



МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРИЧИНЫ ОШИБОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС- ОТКАЧЕК ИЗ СКВАЖИН

METHODS OF CALCULATION AND REASONS OF ERRONEOUS RESULTS OF SLUG TESTS IN WELLS

ЛЕХОВ С.М.

Аспирант кафедры гидрогеологии геологического факультета
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, trakky@mail.ru

ЛЕХОВ М.В.

Ведущий научный сотрудник лаборатории охраны геологической
среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод
геологического факультета Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова, к. г.-м. н.,
г. Москва, mvlekhov@geol.msu.ru

Ключевые слова: одиночная откачка; несовершенная скважина; экспресс-откачки и наливов; численное моделирование; программа 1WELL; коэффициент фильтрации; метод Хворслева; фактор формы; предпосылка квазистационарности; кольматация; скин; неоднородность; ошибочность метода.

Аннотация: экспресс-откачки и наливов применяются при инженерных изысканиях, несмотря на их слабую методическую обоснованность и грубые систематические ошибки результатов. В статье рассматриваются вопросы теории и моделирования притока к несовершенным скважинам, методы расчета коэффициента фильтрации горных пород по данным экспресс-откачек и наливов. Исследование проведено на основе численного решения уравнения упругой фильтрации в цилиндрических координатах с использованием программы-модели 1WELL. Рассмотрено влияние осложняющих факторов (свободной поверхности грунтовых вод, кольматации, осушения фильтра, неоднородности, длительности откачки) на опытные данные и результаты расчета. Показаны причины ошибочности метода. Главными из них являются неоднозначность расчета проницаемости и кольматация фильтра скважины.

LEKHOV S.M.

Postgraduate student of the Department of Hydrogeology,
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow,
trakky@mail.ru

LEKHOV M.V.

Leading researcher of the Laboratory of Geoenvironmental
Protection and Interrelation between Surface and Ground Water,
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University,
PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow,
mvlekhov@geol.msu.ru

Key words: single pumping test; partially penetrating well; slug tests (falling and rising head tests); digital modeling; 1WELL program; hydraulic conductivity; Hvorslev's method; shape factor; precondition of quasi-steady state; mudding (colmatation, clogging); skin; heterogeneity; falsity of a method.

Abstract: slug tests are applied in engineering surveys despite their weak methodological validity and the gross systematic errors inherent in their results. This article discusses the theory and modeling of flow to partially penetrating wells as well as methods of calculating the hydraulic conductivities of rocks and soils based on data from falling and rising head tests. This study was based on a numerical solution of the elastic seepage equation in cylindrical coordinates, using the 1WELL program-model. The authors consider the influence of complicating factors (the water table, mudding, draining filter, heterogeneity, pump duration) on the experimental data and calculation results. They reveal causes of errors within this method, primary among them being an ambiguity of the hydraulic conductivity calculation and a mudding of the well screen.

Введение

Одиночные откачки из скважин, к сожалению, продолжают оставаться преобладающим видом опытно-фильтрационных работ в инженерно-геологических изысканиях. Для них используют разведочные, инженерно-геологические скважины, должным образом не подготовленные. Применение экспресс-наливов или откачек — самого несовершенного метода — вызывает еще большее сожаление. Но изыскатели они привлекают, поскольку не требуют наличия водоподъемного оборудования, электропитания, прокачки, водоотвода, устройства наблюдательных скважин.

Одиночные опыты в массе, а экспресс-опыты всегда дают существенно заниженную проницаемость [4]. Причины этого — кольматация, уплотнение пород на стенках скважины, влияние емкости скважины. Кроме того, в ходе бурения неизвестен разрез ниже забоя, не восстановлен статический уровень воды. К источникам ошибок следует добавить поспешность расчетов, которые выполняют, минуя диагностику данных, а также использование программного обеспечения без осмысленного выбора эталонного решения.

Происходит деградация изысканий в части опытно-фильтрационных исследований. Нормативные документы предписывают одиночное опробование на предварительной стадии проектирования. По существу, это влечет за собой санкционированную трату средств на опыты с заведомо ложными результатами. Достоверные параметры могут быть получены исключительно путем кустовой откачки или налива. Однако изыскатель их избегает, заменяя равными по объему бурения одиночными откачками или наливками. Но количество одиночных откачек никак не может компенсировать ущерб, причиненный отказом даже от одного кустового опыта.

Не рекомендуя экспресс-опыты и вообще одиночные тесты для массовой практики штатных изысканий, тем не менее можно согласиться с тем, что они имеют право на применение при условии подготовки скважины и внимательного отношения к данным. Это могут быть специальные испытания, научные исследования.

Для того чтобы показать слабую сторону экспресс-опытов, следует рассмотреть обоснованность исходных зависимостей и ошибки расчетов. Такой анализ может быть полезен исследователю, интересующемуся моделями

профильно-радиальной фильтрации. В исследовании, результаты которого представлены в статье, использовалась разработанная автором программа 1WELL¹ [2] как симулятор полевого эксперимента. Реальные опыты в данном случае не годятся, поскольку они испытывают влияние множества факторов, большая часть из которых неизвестна и не может быть охарактеризована по одной скважине.

В настоящей статье не рассматриваются многочисленные схемы и не анализируются автомоделные решения. Для иллюстрации закономерностей представляются достаточными результаты сравнительных расчетов с типовыми значениями параметров песчано-глинистых пород: проницаемости 1 м/сут, упругоэластичности 0,0005 м³, гравитационной водоотдачи 0,05. В породах с большей проницаемостью восстановление протекает настолько быстро, что обработка редко удается. Фильтр скважины длиной 2 м и диаметром 127 мм находится под кровлей напорного пласта или под свободной поверхностью. Мощность потока значительно превышает длину фильтра. Начальное изменение уровня воды в скважине составляет 1 м.

Аналитические решения

Экспресс-опытом принято считать откачку или налив с мгновенным изменением уровня воды в скважине s_0 . Теория применима не только к откачкам, но и к наливкам с заменой понижения напора на повышение. Отличия возникают лишь в случае осушения фильтра. Для расчетов используются данные по восстановлению уровня воды. Случаи с заметной продолжительностью откачки следует рассматривать отдельно. Заметим лишь, что при небольшой длительности откачки восстановление незначительно отличается от мгновенного понижения.

Исходные зависимости

Перед откачкой (наливом) напоры H в пласте и уровень воды в скважине H_w равны отметке статической поверхности потока H_e . Понижение (повышение) s уровня в скважине с радиусом фильтра r_w в зависимости от времени t после откачки (налива) может быть описано функцией безразмерного понижения W_I :

$$\frac{s(t)}{s_0} = W_I, \quad s_0 = s(0), \quad s = H_e - H_w. \quad (1)$$

Приток к скважине определяет расход заполнения ее ствола после откачки:

$$Q = -\omega ds/dt, \quad (2)$$

где ω — площадь внутреннего сечения труб на уровне воды, $\omega = \pi r_T^2$; r_T — внутренний радиус трубы, который в расчетах часто полагается равным радиусу фильтра ($r_T \approx r_w$).

Расход на стенке скважины определяется интегрированием по длине фильтра:

$$Q = -2\pi r \int_l k \frac{\partial s(z)}{\partial r} dz, \quad r = r_w, \quad (3)$$

где k — коэффициент фильтрации; $\partial s/\partial r$ — производная напора, в несовершенной скважине переменная по длине фильтра l .

В 1967 году было опубликовано решение Купера (Н.Н. Cooper) с соавторами [5, 7] для совершенной скважины, полученное из условия (3). Оно традиционно упоминается в каждой работе по откачкам, но не имеет практического применения, поскольку для экспресс-опытов практически всегда используют несовершенные скважины. До этого было получено решение Б.С. Шержукова [1] с граничным условием, в котором заполнение ствола происходит за счет емкости пласта. Аналогичная формулировка — в решении Г.И. Баренблатта (G.I. Varenblatt) 1952 года для налива в сухую скважину.

Уравнение фильтрации в окрестности несовершенной скважины имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

где r, z — цилиндрические координаты; k_r, k_z — коэффициенты фильтрации соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; S_s — коэффициент упругоэластичности; в аналитических моделях коэффициенты k_r, k_z, S_s — константы.

Линейный и реальный сток

Схема *линейного стока* используется в аналитических решениях уравнения (4) и исходит из фиктивного предположения о равномерном по длине фильтра расходе, но с переменным напором $H(r_w, z)$:

$$\frac{dQ}{dz} = -2\pi r k \frac{\partial s(z)}{\partial r} = \text{const}, \quad r = r_w, \quad (5)$$

где k — коэффициент фильтрации, рав-

¹ Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2014618752 РФ.

ный горизонтальной проницаемости пласта k_r или проницаемости k_s кольматированной оболочки скважины (скина) конечной толщины.

Уровень воды H_w (или понижение s) в скважине определяют как интегральное значение, пренебрегая тем, что переменный напор в столбе воды противоречит правилам гидравлики. Такое допущение и формулировка граничного условия в виде уравнения (5) справедливы в расчетах напорных на удалении, но для самой опытной скважины они так и не получили окончательного подтверждения.

