточнить, — это принятые при выводе уравнений допущения. Известные расчётные зависимости приняты для условий, когда понижение уровня в горизонте-доноре (горизонт № 1) остаётся постоянным, или весьма незначительным, а откачка воды производится из второго горизонта. Расчётная схема для указанных решений представлена на рис. 1.

Решение Тейса для указанной схемы [1, 3] имеет вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi \cdot km} W(\alpha, r/B), \quad (1)$$

где  $W(\alpha, r/B)$  — так называемая функция колодца, которая затабулирована во многих литературных источниках;  $S$  — понижение уровня в наблюдаемой точке, удалённой от возмущающей скважины на расстояние  $r$ ;  $\alpha = r^2/4a^*t$ ;  $B = \sqrt{a^*/b}$ . Здесь все параметры — есть параметры второго горизонта.

При выполнении условий  $\alpha \leq 0,1$ ,  $r/B \leq 0,2$ , выражение (1) может быть представлено в следующем виде [4—6]:

$$S = \frac{0,183 \cdot Q}{km} \lg \left( \frac{2,25 \cdot a^* t}{r^2 \cdot (1 + 1,78 \frac{b}{\mu^*} t)} \right), \quad (2)$$

где  $\mu^*$  — упругая водоотдача пласта;  $b$  — параметр перетекания.

Для определения параметров по (2), можно использовать сочетание графоаналитического метода и метода подбора [5, 6].

Н.Н. Лапшиным [2] с помощью тестового моделирования было показано, что уравнение (1) может быть использовано для условий, когда соотношение пьезопроводности изучаемого горизонта и горизонта-донора меняется в диапазоне от 0,1 до 10. Это действительно справедливо, но только для оценки параметров водопроницаемости и водоотдачи изучаемого горизонта. Что касается параметра перетекания, то здесь все сложнее. Дело в том, что оценка параметра перетекания во многом зависит от соотношения водоотдачи гидравлически связанных водоносных горизонтов. По результатам тестового моделирования для самых различных соотношений параметров установлено, что расчётные зависимости (1, 2) справедливы практически только для тех допущений, которые были приняты при

