

# МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ полевых опытно- фильтрационных исследований с целью определения коллекторских свойств водоносных горизонтов



**А. В. Малков,**  
директор, канд. геол.-минерал. наук  
ООО «Нарзан-гидроресурсы»  
Trias2005@.ru

**Ключевые слова:** подземные воды, режим фильтрации, фильтрационные параметры пласта, гидрогеологические кусты, слабопроницаемые пласты, водопроницаемость, водоносный горизонт.

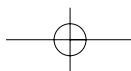
**Н**аиболее точными методами определения гидрогеологических параметров водоносных горизонтов являются полевые опытно-фильтрационные исследования. Они выполняются на специально оборудованных точках и представляют собой откачки из скважин различной продолжительности и интенсивности. Задавая возмущение в скважине, анализируют динамику изменения уровня в этой же скважине (одиночная) или в соседних наблюдательных (кустовая). Как правило, откачки выполняют в постоянном режиме водоотбора, продолжительность которого должна обеспечить достаточно надежную оценку искомых параметров. Используются и более сложные виды возмущения (монотонно возрастающий, ступенчатый, откачка при постоянном понижении и др.). Интерпретация данных опытных работ определяется геологическим строением, режимом фильтрации, схемой возмущения. Анализируются в большинстве случаев наиболее информативные первые этапы, соответствующие нестационарному или квазистационарному режимам фильтрации, когда динамика формирования понижения уровня наиболее интенсивна. Это – первые 10–30 сут. Влияние границ за такой период не сказывается (если это не оговорено особо), и расчетные схемы предполагают рассмотрение однородного, не ограниченного в плане пласта. В дальнейшем наступает период относительной стабилизации, когда информация используется для изучения характера влияния границ и гидравлических характеристик скважин.

Точечное возмущение пласта формирует развитие потока плано-радиальной формы с максимальной депрессией в точке возмущения. Если система состоит из двух или более гидравлически связанных слоев, разделенных

относительно проницаемым пропластком, то для учета взаимодействия горизонтов необходимо решать систему уравнений, описывающих баланс воды в каждом горизонте отдельно. Для описания процесса фильтрации достаточно рассмотреть водоносную систему, состоящую из трех водоносных горизонтов, разделенных двумя относительно водоупорными пропластками. Структура потока в них определяется в соответствии с предпосылками Гиринского-Мятиева, предполагающими, что в слабопроницаемых пластах движение подземных вод происходит только вертикально и подчиняется закону Дарси, в коллекторах – только горизонтально. В общей постановке система уравнений, описывающих процесс формирования понижения уровня для условий плоско-пространственной плано-радиальной фильтрации, имеет вид [1–3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial S_1}{\partial t} = a_1^* \frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{a_1^*}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} - \frac{k_0}{m_0 \mu_1^*} (S_2 - S_1); \\ \frac{\partial S_2}{\partial t} = a_2^* \frac{\partial^2 S_2}{\partial r^2} + \frac{a_2^*}{r} \frac{\partial S_2}{\partial r} - \frac{k_0}{m_0 \mu_2^*} (S_1 - S_2) - \frac{k_{00}}{m_{00} \mu_2^*} (S_3 - S_2); \\ \frac{\partial S_3}{\partial t} = a_3^* \frac{\partial^2 S_3}{\partial r^2} + \frac{a_3^*}{r} \frac{\partial S_3}{\partial r} - \frac{k_{00}}{m_{00} \mu_3^*} (S_2 - S_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – понижение уровня в основных водоносных горизонтах на любой момент времени  $t$  в произвольной точке, удаленной на расстояние  $r$  от возмущающей скважины;  $a_i^*, \mu_i^*$  – пьезопроводность и водоотдача  $i$ -го слоя,  $a_i^* = km_i / \mu_i$ ;  $k_0, m_0, k_{00}, m_{00}$  – коэффициенты фильтрации и мощность разделяющего слоя соответственно в кровле и подошве пласта;  $km_i$  – водопроницаемость  $i$ -го водоносного слоя (рис. 1).