Схема *реального стока* (реально — так как распределение давления в столбе воды отвечает законам гидравлики) соответствует заданию единого напора на фильтре $H(r_w, z) = \text{const}$ и интегрального граничного условия (3). Задача оказывается нелинейной из-за зависимости уровня в скважине от притока dQ/dz , переменного по длине фильтра. Для уравнения (4) с условием реального стока не существует аналитического решения.

Модель KGS

З. Хайдер (Z. Hyder) с соавторами [10] опубликовали в 1994 году полуаналитическое решение для несовершенной скважины с использованием метода интегральных преобразований. Под названием «модель KGS» (Kansas Geological Survey) это решение реализовано в программе AQTESOLV [7] и является наиболее строгим в рамках исходной схемы. Ранее (в 1984 г.) было получено аналогичное решение Догерти (D.E. Dougherty) и Бабу (D.K. Babu) для частного случая².

Решение Хайдера разрабатывалось для безнапорной фильтрации. В модели KGS оно применимо и к напорному, и к безнапорному анизотропному потоку. Изменением положения свободной поверхности модель пренебрегает. Она может учитывать кольматацию как цилиндрическую зону конечного радиуса на всю мощность пласта. На скважине действует условие *линейного стока* (5), и не учитываются приток через забой, изменение длины затопленной части фильтра при осушении, приток через участок высачивания на фильтре.

В отличие от аналитической, в численной модели могут быть учтены

слоистая неоднородность, изменение свободной поверхности, приток через забой, параметры скина (кольматации) как граничного условия третьего рода в пределах фильтра. Необходимое условие — тестирование точности и сходимость решения.

Скудность полевых данных противоречит количеству параметров модели KGS (таких как анизотропная проницаемость и мощность пласта, его упругоэластичность, анизотропная проницаемость скина, его упругоэластичность и толщина, длина фильтра, удаление его верха и низа от кровли). В полевом опыте уровень воды в скважине в момент времени $t = 0$ не может быть измерен точно, неизвестен эффективный радиус скважины³. Коэффициент фильтрации может быть рассчитан только при знании всех перечисленных выше параметров. В решении параметры связаны в комплексную переменную. При обилии параметров определяемая проницаемость неоднозначна и может относиться как к породам, так и к скину — без уверенности как в той, так и в другой характеристике.

Пользуясь аналитическими решениями, следует понимать, что определяется не коэффициент фильтрации пород водоносного горизонта. Во всех формулах для несовершенных скважин фигурирует проводимость интервала фильтра kl . Путем деления на длину фильтра l рассчитывают коэффициент фильтрации k . Он может характеризовать проницаемость фильтрового интервала весьма условно, так как поток здесь имеет неравномерный характер, особенно при наличии неоднородности. То же относится к одиночным откачкам из совершенных скважин, по данным которых определяется проводимость пласта, а не коэффициент фильтрации.

Отметим, что наличие проницаемости скина в комплексном параметре авторемодельного решения не означает возможность раздельного определения коэффициентов. Она не может быть рассчитана без знания коэффициента фильтрации, упругоэластичности пород и, главное, толщины кольматированной зоны. Это возможно в модельном эксперименте, но не в реальных условиях. Влияние же откачки распространяется за пределы скина. Для определения

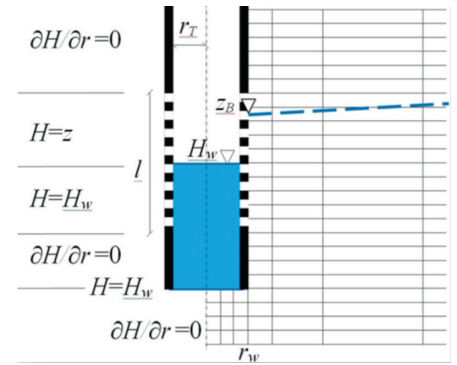


Рис. 1. Условия на стенке и забое скважины в сеточной модели 1WELL. Обозначения: z — вертикальная координата; H — напор; H_w — напор в скважине; l — длина фильтра; z_B — вертикальная координата верха высачивания; r_w — радиус фильтра; r_r — внутренний радиус колонны; наклонный пунктир — свободная поверхность грунтовых вод

множества параметров необходимы данные большей представительности, чем понижения в одной только скважине. Охарактеризовать скин и распределение проницаемости пород горизонта — задача, которую может решить только кустовая откачка.

Численная модель 1WELL

Факторы, обилие которых делает неоднозначными результаты аналитических расчетов, могут быть учтены численной моделью в профилно-радиальной постановке. Приток к несовершенной скважине описывается уравнением фильтрации (5), в котором учитываются слоистая неоднородность пласта, коэффициенты k_1, k_2, S_1 , переменные по координате z . Для моделирования откачек и наливов была разработана программа 1WELL [2] с решением уравнения (5) методом конечных элементов. В ней учитываются перетекание из другого пласта, кольматация и осушение фильтра, емкость ствола, а в безнапорном потоке — также питание или испарение и кинематика свободной поверхности.

В модели 1WELL используется схема *реального стока*, что важно для анализа данных по самой опытной скважине. Приведем формулировку граничного условия на скважине с осушаемым незатопленным фильтром и открытым забоем (рис. 1). На уровне

² В списке литературы приведены не все ссылки. Работы упоминаемых авторов могут быть найдены в справочнике Л.Н. Синдаловского [9] и в руководстве к программе AQTESOLV [7] с обзором методов.

³ *Эффективный, или расчетный, радиус* — радиус чистой (некольматированной) скважины r_c с теми же расходом и понижением, что и в реальной. Величина r_c в несколько раз или даже на порядки может быть меньше радиуса фильтра. В расчетах следует использовать r_c , а не r_w . Значение r_c определяется кустовой откачкой или, при определенных условиях, — длительной одиночной.

воды и ниже напор H_w является единым по длине фильтра и на забое. На участке высачивания напор в каждой точке $H(r_w, z)$ равен ее ординате z .

В отсутствие кольматации расход притока к фильтру определяется интегрированием по затопленной снаружи высоте фильтра, включая участок высачивания:

$$Q = 2\pi r \int_0^{r_w} k_r(z) \frac{\partial H(z)}{\partial r} dz, \quad r = r_w. \quad (6)$$

Наличие кольматации фильтра приводит к интегральному граничному условию третьего рода в виде:

$$Q = 2\pi r_w \int_0^{\delta_s} \frac{k_s}{\delta_s} [H(z) - H_w] dz, \quad (7)$$

где k_s, δ_s — условные проницаемость и толщина скина соответственно; k_s/δ_s — проводимость скина, которая может быть переменной по времени и по длине фильтра.

В модели 1WELL параметры скина учитываются условием третьего рода, в отличие от аналитических моделей и тех численных моделей, в которых он имитируется цилиндром заданного радиуса с измененной проницаемостью. Как показывает тестирование, цилиндрическая зона неоднородности конечной толщины влечет за собой очень большие погрешности.

Особый случай — откачка через забой колодца или скважины. Метод опробования донных отложений водоема через дно пьезометра, апробированный на модели 1WELL, изложен в работе [3]. Приток через забой некольматированной и кольматированной скважины определяется соответственно формулами:

$$Q = \pi k_z(z) \int_0^{r_r} \frac{\partial H(r, z)}{\partial z} dr^2;$$

$$Q = \pi \frac{k_s}{\delta_s} \int_0^{r_r} (H(r) - H_w) dr^2. \quad (8)$$

В модели 1WELL свободная поверхность — подвижная граница. Ее можно охарактеризовать как блюдце (при откачке) или как бугор растекания (при наливе), но не как воронку или конус. Кинематика этой поверхности определяется в соответствии с полной формой известного граничного условия [2, 4]. В специальных задачах на ней предусмотрены питание или испарение. В аналитических моделях свободная поверхность — неизменная горизонтальная граница; следовательно, в них неизменна и мощность потока.

В напорном пласте поток ограничен непроницаемой кровлей. На подошве могут быть заданы перетекание или напор. В нестационарной задаче внешняя граница по радиальной координате r отодвигается по мере того, как изменение напора вблизи нее превышает допустимую погрешность.

Правила построения сетки имеют решающее значение в отыскании решения. К сожалению, это не учитывается при построении моделей и приводит к ошибкам. Разбивка области фильтрации производится цилиндрическими поверхностями с логарифмическим шагом по r . Отношение $K_r = r_j/r_{j-1}$ (где r_{j-1}, r_j — радиусы цилиндрических поверхностей на последовательных $(j-1)$ -м и j -м шагах разбивки соответственно) рекомендуется задавать в диапазоне $1,5 \div 2$. В некоторых случаях, например при откачке через забой или при наливе в сухую скважину, может потребоваться более частая разбивка — с заданием $K_r = 1,1$ и меньше.

Деформация потока вблизи стока и неоднородность определяют требования и к разбивке по вертикали. Последняя осуществляется горизонтальными плоскостями, желательно с равномерным шагом. В пределах фильтра должно быть не менее 10–15 блоков. Цилиндрический блок делится на два конечных элемента. Характеристики разбивки следует подбирать, добиваясь устойчивого решения.

Решение уравнения (4) использует метод Бубнова — Галеркина с неявной схемой вычисления $\partial H/\partial t$. Для экспресс-опыта требуется постоянный шаг или его небольшое увеличение по времени, кратное 1,1–1,2. Нелинейные условия в скважине и на свободной поверхности, плавающие границы обуславливают итерационный счет. В связи с резко неравномерной решаемой матрицей может потребоваться весьма малая приемлемая погрешность — 10^{-5} м и меньше.