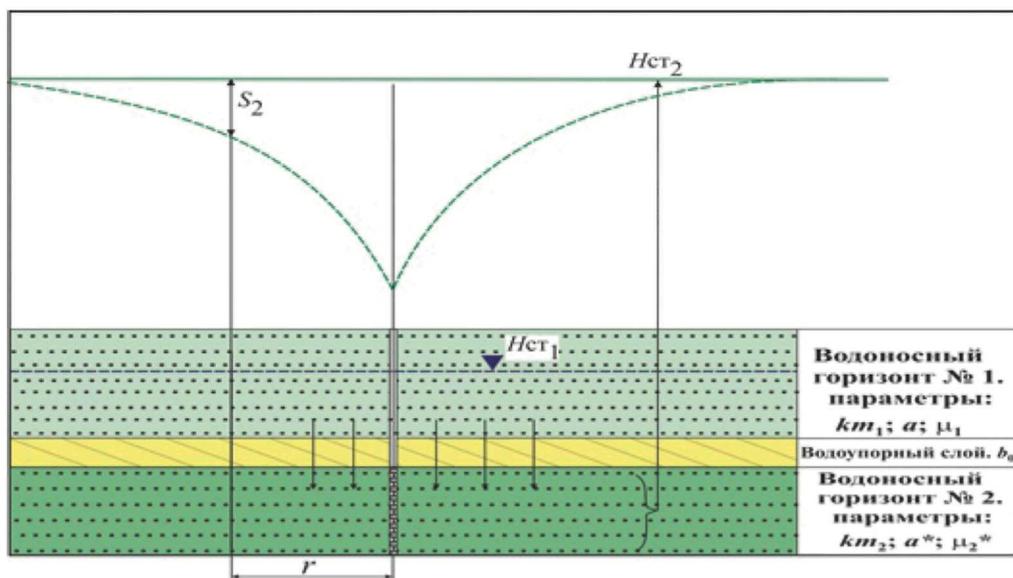


Рис. 1. Расчётная схема

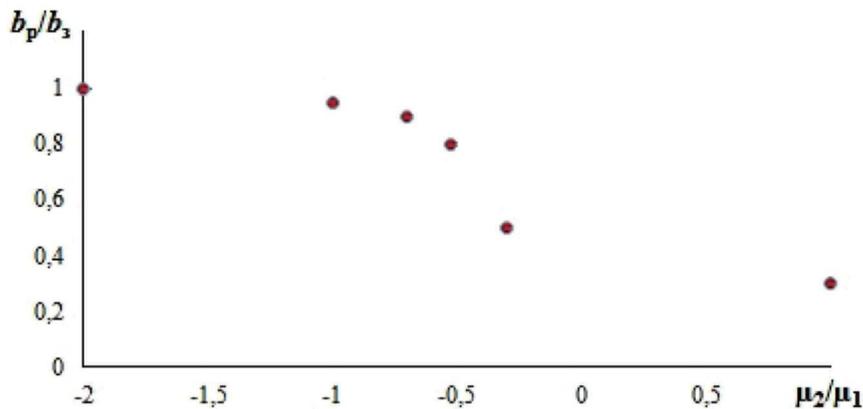


Рис. 2. Соотношение расчётного ( $b_p$ ) и заданного ( $b_3$ ) параметра перетекания от соотношения водоотдач

выводе уравнений. Таким образом, водоотдача горизонта-донора значительно больше таковой изучаемого горизонта из которого производится откачка, и понижением в нем можно пренебречь. Как пример, на рис. 2 представлены результаты тестового моделирования для различных соотношений водоотдачи водоносных горизонтов. Как следует из рис. 2, представленные выше зависимости можно использовать при условии, что соотношение водоотдачи горизонтов  $\mu_2/\mu_1 < 0,3$ . В этом случае погрешность в расчетах не будет превышать 20 %.

В случае, если в горизонте-доноре происходит снижение уровня в процессе откачки, известное решение [1, 2], при допущении  $a_1^* = a_2^* = a^*$ , имеет вид:

$$\begin{cases} S_1 = \frac{Q_2 \cdot b_1}{2(b_1 + b_2)} [-E_i(-\alpha)] - \frac{Q_2 \cdot b_1}{2(b_1 + b_2)} W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right) \\ S_2 = \frac{Q_2 \cdot b_1}{2(b_1 + b_2)} [-E_i(-\alpha)] + \frac{Q_2 \cdot b_2}{2(b_1 + b_2)} W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $Q_2^* = \frac{Q_2}{4\pi \cdot km_2}$ ;  $b_1 = \frac{b_0}{\mu_1}$ ;  $b_2 = \frac{b_0}{\mu_2}$ ;  $B = \sqrt{\frac{a^*}{b_1 + b_2}}$ ;

$$\alpha = \frac{r^2}{4a^* \cdot t}$$

Расчётная схема для данного случая представлена на рис. 3.

Очевидно, что для данного случая необходимо иметь наблюдательные скважины на оба водоносных горизонта.

Из (3) разница в понижениях уровня двух водоносных горизонтов равна:

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_2}{4\pi \cdot km_2} W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right). \quad (4)$$

При  $\alpha \leq 0,1$ ;  $r/B \leq 0,2$  уравнение (4) переписывается в виде:

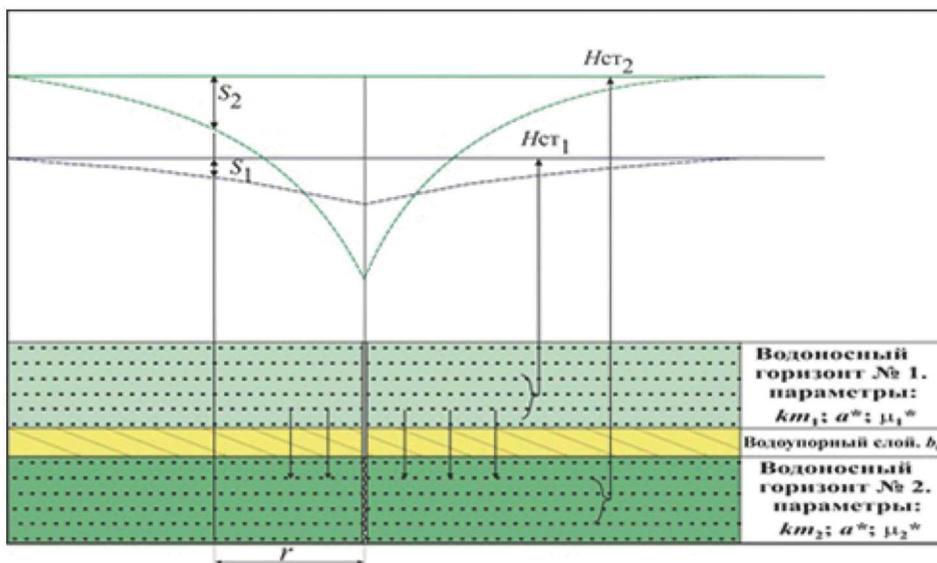


Рис. 3. Расчётная схема

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_2}{4\pi \cdot km_2} \operatorname{Ln} \left( \frac{2,25 \cdot a^* \cdot t}{r^2 \cdot (1 + 1,78(b_1 + b_2))} \right) = \frac{Q_2}{4\pi \cdot km_2} \operatorname{Ln} \left( \frac{2,25 \cdot a^* \cdot t}{r^2 \cdot \left( 1 + 1,78 \frac{b_0 \cdot \xi}{\mu_2^*} t \right)} \right) \quad (4)$$

или

$$S_2 - S_1 = \frac{0,183 \cdot Q_2}{km_2} \operatorname{Lg} \frac{2,25 \cdot a^*}{r^2} - \frac{0,183 \cdot Q_2}{km_2} \operatorname{Lg}(t) - \frac{0,183 \cdot Q_2}{km_2} \operatorname{Lg} \left( 1 + 1,78 \cdot \frac{b_0 \cdot \xi}{\mu_2^*} t \right), \quad (5)$$

где  $\xi = 1 + \frac{\mu_2^*}{\mu_1}$ .

Нетрудно заметить, что в уравнении (5) первые два члена в правой части представляют собой процесс понижения уровня, который происходит в изолированном неограниченном водоносном горизонте по схеме Тейса-Джейкоба. Третий член есть некоторая функция, связанная с перетеканием. Введя обозначения, будем иметь:

$$S_2 - S_1 = A + C \cdot \operatorname{Lg}(t) - C \cdot \operatorname{Lg}(1 + G \cdot t), \quad (6)$$

где

$$A = \frac{0,183 \cdot Q_2}{km_2} \operatorname{Lg} \frac{2,25 \cdot a^*}{r^2}; \quad C = \frac{0,183 \cdot Q_2}{km_2}; \quad G = \frac{1,78 \cdot b_0 \cdot \xi}{\mu_2^*}$$

или

$$S^* = G \cdot t, \quad \text{где } S^* = 10^{\frac{(A + C \cdot \operatorname{Lg}(t) - S_2 + S_1)}{C}} - 1. \quad (7)$$

Уравнение (7) в координатах  $S^* \div t$  есть прямая линия, выходящая из начала координат с угловым коэффициентом, равным обобщённому параметру ( $G$ ).

Как следует из описания, для интерпретации материала опытно-фильтрационных работ, необ-

Таблица 1

Параметры горизонтов принятые при моделировании					
Номер горизонта	$km$ , м <sup>2</sup> /сут.	$\mu^*$	$a^*$ , м <sup>2</sup> /сут.	$b$ , сут <sup>-1</sup>	$Q$ , м <sup>3</sup> /сут.
1	20	0,001	20000	0,0001	0
2	60	0,001	60000		1000

