

УДК 556.33.04

**ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ КУСТОВЫХ ОТКАЧЕК ИЗ  
ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕТЕКАНИЯ**

Канд. геолог.-мин. наук М.М. Бураков

*Рассматривается новый метод интерпретации результатов опытных кустовых откачек из слоистой системы, когда в опробуемом горизонте пьезометрический уровень на протяжении возмущения еще не стабилизировался, а в смежном горизонте не наблюдается реакция на откачку.*

Известно достаточно много попыток учета перетекания подземных вод (ПВ) из смежных водоносных горизонтов слоистых толщ при оценках эксплуатационных запасов месторождений ПВ артезианских бассейнов различного порядка. Достоверность таких оценок целиком определяется двумя основными факторами – соответствием расчетной схемы природным условиям и достоверностью устанавливаемых фильтрационных и емкостных параметров основного и смежного водоносных горизонтов и параметров перетекания. Опытное полевое определение последних до сих пор остается еще сравнительно редким событием в первую очередь ввиду значительной дороговизны таких опытов.

При возмущении одного из водоносных горизонтов многослойной системы реагирует вся эта система. Реакция в смежном водоносном горизонте (таких горизонтов в общем случае может быть несколько) может проявляться двояко: 1) реакция не регистрируется<sup>1</sup>; 2) в смежном горизонте фиксируется снижение уровня в процессе опытной откачки.

Обзоры и анализ публикаций, в которых рассматриваются решения задач о фильтрации ПВ в слоистых системах, применяемые для обоснования тех или иных методов интерпретации результатов опытных откачек и выпусков, можно найти, например, в [4, 7]. Соответственно в дальнейшем изложении будем обращаться преимущественно к этим работам.

---

<sup>1</sup> Первая из расчетных схем подразделяется еще на две: а) без стабилизации пьезометрического уровня в опробуемом горизонте на протяжении откачки и б) со стабилизацией пьезометрического уровня.

В большинстве работ, в которых рассматриваются задачи фильтрации в слоистых системах, режим фильтрации в разделяющих слабо проницаемых слоях принимается жестким. Вместе с тем, было обращено внимание на существенное проявление упругого режима фильтрации в разделяющих слоях. Специальные исследования показали, что реально на практике неучет упругой емкости слабо проницаемого разделяющего слоя приводит к завышению определяемой по результатам опытно-фильтрационного опробования (ОФО) слоистой толщи пьезопроводности  $\chi^2$  и упругой емкости  $\mu^*$  опробуемого водоносного горизонта [7]. С другой стороны, при проведении опытных кустовых откачек, когда наблюдательные скважины оборудуются, как правило, только на опробуемый горизонт, не существуют критерии, которые позволили бы судить о режиме фильтрации в разделяющем слое.

Необходимо указать на еще один фактор неопределенности в интерпретации данных ОФО слоистых толщ. Как правило, расчетные формулы в имеющихся аналитических методах интерпретации построены для обработки опытных данных по каждой наблюдательной скважине индивидуально. Следствием этого обычно является значительный разброс вычисленных значений параметров перетекания по наблюдательным скважинам при ОФО слоистой толщи опытными кустами, включающими две и более наблюдательных скважин.

Очевидна, поэтому, еще и сейчас необходимость разработки методов интерпретации результатов ОФО, максимально использующих возможности графоаналитического метода обработки опытных данных при использовании информации *по всем* наблюдательным скважинам. Рассмотрим такой метод для интерпретации результатов ОФО по схеме 1, т.е. при отсутствии реакции в смежном водоносном горизонте соответственно без стабилизации пьезометрического уровня в опробуемом горизонте.

Для этой схемы решение задачи о притоке ПВ к совершенной по степени вскрытия скважине из опробуемого водоносного горизонта слоистой толщи получено Хантушем и Джейкобом [12] в виде

$$S = \frac{\bar{Q}}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right), \quad u = \frac{r^2}{4\chi t}, \quad \chi = \frac{T}{\mu^*}, \quad (1)$$

---

<sup>2</sup> В настоящей работе используется терминология, предложенная В.М. Шестаковым [9].