Численное решение 1WELL дает идеальное совпадение с решением KGS (рис. 2). Результаты сравнительных расчетов, проведенных в широком диапазоне параметров однородно-анизотропного пласта, подтверждают как справедливость аналитического решения, так и корректность алгоритма 1WELL. Для кольматированных скважин графики численного и аналитического решений различаются весьма незначительно.

Доступны примеры построения конечно-разностных моделей [8, 11, 16].

К сожалению, в публикациях не рассматриваются вопросы тестирования и

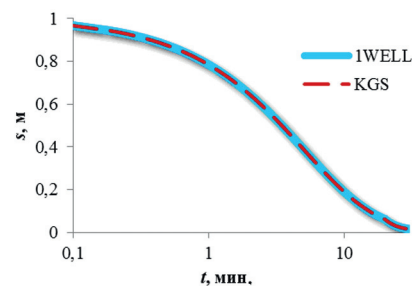


Рис. 2. Графики зависимости понижения s от времени t (в логарифмическом масштабе) для аналитического (модель KGS) и численного (модель 1WELL) решения уравнения (4). Анизотропия проницаемости $k_z/k_r = 0,1$

оценки влияния разбивки, а также использования не цилиндрической, а трехмерной декартовой сетки, которая является источником ложных результатов.

Программа 1WELL

Назначение программы 1WELL — планирование опытов, генерирование экспериментальных данных, определение параметров по полевым данным.

Программа имеет единое окно редактора параметров (рис. 3). Управляющие инструменты, текстовые поля и надписи обеспечены всплывающими подсказками. Следует выбрать откачку или налив, задать начальное изменение уровня воды в скважине.

Запуск счета по шагам осуществляется клавишей « \blacktriangleleft », расчет всего периода восстановления — клавишей « $\blacktriangleleft\blacktriangleleft$ ». Предусмотрено сравнение текущего решения с предыдущим (график в виде красной сплошной линии на рис. 3) и его сравнение с аналитическими зависимостями (график в виде красной сплошной линии на рис. 4).

В исследовательских задачах помимо реакции опытной скважины интерес представляют реакция пласта и поведение свободной поверхности. Для этого следует задать удаление и глубинную точку наблюдения. Точечные кривые на рис. 3 демонстрируют различный характер реакций наблюдательной и опытной скважин.

Опция «Пласт» определяет однородное строение горизонта — напорного, безнапорного однослойного или двухслойного (см. рис. 3). Горизонт неоднородного слоистого строения, напорный или безнапорный, выбирается с помощью опции «Слой» (см. рис. 4). Параметры слоев — глубина до подошвы, коэффициенты фильтрации по вертикали и по горизонтали, упруго-

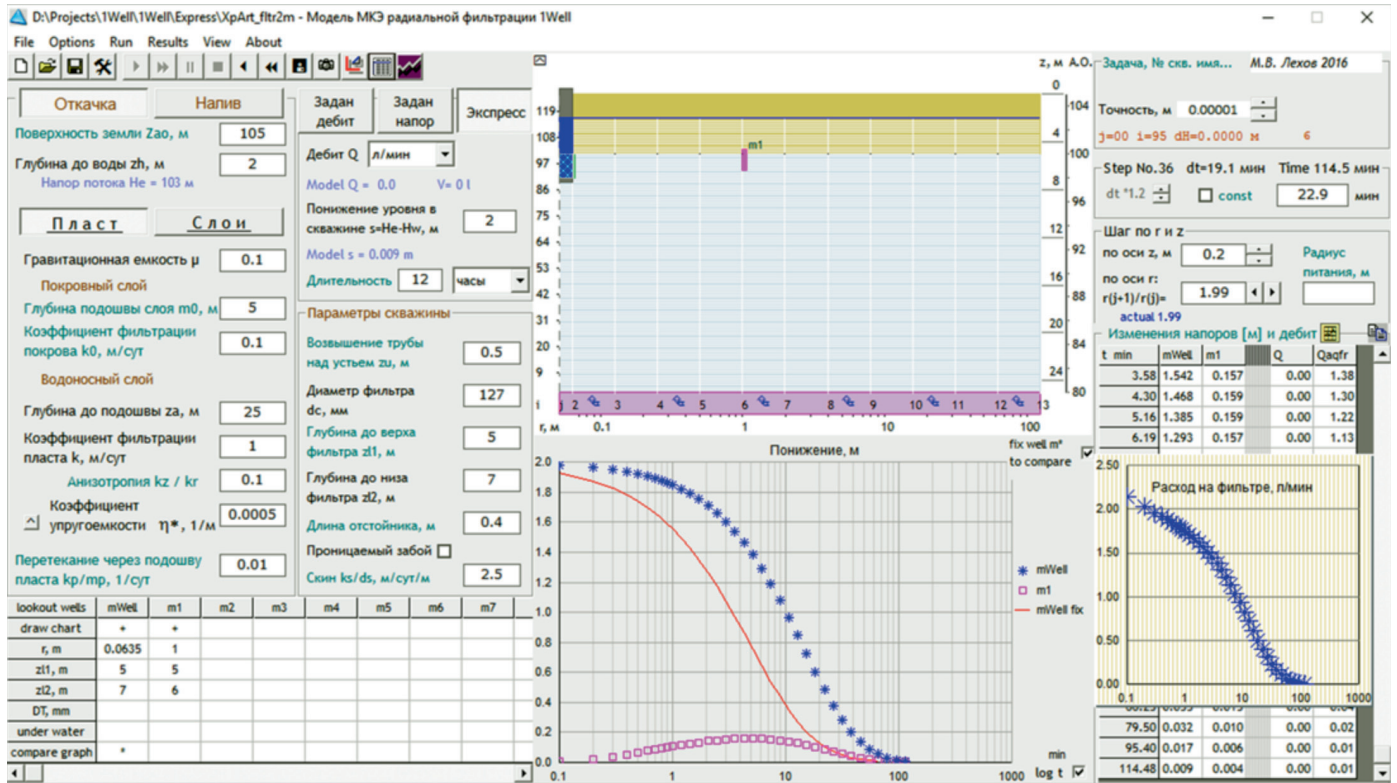


Рис. 3. Интерфейс программы 1WELL. Имитация двухслойного анизотропного пласта со свободной поверхностью с учетом кольматации (скина) скважины mWell. Графики понижения (в нижней части рисунка в центре): в опытной и наблюдательной скважине — в виде точек, в опытной скважине без кольматации — в виде сплошной кривой; время показано в логарифмическом масштабе

кость, гравитационная емкость. В текстовом поле «Перетекание через подошву пласта» может быть задан параметр перетока.

Для модели налива или откачки через забой колодца или скважины задается одинаковая глубина до верха и до низа фильтра. Специфические условия — скважина под водоемом. В текстовом поле «Глубина до воды» в этом случае вводится глубина водоема со знаком «минус». На дне могут быть заданы мощность и проницаемость слабопроницаемого слоя или граничное условие третьего рода. Метод опробования донных отложений, разработанный с использованием численного эксперимента 1WELL, описан в работах [3, 12].

На модели может быть воспроизведен не «чистый» экспресс-опыт, а откачка или налив реальной длительности для понижения или подъема уровня воды с последующим восстановлением. Выбирается опция «Задан дебит», задаются величина дебита, постоянная или переменная по шагам, и длительность. Сопоставление дебита и объема откачанной воды делает интерпретацию опыта более осмысленной. Шаги по времени для точного решения желательно задавать постоянными — менее 0,5 минуты. Пуск откачки или

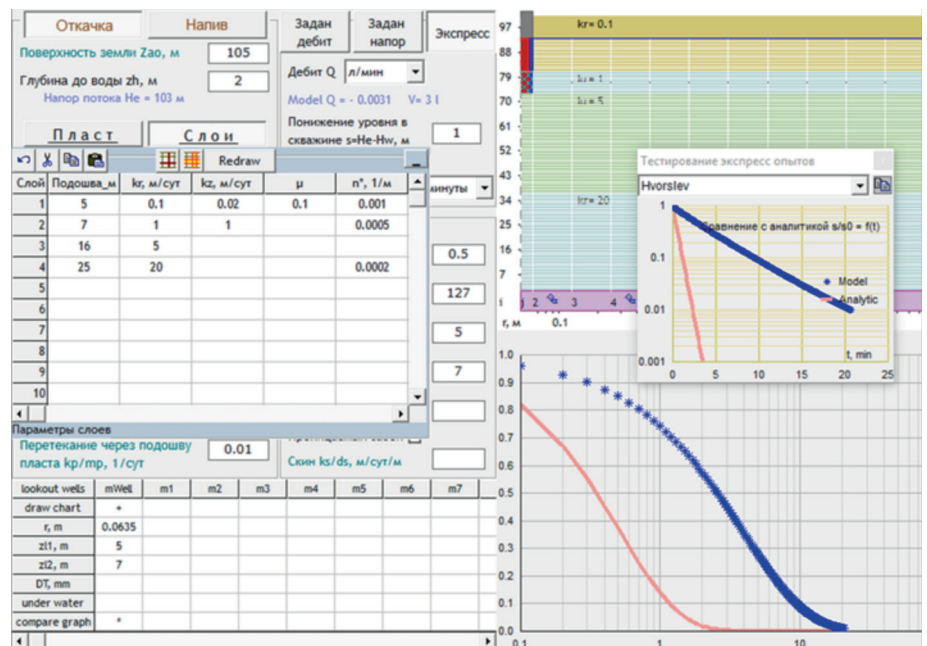


Рис. 4. Фрагмент интерфейса программы 1WELL. Таблица — задание слоев неоднородного пласта. Графики — сравнение понижений по результатам численного решения (графики в виде точек) и понижений, рассчитанных по Хворслеу (сплошные линии)

налива управляется клавишами соответственно «>» и «>>» на панели инструментов

Окно работы с опытными данными выводится на экран кнопкой панели с изображением графика. Данные вво-

дятся или импортируются в электронную таблицу (рис. 5), по ним автоматически строится график. Обработка результатов опыта состоит в вариантном решении прямой задачи и подборе параметров до совмещения расчетной и

опытных кривых. Для анализа может быть выбран не весь период, а его часть начиная с момента, который следует ввести в ячейку с надписью « $t_0=...$ ».