Положим, что водоносные горизонты не ограничены в плане, откачка ведется только из второго горизонта. Тогда начальные и краевые условия формулируются следующим образом:

$$\begin{cases} t=0, & S_i=0, & Q=0; \\ t>0, & \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial S_1}{\partial r} = \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial S_3}{\partial r} = 0, & \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial S_2}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi km_2}; \\ t>0, & r \rightarrow \infty, & S_1 = S_2 = S_3; \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial S_1}{\partial r} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial S_2}{\partial r} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial S_3}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Точное решение системы (1) получается слишком сложным и малоприменимым для решения задач практического плана. Получить более удобные зависимости можно, если принять некоторые допущения, не влияющие существенно на точность результатов.

Если принять допущение о постоянстве напоров в смежных горизонтах-донорах, то система (1) трансформируется к одному дифференциальному уравнению, описывающему динамику понижения уровня в возмущаемом горизонте:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \dot{a}^* \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{\dot{a}^*}{r} \frac{\partial S}{\partial r} - b^* S, \quad (2)$$

где  $b^* = \frac{1}{\mu^*} \left( \frac{k_0}{m_0} + \frac{k_{00}}{m_{00}} \right)$ .

Решение уравнения (2) впервые получено Хантушем и Джейкобом [4]:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \int_{\alpha_0}^{\infty} \frac{e^{-\left(\alpha + \frac{r^2}{4B^* \alpha}\right)}}{\alpha} d\alpha = \frac{Q}{4\pi km} W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right), \quad (3)$$

где  $W(\alpha, r/B)$  – функция колодца;  $B = \sqrt{\frac{\dot{a}^*}{b^*}}$  – комплексный параметр.

Для указанной схемы интерпретация данных опытных работ выполняется с помощью палеточного метода (метод эталонной кривой) [2, 4, 5].

С наступлением квазистационарного режима, при  $\alpha = r^2/(4a^* t)$  и  $r/B \leq 0,2$ , уравнение (3) может быть выражено следующим образом [6, 7]:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left( \frac{2,25 a^* \cdot t}{r^2 (1 + 1,78 \cdot b \cdot t / \mu^*)} \right). \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) дают возможность использовать графо-аналитические методы определения параметров водоносных горизонтов (метод временного прослеживания).

К сожалению, во многих случаях гидрогеологические особенности изучаемых объектов не позволяют схематизировать условия на кровле и подошве пласта подобным образом, и применение указанных расчетных формул приводит к большим (до 40 % и более) погрешностям.

Более общий случай, описывающий схему, состоящую из двух водоносных горизонтов, при допущении  $a_1^* = a_2^* = a^*$  имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{Q_2}{4\pi km_2 (b_1^* + b_2^*)} \left( -b_1^* E_i(-\alpha) - b_1^* W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right) \right); \\ S_2 &= \frac{Q_2}{4\pi km_2 (b_1^* + b_2^*)} \left( -b_1^* E_i(-\alpha) + b_2^* W\left(\alpha; \frac{r}{B}\right) \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $b_1^* = b/\mu_1^* = k_0/(m_0 \mu_1^*)$ ;  $b_2^* = b/\mu_2^* = k_0/(m_0 \mu_2^*)$ ;  $B = \sqrt{a^*/(b_1^* + b_2^*)}$ ;  $a^*$  – пьезопроводность основного горизонта.

Нетрудно заметить, что (5) представляет собой результат наложения двух процессов: формирования понижения уровня при откачке из совершенно изолированных в разрезе горизонтов и откачки с учетом перетекания по схеме с постоянным напором.

Н. Н. Лапшиным [1] были проведены расчеты на электроинтеграторе по схеме Либмана при различных значениях пьезопроводности основных горизонтов. Моделировалась трехслойная схема: два водоносных горизонта, разделенных слабопроницаемым прослоем. Рассматривались два случая для условий, когда верхний питающий горизонт содержит грунтовые воды и когда тот же верхний питающий горизонт является напорным. Моделирование проводилось при различных соотношениях пьезопроводности водоносных горизонтов.