где  $S$  – понижение пьезометрического уровня в слое, из которого производится откачка (или выпуск), на расстоянии  $r$  от оси возмущающей скважины в момент времени  $t$  от начала возмущения;  $\bar{Q}$  – средний дебит откачки;  $W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \int_u^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4B^2 y}\right) dy$  – несобственный интеграл, табулированный в [10], – функция скважины в водоносных горизонтах с перетеканием (функция Хантуша);  $T = Km$  – водопроницаемость, а  $K$  и  $m$  – коэффициент фильтрации и мощность опробуемого водоносного горизонта;  $B$  – фактор перетекания. Фактор перетекания, в свою очередь, определяется уравнением (в случае, если смежный водоносный горизонт единственный) [4, 7]

$$B = \sqrt{\frac{m_0 T}{k_z}}.$$

Здесь  $k_z$  – вертикальная составляющая коэффициента фильтрации слабо проницаемых отложений;  $m_0$  – мощность разделяющего слабо проницаемого слоя.

Решение справедливо для продолжительных возмущений, когда расчетные значения времени отвечают условию [4, 7]

$$t > \frac{5m_0 \mu_0^*}{k_z}.$$

Кроме того, решение (1) применимо только для водоносных горизонтов, имеющих относительно небольшую мощность [11], так что должно выполняться условие

$$\frac{m}{B} \leq 0,1.$$

Поскольку, как отмечается в обзоре Т.А. Плугиной [7], указанное допущение обычно выполняется, решение (1) применимо для интерпретации результатов ОФО в большинстве практических случаев.

В работе Штернберга [13] решение задачи представлено в виде

$$S = \frac{\bar{Q}}{2\pi T} K_0(z) = \frac{\bar{Q}}{2\pi T} K_0\left(r \sqrt{\frac{1}{2\chi t} + \frac{1}{B^2}}\right). \quad (2)$$

Здесь  $K_0(z)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка. Остальные обозначения прежние.

Выражение (2) является альтернативным представлением решения (1) [8].

При  $z \leq 0,3$  уравнение (2) упрощается:

$$S = \frac{0,366 \bar{Q}}{T} \lg\left(1,12 \frac{1}{z}\right) = \frac{0,366 \bar{Q}}{T} \lg\left(1,12 \frac{B}{r} \sqrt{\frac{2\chi t}{B^2 + 2\chi t}}\right). \quad (3)$$

**Здесь все обозначения прежние.**

В формуле (3) три неизвестные, которые необходимо определить – водопроницаемость  $T$  и пьезопроводность  $\chi$  опробуемого водоносного горизонта и фактор перетекания  $B$ . Одновременный расчет этих трех параметров возможен при совмещении двух методов – метода подбора и графоаналитического с использованием измеренных значений понижения уровня во всех наблюдательных скважинах, вскрывших опробуемый водоносный горизонт и попавших в область возмущения при опытной откачке.

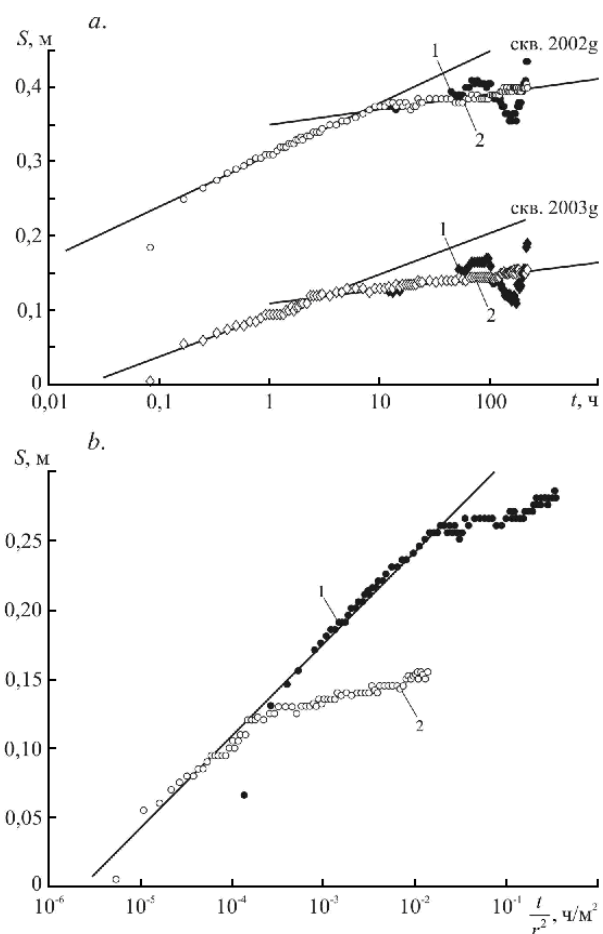
Предлагаемый метод основан на построении серии графиков в координатах  $S - \lg\left(1,12 \frac{1}{z}\right)$ , соответствующих уравнению (3). С использованием нескольких произвольно заданных значений  $B$  и  $\chi$  строится указанная серия графиков. Выражение (3) представляет собой линейное уравнение, соответственно при расчетных значениях  $B$  и  $\chi$  график  $S - \lg\left(1,12 \frac{1}{z}\right)$  представляет собой прямую линию  $S = C \lg\left(1,12 \frac{1}{z}\right)$ , проходящую через начало координат с угловым коэффициентом  $C = \frac{0,366 \bar{Q}}{T}$ , откуда водопроницаемость опробуемого водоносного горизонта  $T$  рассчитывается по формуле