Данные с фиксированным временем откачки в колонке дебита Q должны содержать хотя бы одну значимую величину, а в момент начала восстановления — значение 0.

Графоаналитические методы

Графоаналитические методы оперируют простыми построениями и формулами, поэтому расчеты легко производить в полевых условиях. Вывод расчетных зависимостей базируется на предпосылке линейной квазистационарной связи притока к скважине Q и понижения уровня воды s :

$$Q = k F s, \quad (9)$$

где F — фактор формы, который зависит от радиуса и длины фильтра и принимается как постоянная величина (что, как показывает строгое решение, неверно).

Метод прямой линии в координатах «логарифм понижения — время» (метод Хворслева)

Известный метод прямой линии в координатах « $\lg s — t$ » (далее — метод « $\lg s — t$ ») базируется на двух предпосылках. Первая — мгновенное изменение уровня в скважине, вторая — мгновенное наступление линейной зависимости (9). Интегрирование уравнений (2) и (9) при условиях $t = 0, s = s_0$ приводит к уравнению:

$$\ln s = \ln s_0 - k \frac{F}{\omega} t. \quad (10)$$

Вывод формулы расчета по данным мгновенного налива в несовершенную скважину на основе зависимости (10) в 1951 году опубликовал М. Хворслева (M.J. Hvorslev) [9], «обогатив» теорию и практику гидрогеологических исследований весьма сомнительным методом.

Из уравнения (10) следует, что опытные данные должны ложиться на прямую линию в координатах « $\lg s — t$ ». В действительности этого никогда не происходит.

Прямая « $\lg s — t$ » пересекает ось ординат в точке с координатами $t = 0, s = s_0$ (рис. 6, а). Коэффициент филь-

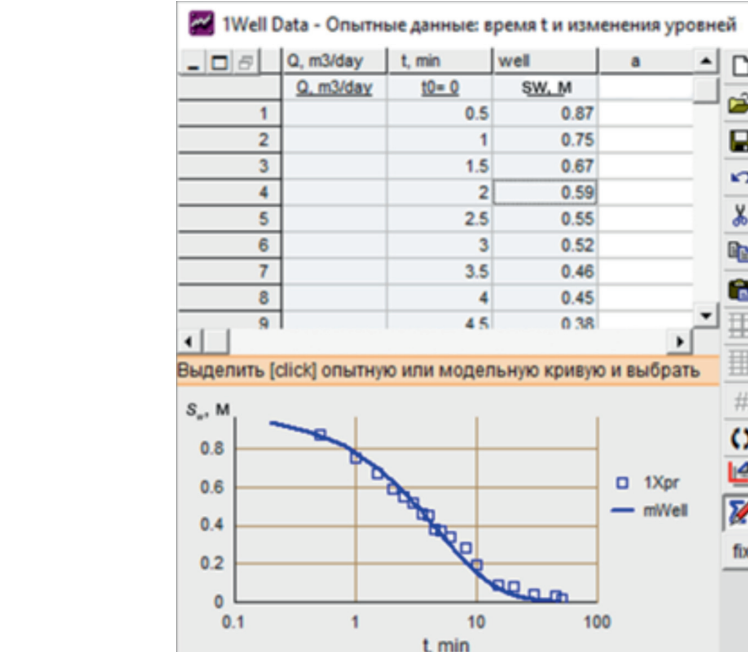


Рис. 5. Фрагмент окна работы с данными в программе 1WELL. Точки на графике — опытные данные; сплошная кривая — модельное решение; время показано в логарифмическом масштабе

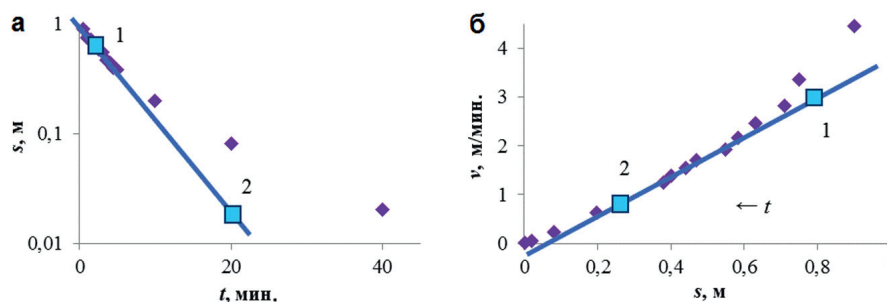


Рис. 6. Правильное положение прямой линии для расчета коэффициента фильтрации графоаналитическими методами. Точки 1 и 2 выбираются на прямой линии. Обозначения: s — понижение в скважине (на рис. а — в логарифмическом масштабе); v — скорость изменения уровня воды в скважине

рации рассчитывается по наклону прямой на опытном графике с использованием формулы:

$$k = \frac{\omega \ln(s_1/s_2)}{F(t_2 - t_1)} = 7,22 \frac{r_f^2 \lg(s_1/s_2)}{F(t_2 - t_1)}, \quad (11)$$

где индексы 1 и 2 указывают на значения понижений и времени, которые следует выбирать не на опытной кривой, а на аппроксимирующей прямой линии.

В отечественной литературе этот метод популяризирован работами Н.Н. Веригина [1] и затем В.М. Шестакова [4]. Веригин отметил, что формула (10) «впервые была получена Н.М. Победоносцевым»⁴.

Метод прямой линии в координатах «скорость изменения уровня воды — понижение»

Единственной предпосылкой метода прямой линии в координатах « $v — s$ » (далее — метода « $v — s$ »), где v — скорость изменения уровня воды в скважине, является условие (9). Метод предложен М.В. Леховым в 2015 году и апробирован в совместном с С.П. Поздняковым исследовании фильтрации при наливе в пьезометр под дном водоема [3]. Следует отметить, что линейная зависимость быстро наступает как раз в ходе обычной, а не экспресс-откачки. Это снимает требование мгновенного понижения и может помочь анализу данных одиночной откачки некоторой продолжительности на начальном этапе.

⁴ Работа Н.М. Победоносцева «Метод определения коэффициента фильтрации водоносных грунтов при помощи пробных откачек воды из отдельных скважин» (Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Ч. I, II. М.: Изд-во Гидротехгеонинститута. Вып. 8) опубликована в 1933 г. Авторство метода может принадлежать ему. Найти работу не удалось.

Коэффициент фильтрации может быть рассчитан по графику зависимости скорости подъема уровня воды в скважине $v = ds/dt$ от понижения s (рис. 6, б). Скорость v определяет расход наполнения ствола $Q = \omega v$. В соответствии с уравнением (9) график в координатах « $v — s$ » должен иметь прямолинейный участок. По двум точкам на аппроксимирующей прямой с координатами s_1, v_1 и s_2, v_2 рассчитывается коэффициент фильтрации с использованием формулы:

$$k = \frac{\omega(v_1 - v_2)}{F(s_1 - s_2)} \quad (12)$$

Скорости рассчитываются по опытом данным ($v = \Delta s / \Delta t$, где $\Delta s, \Delta t$ — разница соответственно между понижениями и временем для двух следующих друг за другом измерений).

Выбор периода линейной аппроксимации неоднозначен. Линейная аппроксимация точного решения уравнения фильтрации (4) начинается не сразу и продолжается не более 30–40 минут при использовании метода « $v — s$ » и менее 10 минут в случае применения метода « $lg s — t$ ». Прямолинейный участок лучше выражен на графике « $v — s$ ». На графике « $lg s — t$ » начальный период сжат логарифмическим масштабом и аппроксимация вообще затруднена. Погрешности измерения и плохо установленный до откачки уровень воды усиливают разброс точек и отгиб графика от прямой. В свою очередь, на графике « $v — s$ » может иметь место разброс точек из-за вычисления скорости подъема уровня воды в скважине. Поэтому необходимо перед расчетом значений v применять сглаживание s методом скользящего среднего.

Определение фактора формы

Формул для определения фактора формы F за более чем полувековой период появилось достаточное количество для того, чтобы оказаться в недоумении, решая, какую из них выбрать. Хворслев [9] приводит формулу, полученную Р. Даклером (R. Dachler) в 1936 году, используя замену цилиндрического источника на эллипсоид с осредненным по поверхности напором:

$$F = \frac{2\pi l}{\ln\left[\alpha l/d + \sqrt{1 + (\alpha l/d)^2}\right]} \quad (13)$$

где d — диаметр фильтра; коэффици-

ент $\alpha = 2$ в случае примыкания фильтра к кровле полуограниченного пласта и $\alpha = 1$ для неограниченного по мощности пласта.