Сопоставление результатов моделирования с приведенными аналитическими зависимостями (5) показывает, что при  $B = \sqrt{a^*/(b_1^* + b_2^*)} \geq 300$  понижение уровня в рабочем горизонте дает практически идентичные результаты не только при равных параметрах пьезопроводности, но и при изменении их в диапазоне  $a_1^* = (0,1-10) \times a_2^*$ . При  $B = 200$  погрешность в расчетах при указанном диапазоне не превышает 10-20 %.

Уравнения (5) позволяют выполнить прогнозные расчеты или анализ закономерностей формирования понижения уровня в процессе возмущения пласта, однако для интерпретации опытно-фильтрационных работ возможности ограничены.

Полагая в (5)  $b_1^* = b_2^* = b^*$ ;  $\mu_1^* = \mu_2^* = \mu$ ;  $a_1^* = a_2^* = a^*$ , получим:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \frac{[-E_i(-\alpha) + W(\alpha; r/B)]}{2}. \quad (6)$$

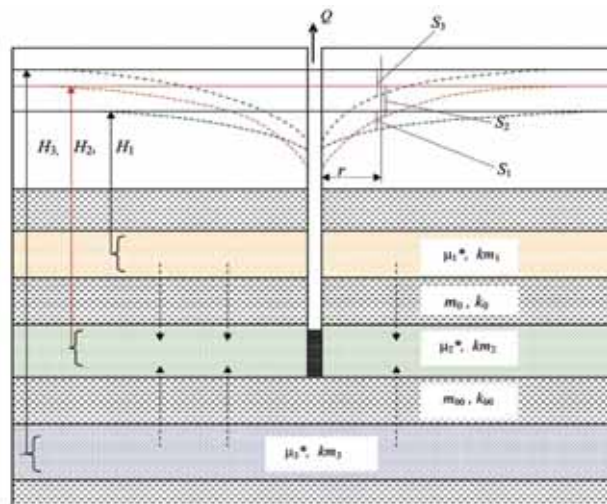
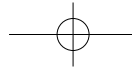


Рис. 1. Расчетная схема



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

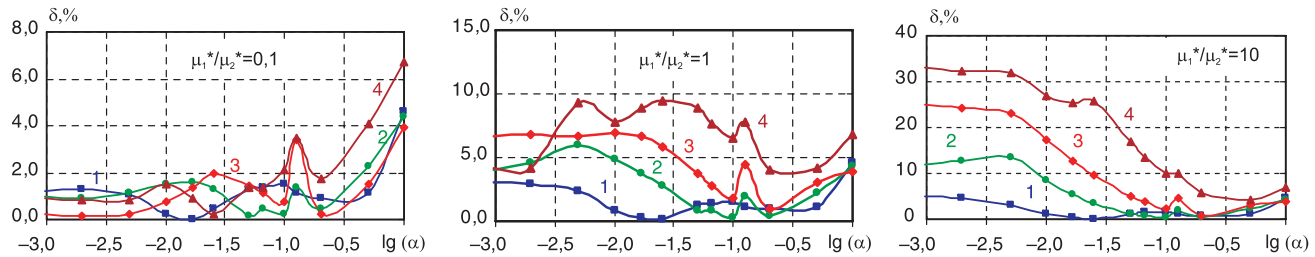


Рис. 2. Закономерности распределения погрешности определения понижения уровня при различных соотношениях параметров горизонтов (нестационарный режим):  
 1, 2, 3, 4 – значения r/B равны соответственно 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 ( $\delta = |(S_{\text{мод}} - S_{\text{расч}}) / S_{\text{мод}}| \cdot 100 \%$ )

Тестовое моделирование показывает, что последнее уравнение может использоваться в значительно большем диапазоне. На рис. 2 показан характер распределения погрешности при определении понижения уровня в исследуемом горизонте для соотношения параметров основного горизонта и горизонта-донора в диапазоне  $\mu_1^* / \mu_2^*$  от 0,1 до 10. Как видно, характер и значение погрешности зависят от соотношения параметров и удаленности точки наблюдения от возмущающей скважины. При соотношении  $\mu_1^* / \mu_2^* \leq 10$  и  $r/B \leq 0,2$  расчетная формула дает хорошие результаты, погрешность не превышает 10–15 %. Интерпретация опытных работ может проводиться по описанной выше методике эталонных кривых Тейса, где палетки выстраиваются в виде суммы функций по зависимости (6).