$$T = \frac{0,366 \bar{Q}}{C}.$$

Проиллюстрируем предложенный метод конкретным примером.

На рис. 1 показаны индикаторные кривые временного и комбинированного прослеживания снижения уровня в наблюдательных скважинах опытного куста 2001с при ОФО напорного верхнемелового (мынкудукского,  $K_2 t_1 (mk)$ ) водоносного горизонта в пределах Сузакского артезианского бассейна [5]; данные взяты из работы [4]. На представленных на рис. 1 графиках прослеживания по наблюдательным скважинам 2002g и 2003g (как и возмущающая скважина 2001с, имеющих глубину 510...520 м) достаточно четко фиксируются перегибы, соответствующие началу интенсивного перетока ПВ из смежных частей мынкудукского верхнемеловых инкудукского и жалпакского водоносных горизонтов через слабо проницаемые прослои. Соответственно

фильтрационные и емкостные параметры мынкудукского водоносного горизонта в [4] рассчитывались только по первым асимптотическим участкам графиков прослеживания в наблюдательных скважинах, отвечающим схеме фильтрации в изолированном напорном пласте, не ограниченном в плане [1, 6], а параметры перетекания – по вторым асимптотическим участкам.



*Рис. 1. Индикаторные кривые временного прослеживания снижения пьезометрического уровня (а) в наблюдательных скважинах опытного куста 2002г и 2003г, построенные по исходным данным (1) и с учетом поправки на барометрическое давление (2), и комбинированного прослеживания снижения пьезометрического уровня (b) в наблюдательных скважинах 2002г (1) и 2003г (2) с учетом поправки на систематическую погрешность понижения уровня в скважине 2002г.*

В скважинах 2001м-450, 2001м-400 и 2001м-280, имеющих глубину соответственно 450, 400 и 280 м и вскрывших инкудукский и жалпакский водоносные горизонты, в разрезе расположенные выше мынкудукского, реакция на возмущение мынкудукского горизонта не зарегистрирована. Иными словами, экспериментально доказано отсутствие реакции в смежных водоносных горизонтах, при этом в опробуемом водоносном горизонте понижение уровня не стабилизируется на протяжении возмущения.

На рис. 2 представлен график прослеживания понижения уровня в наблюдательных скважинах куста 2001с (данные взяты из работы [4]). На график вынесены понижения уровня в наблюдательных скважинах 2002g и 2003g, равные соответственно 0,257 и 0,135 м на момент времени 20 ч после начала откачки. При этом понижения снимались со вторых асимптот, рассчитанных как тренды в соответствии с методикой из [2, 3, 4] методом наименьших квадратов. Наблюдательные скважины отстоят от возмущающей на расстояния 25,18 и 127,54 м. Угловой коэффициент прямой, проходящей через начало координат ( $\lg\left(1,12 \frac{1}{z}\right) = 0$ ,  $S = 7 \cdot 10^{-5}$  м), при значении фактора перетекания  $B = 805$  м и параметра  $2\chi t = 1,7 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup> равен  $C = 0,1732$  м. Соответствующая водопроницаемость водоносного горизонта при среднем дебите откачки  $\bar{Q} = 266,4$  м<sup>3</sup>/сут составляет  $T = 563,1$  м<sup>2</sup>/сут, пьезопроводность  $\chi = 1,02 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут, а упругая емкость  $\mu^* = 5,5 \cdot 10^{-4}$ .