Таблица 2

Результаты моделирования ОФР					
$t$ , сут.	$Lg(t)$	$S_1$	$S_2$	$S^*$	
0,2	-0,699	0,03	3,72	-0,03	
0,4	-0,398	0,08	4,62	0,01	
0,5	-0,301	0,10	4,91	0,03	
0,7	-0,155	0,14	5,33	0,08	
1,0	0,000	0,20	5,77	0,15	
1,5	0,176	0,29	6,25	0,28	
2,0	0,301	0,38	6,58	0,42	
3,0	0,477	0,55	6,96	0,81	
5,0	0,699	0,85	7,50	1,51	
7,0	0,845	1,10	7,82	2,32	
9,0	0,954	1,32	8,04	3,27	
11,0	1,041	1,51	8,22	4,26	
13,0	1,114	1,67	8,36	5,32	
17,0	1,230	1,95	8,59	7,59	
21,0	1,322	2,17	8,76	10,02	

ходимо знание водоотдачи обоих водоносных горизонтов, в связи с чем кустовые откачки необходимо проводить по обоим водоносным горизонтам.

Как пример расчёта ниже приводится применение указанной методики по данным тестового моделирования. Моделирование проводилось в программе Mod-Tech при параметрах, представленных в табл. 1.

Радиус от возмущающей скважины до наблюдательных 40 м. Информация (в сокращении) о результатах моделирования опытно-фильтрационных работ (ОФР) дана в табл. 2.

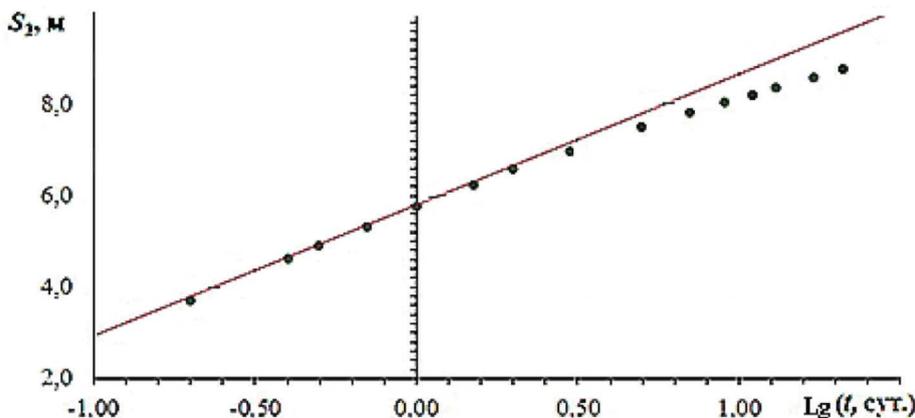


Рис. 4. График временного прослеживания по наблюдательной скважине, captирующей рабочий (второй) водоносный горизонт

Здесь же представлены расчёты обобщенного параметра  $S^*$ .

На рис. 4 изображен график временного прослеживания по наблюдательной скважине, каптuriрующей основной рабочий горизонт в координатах  $S_2 \div Lg(t)$ . Прямая линия, проведённая по начальным точкам, характеризует процесс формирования понижения уровня в отсутствие перетекания. По этой линии можно определить параметры изучаемого водоносного горизонта (водопроводимость, упругую водоотдачу, пьезопроводность). Угловой коэффициент линии ( $C$ ) равен 3,0; начальная ордината ( $A$ ) — 5,8 м.

Расчетные значения параметров второго водоносного горизонта равны:

$$km = \frac{0,183 \cdot Q_2}{C} = \frac{0,183 \cdot 1000}{3,0} 61,0 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

$$a^* = \frac{10^{A/C}}{2,25} r^2 = \frac{10^{5,8/3}}{2,25} 40^2 = 61000 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

$$\mu_2^* = \frac{km}{a^*} = \frac{61}{61000} = 0,001.$$

Как следует из расчётов, сходимость результатов очень хорошая. Для определения параметра перетекания ( $b$ ) необходимо построение графика в координатах  $S^* \div t$ . Такой график изображён на рис. 5.