С наступлением квазистационарного режима уравнение (6) может быть упрощено:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \text{Ln} \frac{2,25a^*t}{r^2 \sqrt{1+1,78bt / \mu^*}}, \quad (7)$$

что также позволяет использовать традиционный графо-аналитический метод.

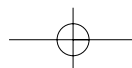
С учетом предложенных дополнений, в таблице представлены методы интерпретации полевых опытно-фильтрационных работ в зависимости от режима фильтрации и гидрогеологического строения изучаемого разреза.

**Выводы**

1. Представленные расчеты выполнены на основании строгого решения, полученного при условии равенства пьезопроводности и водоотдачи гидравлически связанных горизонтов. Данные моделирования свидетельствуют, что решение может быть распространено и для случаев, когда эти параметры существенно различаются.

2. С переходом фильтрации в квазистационарный режим интерпретация данных может выполняться графо-аналитическими методами временного прослеживания. При  $b = 0$  имеем известное решение для схемы изолированного в разрезе водоносного горизонта. При  $b > 0$  в за-

Методы интерпретации полевых опытно-фильтрационных работ			
Режим фильтрации	$b = 0$	$b > 0$	Методы определения
Нестационарный, $r^2/4a^*t > 0,1$	$S = \frac{Q}{4\pi km} (-E_i(-\alpha))$	Для схемы с грунтовым горизонтом-донором $S = \frac{Q}{4\pi km} W(\alpha, r/B)$	Эталонных кривых (палеточные)
		Для схемы с напорным горизонтом-донором $S = \frac{Q}{4\pi km} \frac{[-E_i(-\alpha) + W(\alpha, r/B)]}{2}$	
Квазистационарный, $r^2/4a^*t < 0,1$ $r/B < 0,2$	$S = \frac{Q}{4\pi km} \text{Ln} \frac{2,25a^*t}{r^2}$	Для схемы с грунтовым горизонтом-донором $S = \frac{Q}{4\pi km} \text{Ln} \frac{2,25a^*t}{r^2(1+1,78 \cdot b \cdot t / \mu^*)}$	Временного прослеживания (графо-аналитические)
		Для схемы с напорным горизонтом-донором $S = \frac{Q}{4\pi km} \text{Ln} \frac{2,25a^*t}{r^2 \sqrt{1+1,78 \cdot b \cdot t / \mu^*}}$	
Стационарный	$S = \frac{Q}{2\pi km} \text{Ln} \frac{R}{r}$	$S = \frac{Q}{2\pi km} \text{Ln} \frac{1,12 \sqrt{B}}{r}$	Хантуша (графо-аналитические)



висимости от геологического разреза необходимо рассматривать схему с неограниченной емкостью питающего горизонта (грунтовые воды), либо схему с конечной емкостью (напорные воды).

3. При проектировании опытных гидрогеологических кустов следует учитывать некоторые требования. В частности, ближайшая наблюдательная скважина должна располагаться в пределах радиуса, определяемого из соотношения  $r \leq 0,2B$ .

4. Погрешность определения параметров не превышает 10–15 % практически для всего наблюдаемого в реальных условиях диапазона фильтрационных свойств, что вполне удовлетворяет условию задачи. ■

**Methods of interpretation of field filtration test data aimed at the assessment of porosity and permeability characteristics of aquifers**

**A. V. Malkov, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Director OOO Narzan-Gidroresursy**

The article describes improved methods of interpretation of the field filtration test data aimed at the assessment of porosity and permeability characteristics of aquifers. The available Theis, Jacob, Hantush methods are applicable assuming that the feeding aquifer is of unlimited capacity and no drawdown occurs. Neglecting the drawdown factor for a donor-aquifer in some cases may result in misinterpretation of hydrodynamic parameters. The authors propose estimated dependences and methods of interpretation of field test data taking into account the ultimate capacity of the donor-aquifer. The accuracy of the methods is estimated at 10 - 15%.