Нетрудно видеть, что условие применимости логарифмической аппроксимации (3) исходной расчетной зависимости (2) выполняется для обеих наблюдательных скважин ( $z_{2002g} = 0,0328$ ;  $z_{2003g} = 0,1662$ ).

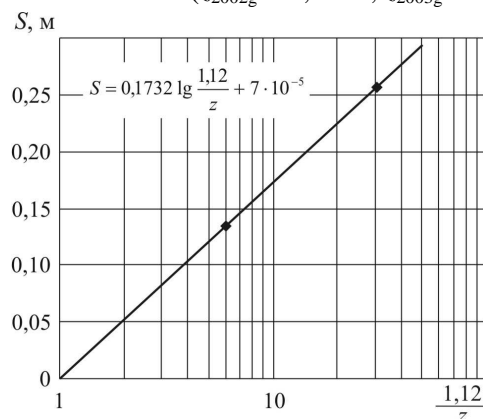


Рис. 2. График зависимости понижения уровня в наблюдательных скважинах опытного куста 2001с от безразмерного параметра  $1,12/z$ .

Полученное значение водопроницаемости  $T$  опробуемого водоносного горизонта заметно, на 25,31...51,80 %, отличается от величин, определенных по данным временного и комбинированного прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытного куста (соответственно,  $T_{2002g} = 705,6$  и  $T_{2003g} = 854,4$  м<sup>2</sup>/сут – временное прослеживание, и  $T_K = 712,8$  м<sup>2</sup>/сут – комбинированное прослеживание). Еще значительно различаются установленные различными методами величины фактора перетекания; в работе [4] приведены следующие его значения:  $B_{2002g} = 1840$  и  $B_{2003g} = 1770$  м. Как видно, эти величины больше установленной предлагаемым методом соответственно в 2,29 и 2,20 раза.

Рассчитанная в настоящей работе пьезопроводность  $\chi$  также имеет систематическое отклонение от рассчитанного в работе [4] ее значения; она примерно в 3,65-6,94 раза меньше определенной по данным временного (при значениях пьезопроводности  $\chi_{2002g} = 3,72 \cdot 10^6$  и  $\chi_{2003g} = 7,08 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут) и комбинированного (при рассчитанной пьезопроводности  $\chi_K = 3,79 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут) прослеживания. Значение упругой емкости опробуемого водоносного горизонта, определенное предлагаемым методом, наоборот, примерно в 2,89-4,58 раза больше рассчитанного в [4] ( $\mu_{2002g}^* = 1,9 \cdot 10^{-4}$  и  $\mu_{2003g}^* = 1,2 \cdot 10^{-4}$  по данным временного прослеживания, и  $\mu_K^* = 1,9 \cdot 10^{-4}$  – комбинированного).

Приведенные расхождения значений водопроницаемости, рассчитанных разными методами, имеют один знак. Соответственно эти расхождения нельзя рассматривать как случайные погрешности, обуславливающие отклонение измеренных величин относительно некоторой средней, так что эти величины с одинаковой вероятностью могут быть как меньше, так и больше средней. Обратим внимание на то, что никаких дополнительных условий и предположений на определение водопроницаемости предлагаемым методом (за исключением условия применимости уравнения (3)) не вводится, тогда как водопроницаемость, установленная по данным комбинированного и временного прослеживания понижения уровня в наблюдательных скважинах (как это рекомендуется в [1] и проделано в [4]), базируется на следующем предположении – на участках графиков прослеживания, отвечающих первому этапу возмущения (см. рис. 1), не отражается влияние перетекания. Очевидно поэтому – базой для сравнения должны выступать параметры, определенные предлагаемым автором методом.