При малом диаметре фильтра эта формула имеет более простой вид, который используют и в отечественной литературе [1, 4]:

$$F = \frac{2\pi l}{\ln(\alpha l/r_w)}, \quad l \gg r_w \quad (14)$$

Формула (14) может быть получена из решения М. Маскета (M. Muskat) для *реального стока* в ограниченном по мощности пласте [13]. Для случая примыкания к кровле Маскетом была установлена зависимость дебита от понижения путем подбора удельных расходов по длине фильтра:

$$s = \frac{Q}{kF}, \quad F = \frac{2\pi l}{s_i} \quad (15)$$

$$s_i = \ln\left(\frac{4m}{l}\right) + \ln\left(\frac{l}{r_w}\right) - \frac{1}{2}G - \bar{l}\ln\left(\frac{4m}{R}\right) \quad (16)$$

$$G = \ln\left(\frac{\Gamma(0,875\bar{l})\Gamma(0,125\bar{l})}{\Gamma(1 - 0,875\bar{l})\Gamma(1 - 0,125\bar{l})}\right) \quad (17)$$

где m — мощность пласта; $\bar{l} = l/m$; R — радиус питания; s_i — безразмерное понижение; Γ — гамма-функция.

Преобразуем формулу (16), выделив члены, содержащие l/m [4]. В неограниченном пласте $l/m \rightarrow 0$. Если $\Gamma(1) = 1$ и $\Gamma(x) = \Gamma(x+1)/x$, то $G = \ln(64/7) - 2\ln(l/m)$. Подставляя эти значения в выражения (16) и (17), получим формулу (14) для фактора формы F , в которой $\alpha = 1,323$, что соответствует примыканию фильтра к кровле неограниченного пласта. Для фильтра на бесконечном удалении от обеих границ получаем методом отражения стока: $\alpha = 0,661$.

Такие же значения при замене поверхности стока на эллипсоид вращения были получены В.М. Насбергом и В.Д. Бабушкиным (1954 г.). Позже В.Н. Николаевский и Н.Н. Веригин⁵ (1957 г.), исходя из интегрального напора в линейном стоке, получили следующие значения: $\alpha = 1,47$ для случая примыкания стока к кровле; $\alpha = 0,735$ при его расположении на удалении от границ [1, 4].

Значения коэффициента α немногим отличаются от величин Хворслева — Даклера. В формуле (14) α находится

под знаком логарифма, поэтому разница между результатами расчетов невелика.

Практически все публикации последних десятилетий включают ревизию коэффициента F , игнорируя очевидный (и более значимый, чем геометрические построения) дефект определения его как константы в зависимости (9). Из поздних работ следует упомянуть статьи С.А. Магиаса (S.A. Mathias) и А.П. Батлера (A.P. Butler) 2006 года [12], а также В. Силвестри (V. Silvestri) с соавторами 2012 года [15]. В них приведены формулы и сравнительные графики предыдущих решений, формулы для скважины с открытым забоем (как показала проверка, ошибочные — возможно, из-за опечаток).

Для откачек или наливов через забой скважины методы прямой линии могут быть использованы с гораздо большей обоснованностью ввиду действительно линейной связи расхода и понижения. В расчетах по формулам (11) и (12) притока к забою на удалении от границ следует задавать следующие значения: $F = (2,75 \div 2,8) d$. Они были получены такими авторами, как Л.Ф. Харза (L.F. Harza, 1935), Д.У. Тейлор (D.W. Taylor, 1948), Е. Юнгс (E. Youngs, 1968–1980), В. Силвестри (V. Silvestri, 2012) [9, 12, 15], и подтверждены численным решением уравнения фильтрации [2, 3].

Метод Бауэра — Райса

Подход Бауэра — Райса [6] основан на формальном использовании уравнения Тима, в котором фактор F определяется через радиус питания R следующей зависимостью:

$$F = \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)} \quad (18)$$

По результатам моделирования на электроинтеграторе ряда частных случаев авторы предложили эмпирический прием определения параметра $\ln(R/r_w)$. В отличие от модели совершенной скважины со строгим определением значения R , подстановка его умозрительной величины, а также длины фильтра l вместо мощности пласта m имеет лишь ассоциативный смысл. Указанный метод был заявлен для безнапорного горизонта без оценки его отличия от напорного, и он не учитывает водоотдачу пласта.

⁵ Именно в такой последовательности Вергин [1] упоминает авторов приближенной формы решения Маскета. Маскет назвал свое решение приближением, «которое вполне удовлетворяет всем практическим целям» [13], исходя из задания значений $r_w = 75$ мм, $R/r_w = 2000$. Это предположение представляется поверхностным. Решение уравнения фильтрации во многих случаях показывает его ошибочность.

Обработка данных использует тот же график метода прямой линии «lg s — t». Однако графики в статье самих авторов работы [6] имеют прямолинейную аппроксимацию только в первые пятнадцать секунд. Таким образом, грубые допущения уже на первой минуте приводят к несоответствию строгого модельного решения (точки на рис. 7) и прямой линии (10) с подстановкой значения F (18). Через 0,5–1 минуту опытные точки сильно отклоняются от расчетной прямой. Авторы работы [6] ошибочно считают отклонение от прямой выходом на второй — истинный прямолинейный участок, по которому и следует вести расчет. Начальный период ими рассматривается как искажение за счет влияния обсыпки прискважинной зоны.

Удивительно, что, несмотря на явное несоответствие строгому решению и ошибочность определяемых параметров [8, 11, 12, 16], расчет по Бауэру — Райсу широко применяется в зарубежной практике, а в последнее время его стали использовать и в отечественной — видимо, из-за иллюзии учета свободной поверхности и коррекции расчета.

Впоследствии были предложены методы с прямым эмпирическим расчетом величины R . Основные сведения в этом отношении приведены в справочнике Л.Н. Синдаловского [5] и в руководстве Дж.М. Даффилда (G.M. Duffield) [7]. В задачи настоящей статьи не входит увеличение числа обзорных публикаций, и без того большого.

Для совершенных скважин эксперименты не получили методического развития из-за ограниченного спроса. Действительно, имея средства на скважину с фильтром большой длины, разумный исследователь предпочтет обычную откачку — более достоверную.

Графики на рис. 7 показывают, что наиболее близок к решению уравнения (4) расчет F по Маскету — Насбергу — Бабушкину — Николаевскому — Веригину (далее для краткости — по Веригину). Незначительно отличаются от них результаты расчета по Даклеру — Хворслеу. Расчет по Бауэру — Райсу дает очень большое расхождение. Далее в методах прямой линии F определяется по формуле (14), но с коэффициентом α , равным 0,661 или 1,323.

Обработка данных методом эталонных кривых

Аналитическое решение дает наиболее достоверные результаты при ис-

пользовании модели KGS для напорного и безнапорного пластов. Для совершенной скважины в напорном потоке используется решение Купера и др. [5, 7]. В отечественной литературе графики аналитического решения называют эталонными кривыми.

При обработке вручную на бумаге строят опытный график в координатах « s/s_0 — lg t », на него накладывают кальку, например, с кривыми зависимости безразмерного понижения W_1 от безразмерного времени $t_D = klt/r_w^2$ для совершенной скважины. Добиваются совмещения с одной из эталонных кривых. По координатам совмещенных точек t на опытном графике и t_D на эталонном рассчитывают коэффициент фильтрации $k = t_D r_w^2 / lt$. Эталонные кривые различаются по параметру $S_s r_T / r_w$. Причины неопределенности результата заключаются в том, что упругая емкость неизвестна и начальное понижение можно оценить лишь приближенно. Поскольку влияние оказывают и другие неизвестные факторы (кольматация, неоднородность и др.), выбор кривой может дать нереальное значение S_s и ошибку в расчете проницаемости.

В общем случае с несовершенной скважиной аргументом функции W_1 служит безразмерное время $t_D = kt/S_s r_w^2$. Кривые различаются по соотношению значений длины фильтра, мощности пласта, упругоэластики, анизотропии, характеристик скина и др. Зависимость решения от многих параметров определяет и множество семейств эталонных кривых. Таким образом, ручная обработка с миллиметровкой и калькой здесь безрезультатна.

Компьютерная программа для аналитической обработки позволяет подобрать эталонную кривую. Самостоятельно рассчитать интегралы функций для построения кривой практик не может. Требуется приобретение или разработка собственной программы.

При выполнении ориентировочных оценок для несовершенной скважины можно использовать эталонные кривые, полученные для совершенной скважины в пласте мощностью, равной длине фильтра ($m = l$). При этом предполагается, что поток в интервале фильтра — плоскорадиальный. Это допущение является грубым, но не грубее пренебрежения упругой емкостью в методе прямой линии или пренебрежения кольматацией.

Эталонная кривая $W_1(t_D)$, где $t_D = klt/r_w^2$ (рис. 8), может подойти и для совершенной, и для несовершенной скважины.