**Key words:** undergrounds waters, drawdown, filtration tests, aquifer filtration parameters, hydrogeological wells.



*Список литературы=References*

1. Бореvский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973. = Borevsky B., Samsonov B., Yazvin L. Methodics of parameters of water-carry horizon according to pumps out. M.: Nedra, 1973.
2. Бочевеv Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. = F. M. Bochever. Theory and practical methods of hydrogeological calculation of useful underground water reserves. M. Nedra Publishers, 1968 (in Russian).
3. Гавич И. К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988. = I. K. Gavich. Hydrogeodynamics. M.: Nedra Publishers, 1988 (in Russian).
4. Гидрогеологические расчеты на ЭВМ: Учебное пособие / Под ред. Р. С. Штенгелова. М.: МГУ, 1994. = Computer-aided hydrogeological calculations: Educational aid / Under the editorship of R. S. Shtemgelov. M.: MSU, 1994 (in Russian).
5. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. М.: Мир, 1969. = R. De Wiest. Hydrogeology and land hydrology basics. M.: Mir Publishers, 1969 (in Russian).
6. Малков А. В. Определение гидродинамических параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 31–34. = A. V. Malkov. Assessment of hydrodynamic parameters of aquifers in conditions of overrunning // Izvestiya vyzov. Geologiya i razvedka. 2007. № 1. pp. 31–34 (in Russian).
7. Малков А. В., Першин И. М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами. М.: Научный мир, 2007. = A. V. Malkov, I. M. Pershin. Synthesis of distributed regulators for systems of hydrolithosphere process control. M.: Nauchny Mir, 2007 (in Russian).

*Исполняется 70 лет Владимиру Ивановичу Голику*

известному специалисту-горняку, заслуженному деятелю науки РФ, почетному работнику высшего профессионального образования РФ, заслуженному деятелю науки РСО – Алания, профессору, доктору технических наук.

Владимир Иванович имеет богатый практический опыт. После окончания в 1962 г. Северо-Кавказского горно-металлургического института он начинает трудовую деятельность на Садонском свинцово-цинковом комбинате, где за пять лет проходит все ступени роста от горного мастера до главного инженера рудника. В 1966–1990 гг. В. И. Голик работает начальником участка, главным инженером рудника, главным инженером рудоуправления, заместителем начальника ПТО Целинного, а затем начальником ПТО Приаргунского горно-химического комбината. В период интенсивного освоения урановых месторождений Северного Казахстана он активно участвует в разработке инновационных технологий добычи руд, создании и освоении буровой и доставочной техники нового поколения, организации высокоскоростной проходки горных выработок. Работая на производстве, В. И. Голик защищает кандидатскую, а позже и докторскую диссертации.

В 1991 г. В. И. Голика избирают деканом горно-геологического факультета СКГТУ, и в этой должности он работает до 2006 г., затем в течение трех лет возглавляет кафедру технологии разработки месторождений. В настоящее время Владимир Иванович – профессор этой кафедры.

Владимир Иванович Голик – автор более 700 научных трудов, в том числе 35 монографий, учебников и учебных пособий, 24 патентов и свидетельств на изобретения. Основные направления его научной деятельности: управление состоянием горных массивов при добыче руд, добыча металлов подземным, кучным и скважинным выщелачиванием, утилизация отходов добычи и переработки, горная экология, природоохранная техника и технология, экономика недродопользования.

В. И. Голик – действительный член Академии горных наук, Российской академии естественных наук, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Награжден рядом медалей, знаком «Горняцкая слава».

*Поздравляем Владимира Ивановича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, счастья и творческих успехов!*  
Северо-Кавказский государственный технический университет,  
редакция журнала «Недропользование - XXI век»