Сопоставление определенных разными способами величин водопроницаемости показывает, что указанное предположение для индикаторных

кривых комбинированного и временного прослеживания применительно к кусту 2001с выполняется не полностью – влияние перетекания на результаты прослеживания начинается сказываться уже и на первом этапе возмущения и определяет завышение рассчитанных значений водопроводимости на 25,31...51,80 % по отношению к величине водопроводимости, определенной предлагаемым методом и принимаемой, как отмечалось выше, за базу сравнения. Такое завышение имеет достаточно простое физическое объяснение – начавшееся перетекание уменьшает абсолютные значения понижений уровня в наблюдательных скважинах, а нарастание перетекания по площади и по интенсивности определяет уменьшение также и темпа снижения уровня в скважинах. Как следствие, угловые коэффициенты расчетных асимптот на индикаторных кривых комбинированного и временного прослеживания оказываются меньшими по абсолютной величине истинных (наиболее вероятных) значений этих коэффициентов, соответственно, большими – значения водопроводимости.

В пользу такой интерпретации наблюдаемых систематических отклонений величин водопроводимости, определенной по результатам временного и комбинированного прослеживания уровня, свидетельствуют и наблюдаемые систематические отклонения пьезопроводности и упругой емкости опробуемого водоносного горизонта, установленные по результатам интерпретации временного и комбинированного прослеживания уровня, по отношению к определенным предлагаемым в настоящей работе методом.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что предлагаемый в настоящей работе метод интерпретации результатов ОФО слоистой толщи по схеме, когда реакция в смежном горизонте на протяжении опытного возмущения не зарегистрирована, а пьезометрический уровень в опробуемом водоносном горизонте не стабилизировался (схема 1а)), не содержит в себе никаких дополнительных условий и ограничений, за исключением условий применимости исходных теоретических решений. Соответственно этот метод может выступать как база для сравнения и анализа результатов интерпретации данных ОФО слоистой толщи по этой же схеме, выполненной другими методами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Недра, 1979. – 326 с.
2. Бураков М.М. Об оценке достоверности фильтрационных параметров // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23. – № 5. – С. 539-547.
3. Бураков М.М. Об оценках достоверности фильтрационных и емкостных параметров, полученных по данным прослеживания восстановления



- ния уровня подземных вод // Гидрометеорология и экология. – 2005. – № 2. – С. 153-170.
4. Бураков М.М. Случайные погрешности параметров слоистых водоносных систем, установленных по данным откачек. – Алматы: «ProService LTD», 2007. – 113 с.
  5. Гидрогеология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан / Под ред. В.И. Дмитриевского. – М.: Недра, 1970. – 460 с.
  6. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. – М.: Недра, 1978. – 326 с.
  7. Плугина Т.А. Определение геофильтрационных параметров слабопроницаемых отложений натурными методами // Обзор. ВИЭМС. – Гидрогеология и инженерная геология. – М.: ВИЭМС, 1978. – 56 с.
  8. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2006. – 796 с.
  9. Шестаков В.М. Вопросы терминологии в геогидродинамике // Водные ресурсы. – 1984. – Т. 8. – № 5. – С. 156-159.
  10. Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers // Transactions. American Geophysical Union. – 1956. – Vol. 37. – P. 702-714.
  11. Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. – 1960. – Vol. 65. – P. 3713-3725.
  12. Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions. American Geophysical Union. – 1955. – Vol. 36. – P. 95-100.
  13. Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // Journal of Hydrology. – 1969. – Vol. 33. – № 2. – P. 158-166.

ТОО Научно-производственная и проектная фирма «КазГИДЭК», г. Алматы

**СУ ӨТКІЗГІШ ҚАБАТТА АҒЫН БОЛҒАН ЖАҒДАЙДА  
ТӘЖІРИБЕЛІ БҰТАЛЫ ШАЙҚАМАЛАРДЫҢ НӘТИЖЕЛЕР  
ИНТЕРПРЕТАЦИЯСЫНЫҢ ГРАФОАНАЛИТИКАЛЫҚ ӘДІСІ**

Гео.-мин. ғылымд. канд. М.М. Бураков

*Қолданылған қабаттағы пьезометриялық деңгей ауытқу ұзындығында тұрақталмаған, ал көршілес қабатта шайқауға орай әрекеті байқалмаған кездегі қабатталған жүйеден тәжірибелі бұталы шайқамалар нәтижелері интерпретациясының жаңа әдісі қарастырылады.*