Из рис. 5. следует, что обобщенный параметр ( $G$ ) равен 0,43. Тогда коэффициент перетекания ( $b$ ) найдётся из соотношения ( $\xi = 2,0$ ):

$$b_0 = \frac{G \cdot \mu_2^*}{1,78 \cdot \xi} = \frac{0,43 \cdot 0,0001}{1,78 \cdot 2} = 0,00012 \text{ сут.}^{-1}$$

Из расчётов следует, что модельные и полученные расчётным путём параметры водоносного горизонта и параметра перетекания, очень близки. Такие расчёты были проведены для большого диапазона параметров водоносных горизонтов. Расчёты показывают, что достаточно точное определение параметра перетекания по данной методике может быть выполнено при условии, что соотношение водоотдачи водоносных горизонтов находится в диапазоне  $x < 5,0$ . При таком соотношении, погрешность в определении параметра перетекания не превысит 20 %. Это видно из табл. 3, куда сведены результаты расчётов тестового моделирования. Как видно, расхождения между заданными ( $b_{\text{задано}}$ ) и расчётными ( $b_{\text{расчетн.}}$ ) параметрами при выполнении указанного условия незначительны.

Из табл. 3, следует также, что при  $\xi > 5,0$ , погрешность в определении параметра перетекания достигает 40 % и более. В этом случае следует производить определение его по откачке из горизонта, водоотдача которого минимальна.

Как пример, для случая № 6 (табл. 3), имеющего наибольшую погрешность, обработана откачка из первого горизонта при тех же фильтрационных параметрах.

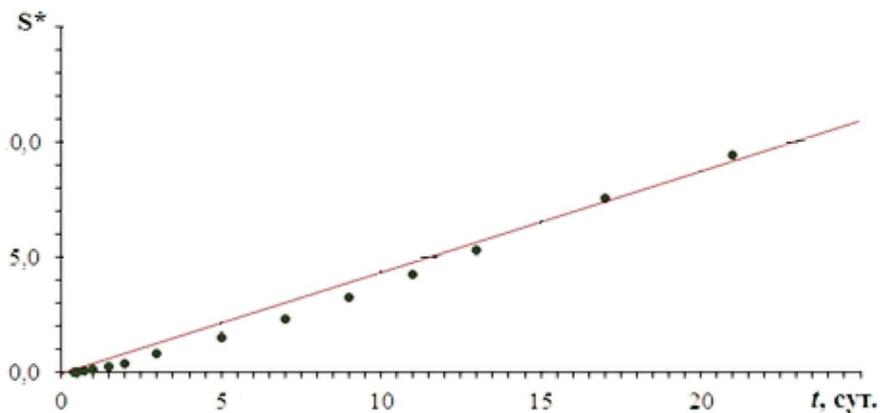


Рис. 5. График для определения комплексного параметра  $G$

Таблица 3

Зависимость погрешности ( $\delta$  %) при определении параметра  $b$  от  $\xi$

Номер	$\mu_1^*$	$\mu_2^*$	$a_1^*$	$a_2^*$	$\xi = 1 + \mu_2^*/\mu_1^*$	$b_{\text{зад.}}$	$b_{\text{расч.}}$	$\delta, \%$
1	0,1	0,0010	200	60000	1,01	0,00010	0,000095	5,0
2	0,01	0,0010	2000	60000	1,10	0,00010	0,000106	6,0
3	0,001	0,0010	20000	60000	2,00	0,00010	0,000121	21,0
4	0,0005	0,0010	40000	60000	3,00	0,00010	0,000103	3,0
5	0,0002	0,0010	100000	60000	6,00	0,00010	0,000059	41,0
6	0,0001	0,0010	200000	60000	11,00	0,00010	0,000033	67,0

Таблица 4

Результаты тестового моделирования

$t$ , сут	$Lg(t)$	$S_1$	$S_2$	$S^*$
0,2	-0,699	15,21	0,12	-0,05
0,4	-0,398	17,38	0,24	0,05
0,5	-0,301	17,98	0,29	0,12
0,7	-0,155	18,76	0,40	0,30
1,0	0,000	19,43	0,54	0,59
1,5	0,176	19,99	0,74	1,15
2,0	0,301	20,29	0,92	1,77
3,0	0,477	20,61	1,20	3,11
5,0	0,699	20,95	1,60	5,96
7,0	0,845	21,19	1,89	8,89
9,0	0,954	21,38	2,11	11,82
11,0	1,041	21,54	2,30	14,81
13,0	1,114	21,68	2,45	17,74
17,0	1,230	21,90	2,70	23,71
21,0	1,322	22,09	2,91	29,71

Результаты тестового моделирования представлены в табл. 4. Графическая интерпретация результатов моделирования изображена на рис. 6.