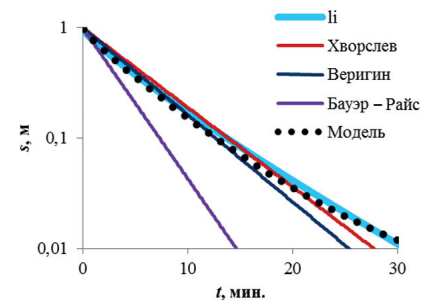


Рис. 7. Прямолинейные зависимости понижения s (в логарифмическом масштабе) от времени t по Хворслеу, Веригину, Бауэру — Райсу. Точки — строгое решение; кривая li — решение с интегральным логарифмом (19)

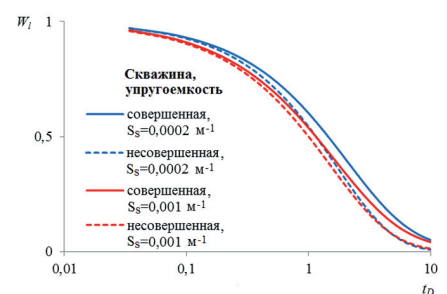


Рис. 8. Эталонные кривые безразмерного понижения W_1 в совершенной (сплошная линия) и несовершенной (штриховые линии) скважинах. Обозначения: S_s — упругоэластичность; $t_D = klt/r_w^2$ — безразмерное время (в логарифмическом масштабе); k — коэффициент фильтрации; l — длина фильтра; t — время; r_w — радиус фильтра

Сравнительные расчеты дали весьма близкие графики для совершенной скважины в пласте мощностью $m = l$ и несовершенной в пласте $m = 10l$ (см. рис. 8). В реальных диапазонах длины фильтра 1–5 м, диаметра 89–146 мм, упругоэластики 0,0002–0,001 м⁻¹ (мелкозернистого и глинистого песка соответственно) эти кривые близки между собой.

Еще более смелый шаг — использование всего-навсего одной кривой (см. таблицу). Расчеты дадут проницаемость, возможно, несколько завышенную — в 1,2–1,5 раза (при условии отсутствия кольматации). При этом погрешность будет тем меньше, чем меньше пьезопроводность $a^* = k/S_s$ (где S_s — упругоэластичность).

Упрощенное решение

Решение получено авторами путем интегрирования уравнения (2) с учетом формул (9) и (18) и выражения для радиуса питания $R = 1,5(klt/S_s)^{1/2}$:

$$\ln s = \ln s_0 - S_s \left(\frac{r_w}{r_f} \right)^2 l \ln \gamma \operatorname{li}(t_D), \quad t_D = \frac{2,25 k}{S_s r_w^2} t, \quad (19)$$

где $\operatorname{li}(\dots)$ — интегральный логарифм; γ — постоянная Эйлера, равная 0,5772...

Зависимость (19) нелинейная, но ее вид намного проще, чем модель Хайдера. Она ближе к решению дифференциального уравнения (5), чем формулы метода прямой линии. Подбор параметров в данном случае производится путем совмещения эталонной кривой с опытным графиком. В координатах «lg (s/s₀) — t» уравнение (19) в начальный период дает участок графика, близкий к прямой линии (точечная кривая на рис. 7). По сравнению с другими методами аппроксимация здесь возможна на протяжении более длительного времени.

Решение (19) наглядно иллюстрирует комплексный характер аргумента t_D. Так же как и в полном решении Хайдера, коэффициент фильтрации в этом случае связан с упругостью и радиусом.

Осложнения реакции скважины

Рассмотрим основные особенности обработки данных экспресс-опыта при отсутствии кольматации фильтра.

Период для расчета методом прямой линии

Решение уравнения фильтрации и опытные данные показывают, что предпосылка квазистационарного режима, положенная в основу методов прямой линии, не соблюдается, связь расхода с понижением является нелинейной. В связи с этим следует дать оценку выбора расчетного периода, позволяющего приближенно рассчитать проницаемость.

График восстановления «v — s» (где скорость v — показатель расхода) обретаает вид, близкий к линейному, начиная со 2–3-й минуты (рис. 9, а). Если же ошибочно выбрать данные с самого начала (см. правую часть графика рис. 9, а), то расчет методом «v — s» приведет к завышенным значениям проницаемости. Напротив, при использовании метода «lg s — t» заниженную проницаемость даст выбор более позднего участка графика (рис. 9, б).

Расчеты методом «lg s — t» более традиционны, но логарифмический масштаб сжимает начало восстановления (см. рис. 6, а, 9, б). Расчетчик проводит прямую линию, не задумываясь над ограничениями такого приема.

Значения функции W ₁ для эталонной кривой при S _s = 0,001 м ⁻¹ *								
Аргумент, функция	Значение							
t _D	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
W ₁	0,95	0,91	0,85	0,70	0,54	0,34	0,12	0,04

* W₁ — безразмерное понижение, W₁ = s/s₀; s — понижение (повышение) уровня воды в скважине; s₀ — начальное изменение уровня воды в скважине; S_s — упругость; t_D — безразмерное время, t_D = kt/r_w²; k — коэффициент фильтрации; l — длина фильтра; t — время; r_w — радиус фильтра.

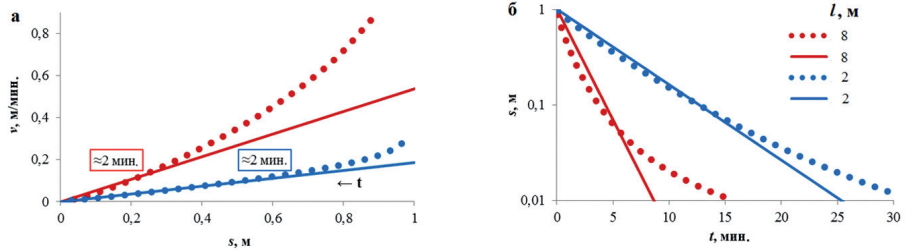


Рис. 9. Линейная аппроксимация (сплошные прямые) на графиках зависимостей: а — скорости изменения уровня в скважине v от понижения s; б — понижения s (в логарифмическом масштабе) от времени t. Фильтр длиной l, равной 2 или 8 м, примыкает к кровле пласта мощностью 20 м

На графике «v — s» прямолинейный участок расчетного периода растянут и выражен лучше (см. рис. 6, б, 9, а), расчеты по нему более уверенны.

Поэтому начальный период рекомендуется обрабатывать методом «lg s — t», а после восстановления примерно половины начального понижения следует использовать метод «v — s».

Влияние степени несовершенства скважины

Прямолинейный участок на расчетных графиках, представленных на рис. 9, лучше выражен для пласта, значительно превышающего по мощности длину фильтра (m = 10l — см. вариант l = 2 м на рис. 9). Для длины фильтра l > m/4 влияние границ дает существенную кривизну графиков «v — s» и «lg s — t» и уверенно выбрать наклон аппроксимирующей прямой трудно (см. вариант l = 8 м на рис. 9). Отсюда — большая вероятность ошибочного расчета проницаемости при маломощном пласте, особенно если его подошва залегает близко, но не вскрыта бурением.

Различия для напорного и безнапорного горизонтов

Экспресс-откачка под свободной поверхностью рассматривалась как опыт, требующий специального решения. Расчеты на аналитической модели KGS и на численной модели IWELL показали, что кривые восстановления для случаев на-

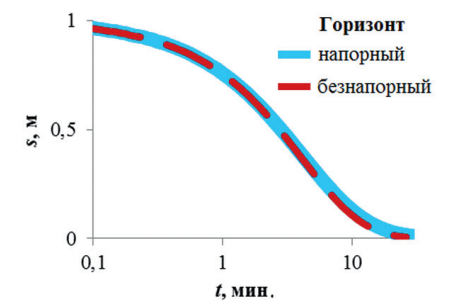


Рис. 10. Графический вид решения дифференциального уравнения фильтрации в напорном и безнапорном горизонтах для несовершенной скважины. Обозначения: s — понижение; t — время (в логарифмическом масштабе)

порного и безнапорного потоков практически идентичны. Незначительное расхождение графиков проявляется в конечный период. На рисунке 10 приведен пример для схем с напорным и безнапорным потоками неограниченной мощности с гравитационной водоотдачей 0,05 при расположении фильтра ниже границы (кровли или свободной поверхности) на расстоянии, равном его длине. Одинаковая реакция объясняется тем, что режим в начальный период определяется преимущественно плоскорадиальным квазистационарным течением и упругой емкостью пород, свойственной тому и другому случаю. Свободная поверхность еще сохраняет характер линии тока и работает как (почти) непроницаемая кровля.

По мере возмущения потока гравитационная водоотдача включается в работу и приводит к небольшому ускорению понижения и отклонению графика. На графике « $\lg s — t$ » (рис. 11, а) оно заметно больше, чем на графике « $v — s$ » (рис. 11, б). Расчеты дают близкие значения при правильном выборе положения прямой. В полной мере гравитационная емкость начинает работать намного позже (при длительных откачках).

Влияние осушения фильтра

Неосмотрительно интенсивная откачка может привести к частичному осушению фильтра скважины. На фильтре возникает граничное условие с участком высачивания и столбом воды, меняющимся во времени. В аналитических моделях учесть условие с осушением невозможно. В численной модели IWELL этот случай предусмотрен граничным условием (6).