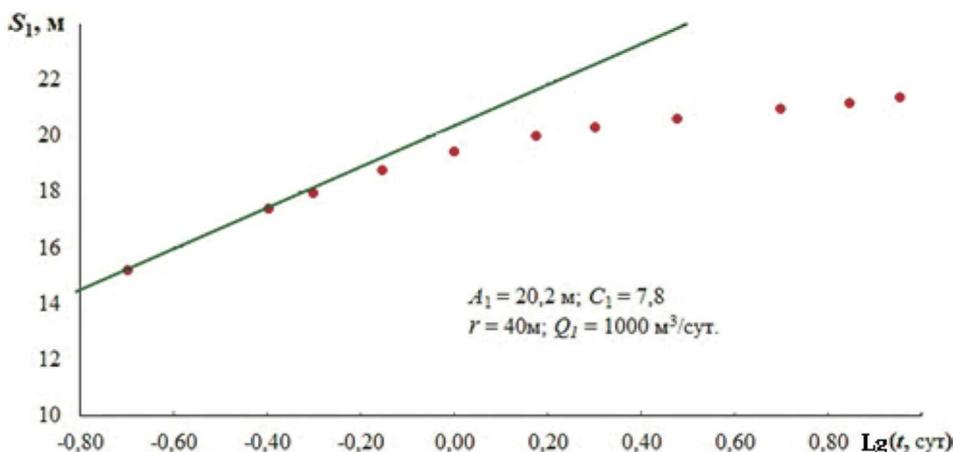


Рис. 6. График временного прослеживания. Тестовое моделирование

Вспомогательный график для определения параметра перетекания представлен на рис. 7.

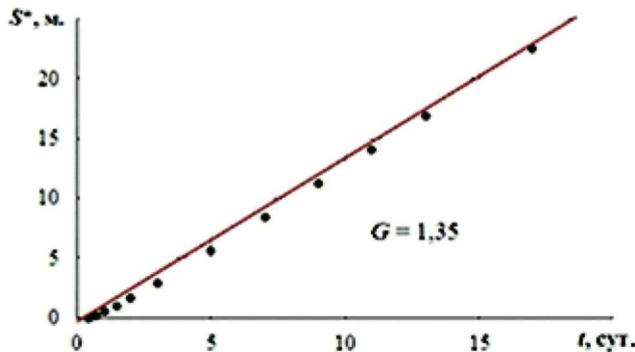


Рис. 7. График для определения комплексного параметра G

Расчётные значения параметров второго водоносного горизонта равны:

$$km = \frac{0,183 \cdot Q_1}{C_1} = \frac{0,183 \cdot 1000}{7,8} = 23,46 \text{ м}^2/\text{сут.},$$

$$a^* = \frac{10^{A/C}}{2,25} r^2 = \frac{10^{20,2/7,8}}{2,25} 40^2 = 238000 \text{ м}^2/\text{сут.},$$

$$\mu_2^* = \frac{km}{a^*} = \frac{23,46}{238000} = 0,000098.$$

Параметр перетекания равен:

$$b_0 = \frac{G \cdot \mu_1^*}{1,78 \cdot \xi} = \frac{1,35 \cdot 0,000098}{1,78 \cdot 1,1} = 0,00007 \text{ сут.}^{-1}$$

Следовательно, сходимость результатов также достаточно высокая.

Более сложный случай, когда водоносная толща сложена тремя водоносными горизонтами. Строгое решение для данной задачи имеется, например у И.А. Чарного [7], однако оно имеет такой сложный вид, что его тяжело использовать даже для анализа процесса, не говоря о разработке методики.