Расчеты показывают, что различия между реакциями осушенного и неосушенного фильтра проявляются в первые минуты. Но на расчетные участки кривых (рис. 12) осушение ствола заметно влияния не оказывает. Как и в примерах, приведенных выше, видно, что в начальный период применим метод « $\lg s — t$ », а в конечный — метод « $v — s$ ».

Влияние времени реальной откачки

Повышение уровня величиной 1 м можно получить, залив в скважину 12 л (ведро) воды, что потребует 10–15 с. Понизить уровень на 1 м путем откачки можно желонкой, для этого потребуются гораздо большее время. Можно погрузить в скважину запаянную трубу, дождаться стабилизации уровня и мгновенно ее извлечь.

Считается, что для корректного экспресс-опыта необходимо если не мгновенно, то как можно быстрее понизить или поднять уровень в скважине. Однако численное решение уравнения фильтрации показывает, что, против ожидания, стремление к мгновенному понижению в скважине неоправданно. Напротив, небольшая продолжительность откачки как раз приводит к улучшению реакции в отношении использования метода прямой линии. Линейная связь между расходом и понижением (9) более стабильна и наступает быстрее. В процессе предварительной откачки работа упругой емкости уже подготавливает квазистационарный режим. Отсюда — более уверенная аппроксимация прямой линией в обоих методах (рис. 13) и надежный расчет.

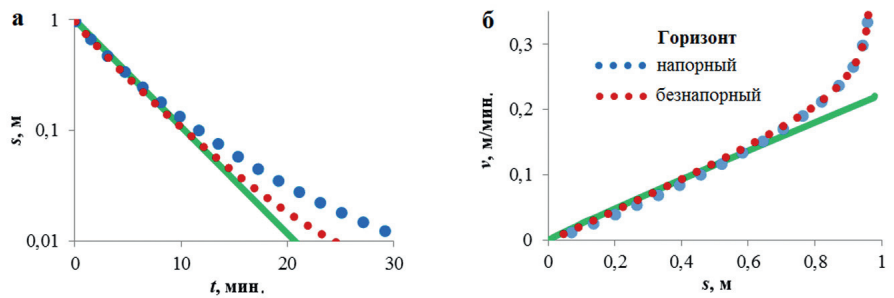


Рис. 11. Графики метода прямой линии для скважины в напорном и безнапорном горизонтах. Обозначения: s — понижение уровня (на рис. а — в логарифмическом масштабе); t — время; v — скорость изменения уровня воды в скважине. Наклон зеленой прямой линии соответствует искомому коэффициенту фильтрации

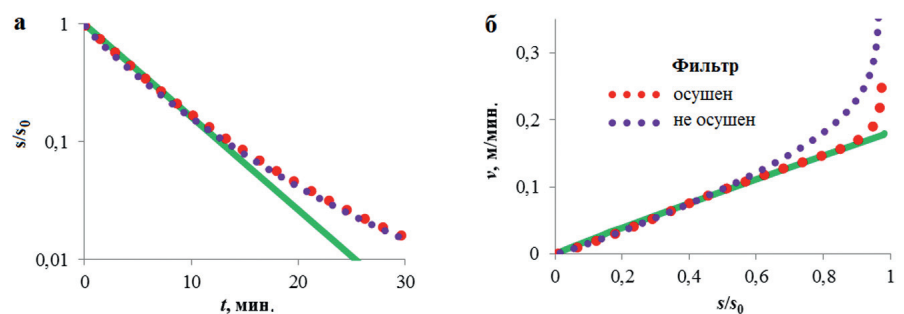


Рис. 12. Графики метода прямой линии для неосушенного и полностью осушенного фильтра (затопленного снаружи). Обозначения: s_0 — начальное изменение уровня воды в скважине; s — понижение уровня (на рис. а отношение s/s_0 показано в логарифмическом масштабе); t — время; v — скорость изменения уровня воды в скважине

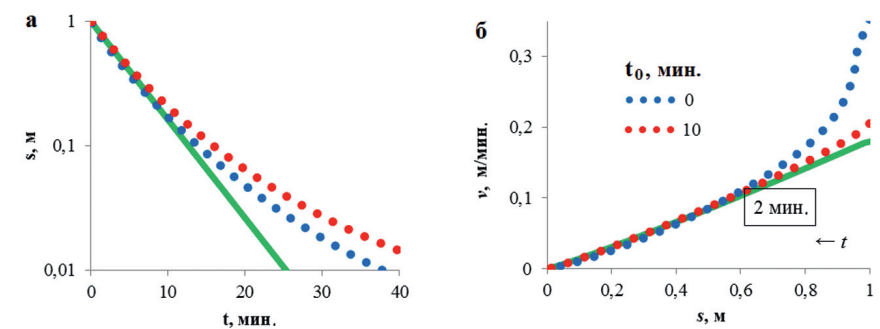


Рис. 13. Экспериментальные кривые восстановления после экспресс-откачки ($t_0 = 0$) и после откачки длительностью $t_0 = 10$ мин. Обозначения: s — понижение уровня (на рис. а — в логарифмическом масштабе); t — время; t_0 — длительность откачки; v — скорость изменения уровня воды в скважине; прямая зеленая линия — график расчетной зависимости

Влияние неоднородности

Водоносные горизонты песчаных пород сложены слоями разной проницаемости, иногда без явных различий по литологическому составу. Бурение под откачку часто ограничивается верхней зоной разреза. Вопрос: как влияет нижняя толща на опытную кривую и насколько ошибочным будет параметр в случае применения метода прямой линии и эталонного решения?

Рассмотрим пример, по-видимому типичный для изысканий. Скважина вскрывает слой невысокой проницаемости ($k = 1$ м/сут), ниже разрез не изучен, его параметры неизвестны. Это могут быть хорошо проницаемые пески с коэффициентом фильтрации 10 м/сут, но могут быть, например, и супеси с $k = 0,2$ м/сут. Эксперимент включает четыре варианта. Схемы вариантов и пояснения к ним приведены на рис. 14.

Результаты сравнительного эксперимента показывают, что граница между слоями с разными коэффициентами фильтрации не оказывает влияния (в пределах разумной точности) ни на кривую « s — lgt » в методе эталонных кривых (рис. 15), ни на графики в методах прямой линии (рис. 16).

Вывод: обработка данных экспресс-откачки для неоднородного строения пласта может проводиться так же, как для однородного, если слой с повышенной (см. рис. 14, б) или пониженной (см. рис. 14, з) проницаемостью залегает ниже фильтра на удалении, равном или превышающем половину его длины. Неоднородность в этом случае может не приниматься во внимание. Расчетный коэффициент фильтрации будет характеризовать слой, в котором расположен фильтр. Объясняется это тем, что удаленная граница не оказывает заметного влияния на структуру гидродинамической сетки, эллипсоидальную на удалении от фильтра и плоскопараллельную вблизи него. Пласт работает как неограниченный однородный.

Иначе работает схема с фильтром, расположенным несколько выше или на кровле подстилающего слоя с большей проницаемостью (см. рис. 14, б). Восходящий поток приводит к деформации поля напоров. Незная разрез, расчетчик проводит прямую на опытном графике « v — s » или « $lg s$ — t » с большим наклоном. Коэффициент фильтрации опробуемого слоя получается выше примерно в полтора раза. То же относится и к расчету с помощью эталонных кривых.

Искажение статического уровня в скважине после бурения и прокачки

Нарушенный статический уровень перед откачкой — часто встречающаяся ситуация, известная изыскателю. Она может быть следствием длительного водозабора, который производится в процессе бурения, и извлечения водонасыщенной породы. Поспешный пуск опыта производится без установления подтвержденного измерениями статического уровня грунтовых вод. А прокачка, если она выполняется, нарушает его еще больше.

Рассмотрим эксперимент, который воспроизводит следующие условия с нарушенным режимом, близкие к реальным (позволяющие оценить реакцию скважины в последующем опыте и применимость методов расчета проницаемости). Пласт безнапорный. Отбор водонасыщенной породы (или де-

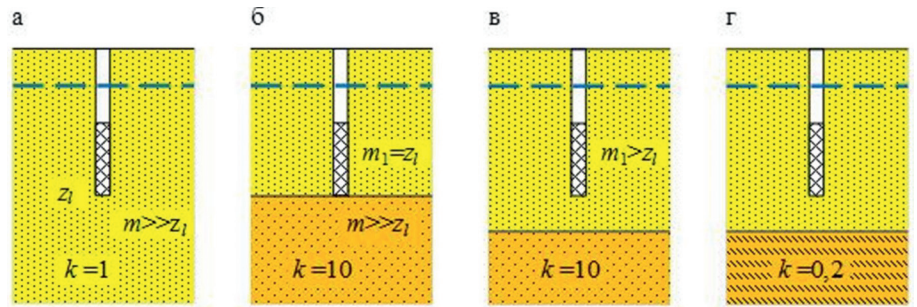


Рис. 14. Схемы откачки в безнапорном пласте мощностью m : а — разрез представляет собой однородный пласт мощностью, значительно превышающей длину фильтра (для него есть эталонное аналитическое решение); б — низ фильтра расположен на подошве верхнего слоя; в — кровля нижнего слоя проницаемых песков находится на 1 м глубже низа фильтра; г — нижний слой представлен супесями. Обозначения: m_1 — мощность верхнего слоя, z_1 — глубина до низа фильтра, k — коэффициент фильтрации, м/сут

бит прокачки) составил 0,4 м³/ч, уровень в скважине за 4 часа опустился на 2,33 м. После остановки на восстановление отведено 30 минут. За это время уровень не поднялся до статического положения, остаточное понижение составило 10,2 см. Опытная откачка не была мгновенной, ее длительность составила 10 минут. Далее шло восстановление, имитировавшее экспресс-опыт (рис. 17).