Здесь можно предложить приём, позволяющий на основе предлагаемой методики оценить параметры перетекания и для трёхслойной системы. Схема изучения водоносных горизонтов не меняется. Также выполняются кустовые откачки по всем горизонтам, но для определения параметра перетекания используются откачки из первого и третьего водоносных горизонтов.

Таким образом, можно утверждать следующее.

1. Существующие методы определения параметра перетекания по данным ОФР имеют узкий диапазон применения.

2. Для более точного определения параметра перетекания необходимо проведение кустовой откачки для обоих водоносных горизонтов.

3. Точность определения параметра перетекания определяется не только соотношением пьезо-

проводности. В большей степени она определяется соотношением водоотдачи гидравлически связанных водоносных горизонтов.

4. Область применения предлагаемой методики ограничивается соотношением водоотдачи горизонтов  $\xi < 5,0$ . Учитывая наличие вертикальной фильтрационной зональности, это условие будет выполняться в подавляющем большинстве случаев.

5. При условии  $\xi > 5,0$  определение параметра перетекания следует определять по ОФР из горизонта с более низким значением водоотдачи.

6. При трёхслойной водоносной толще обработка данных опытно-фильтрационных работ для определения параметров перетекания между первым и вторым, вторым и третьим водоносными горизонтами не меняется, но для интерпретации следует использовать ОФР по первому и третьему водоносным горизонтам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочевер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 325 с.
2. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н. К вопросу о гидрогеологических расчетах скважин в слоистых толщах. ВДГЕО, Гидрогеология, вып. 14, 1968.
3. Де Уи с т. Гидрогеология с основами гидрологии суши М.: Мир, 1969. 294 с.
4. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: Системный анализ, диагностика, прогноз, управление/ А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко и др. М.: Наука, 2015. 283 с.
5. Малков А.В. Гидравлический метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. 2009. № 11. С. 45–50.
6. Малков А.В. Определение гидродинамических параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 31–34.
7. Чарный И.А. Фильтрация в пласте с непроницаемыми кровлей и подошвой, разделенном слабопроницаемой перемычкой // Труды МИНХ и ГП им. Губкина. Вып. 33. М.: Гостоптехиздат, 1961. С. 122–130.

УДК 550.4; 556.3; 551.311.8

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ДЕЛЬТЕ МЕКОНГА (ВЬЕТНАМ) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА

ЛАМ ХОАНГ КУОК ВЬЕТ<sup>1</sup>, А.Б. ЛИСЕНКОВ<sup>1</sup>, В.Ю. ЛАВРУШИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный геологоразведочный университет  
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия  
e-mail: lamviet2906@gmail.com, Lisenkov.rsgpu@mail.ru

<sup>2</sup>Геологический институт РАН,  
7, Пыжевский пер., Москва 119017, Россия  
e-mail: v\_lavrushin@ginras.ru

Формирование подземных вод дельты Меконга является сложной проблемой, которая до настоящего времени не имеет однозначного решения. Это накладывает ограничения на условия эксплуатации подземных вод. В водоносных горизонтах дельты Меконга присутствуют как пресные, так и минерализованные воды, распределение которых имеет сложный характер. Считается, что минерализованные воды имеют седиментогенный генезис (захоронённые морские воды), а пресные — инфильтрационный. Изучение стабильных изотопов кислорода и водорода в подземных водах дельты Меконга показало, что подземные воды формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Кроме того, значимым фактором образования подземных вод в средне-, нижнеплиоценовых и миоценовых водоносных горизонтах является смешение атмогенных и морских вод. Уменьшение значений стабильных изотопов с увеличением глубины залегания подземных вод связано с тем, что области питания глубоко залегающих водоносных горизонтов располагаются выше по абсолютным отметкам и более удалены от береговой линии. Результаты исследований позволяют оптимизировать схему эксплуатации водозаборов подземных вод, создать условия для ограничения вторжения солёных морских вод в пределы эксплуатируемых водоносных горизонтов.

Ключевые слова: стабильные изотопы; подземные воды; изотоп <sup>18</sup>O; дейтерий; концентрация хлора.