Модельный эксперимент показал, что нарушение начального статического уровня не мешает использованию метода прямой линии. В методе « v — s » (рис. 18, а) прямая линия более уверенно аппроксимирует данные, чем, например, на рис. 11, б, и в течение более длительного времени. Нарушенный режим приводит к сдвигу графика относительно аналитического решения (сплошной линии на рис. 18, а). Но расчет по формуле (12) по наклону прямолинейного участка графика соответствует проницаемости пласта.

Более затруднена обработка методом « $lg s$ — t ». Нарушенный начальный уровень противоречит выводу расчетной зависимости метода (10) и сказывается на скором отгибе графика от прямой, соответствующей искомому коэффициенту фильтрации (сплошной линии на рис. 18, б).

Из рисунка 18 видно, что в нарушенных условиях аппроксимация применима так же, как и для мгновенной откачки. Судя по графику, представленному на рис. 18, а, после кратковременной откачки линейная связь между расходом наполнения Q и понижением s (9) устанавливается практически сразу.

Отсюда следует важный и на первый взгляд неожиданный вывод: для экспресс-метода не имеет решающего значения, достигнуто ли начальное понижение мгновенно или за какое-то ко-

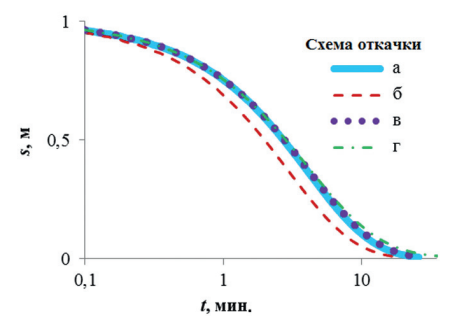


Рис. 15. Сравнение графиков решения уравнения фильтрации для схем откачки а, б, в, г, показанных на рис. 14. Обозначения: s — понижение; t — время (в логарифмическом масштабе)

нечное время откачки. Возможно, даже следует рекомендовать проводить опыты с откачкой (или наливом) определенной длительности, в течение которой преодолевается нестационарный период компрессии (декомпрессии) и наступает квазистационарная связь расхода с понижением. Отметим, что и направление потока, и процесс деформации водонасыщенных пород не меняют свой знак при переходе от откачки к восстановлению (или от налива к восстановлению).

Кольматация скважины

Наиболее уязвимой стороной откачки из одиночной скважины является неизвестная кольматация фильтра. Как уже было отмечено выше, измеряя функцию поля на одном лишь стоке, рассчитать комплекс параметров невозможно. Так же как нельзя и определить одну лишь проницаемость пород, если вблизи стока параметры среды нарушены. Исключения составляют длительные одиночные откачки из скважины в изолированном пласте: в этом случае с

помощью метода Джейкоба все же можно рассчитать проводимость пласта, но только ее. При экспресс-откачках это сделать невозможно.

В расчетах аналитическими методами проницаемость участвует как множитель в составе комплексного параметра. Расчет проницаемости методами прямой линии при наличии кольматации мог бы быть произведен с заданием вместо радиуса скважины r_w его эффективной величины r_e , но последнюю определить тоже невозможно. При отсутствии кольматации $r_e = r_w$ — и только в этом случае могут использоваться методы и анализ, приведенные в данной статье.

В методах, использующих эталонное решение, однозначный расчет возможен, если известны проницаемость, толщина и упругость скина, а также упругая емкость пласта. Но выполнить такое условие невозможно.

Если вести обработку данных откачки методом «lg s — t», наклон прямой линии на графике (рис. 19) будет тем меньше, чем меньше проницаемость скина k_s относительно коэффициента фильтрации пласта k . Примечательно, что график для некольматированной скважины (при $k_s/k = 1$), по сути, не имеет участка прямолинейной аппроксимации. И напротив, кольматация приводит как раз к хорошо выраженному, но ложному прямолинейному характеру графика. Эта особенность, если она проявляется на протяжении длительного периода, может быть использована как диагностический признак, указывающий на искаженные условия, а следовательно — на заведомо неправильный заниженный коэффициент фильтрации.

Заключение

Возможность определения коэффициента фильтрации методом экспресс-откачки (налива) следует назвать исключительно теоретической. Причинами этого являются нарушение проницаемости прискважинной зоны и несовершенство расчетной схемы. Тем не менее этот метод используется и у нас, и за рубежом благодаря тому, что дешев в производстве и несложен в обработке данных.

В полном автотомельном решении параметры участвуют не в явном виде, а в составе комплексного параметра. Коэффициент фильтрации можно рассчитать, зная упругость и анизотропию, а для кольматированной скважины — еще и толщину, проницаемость и упругость скина. Однако

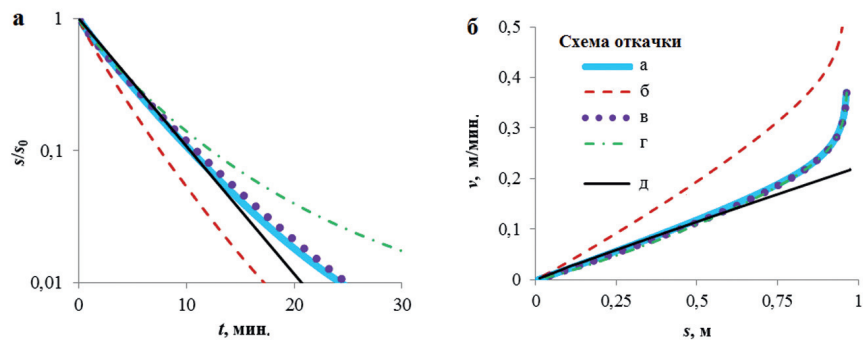


Рис. 16. Графики решения уравнения фильтрации для анализа влияния неоднородного строения пласта для схем откачки а, б, в, г, показанных на рис. 14; д — прямая, соответствующая коэффициенту фильтрации пород в интервале фильтра. Обозначения: s_0 — начальное изменение уровня воды в скважине; s — понижение уровня (на рис. а отношение s/s_0 показано в логарифмическом масштабе); t — время; v — скорость изменения уровня воды в скважине

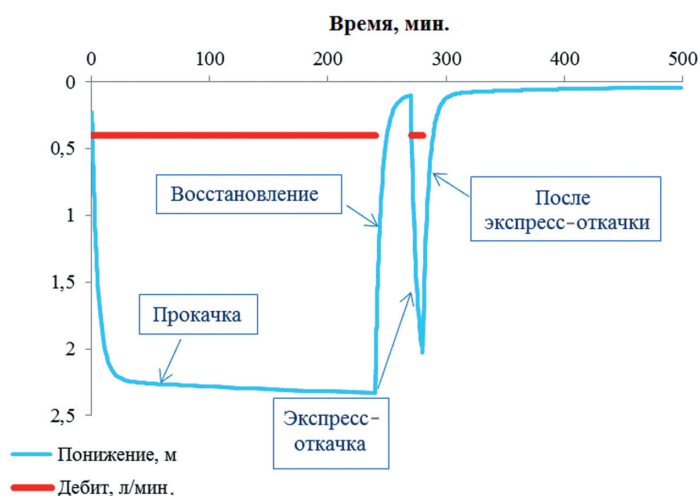


Рис. 17. Имитация прокачки, восстановления и экспресс-откачки

все эти перечисленные параметры неизвестны.

На практике чаще используется простой метод расчета по наклону прямолинейного участка на графике «lg s — t». Но при этом упускается из виду проверка предпосылки метода — линейной связи между притоком к скважине и понижением. Анализ строгого решения показывает, что эта связь нелинейна.

Главный источник искажения данных — кольматация. Она приводит к сильному отклонению опытного графика от ожидаемой теоретической кривой и не может быть учтена с помощью расчетных приемов.

Расчеты коэффициента фильтрации по данным экспресс-опробования не могут быть названы достоверными. Даже при отсутствии кольматации этот факт проверить невозможно.

Коэффициент фильтрации, полученный при экспресс-откачке, всегда занижен, иногда на порядок. То есть метод дает систематические ошибки. Действующий свод правил СП 11-105-97

«Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ» содержит указание использовать метод для определения «ориентировочной» проницаемости. При отсутствии данных более надежных опытов «ориентировочные», а на самом деле существенно заниженные параметры приведут к ложным прогнозам. Формально изыскатель не будет в ответе, так как он действовал в соответствии с нормативным документом. Помимо этого лишено смысла и предписание проводить экспресс-опыты в количестве трех и даже шести, что даст лишь статистику ошибочных значений. Нельзя согласиться и с рекомендацией применять их «в процессе или после бурения». Без подготовки скважина сохраняет дополнительное сопротивление, результатом чего будет ошибочный параметр.

К сожалению, у нас нет документа, регламентирующего подготовку и проведение экспресс-откачек и наливов. В действующем ГОСТ 23278-2014

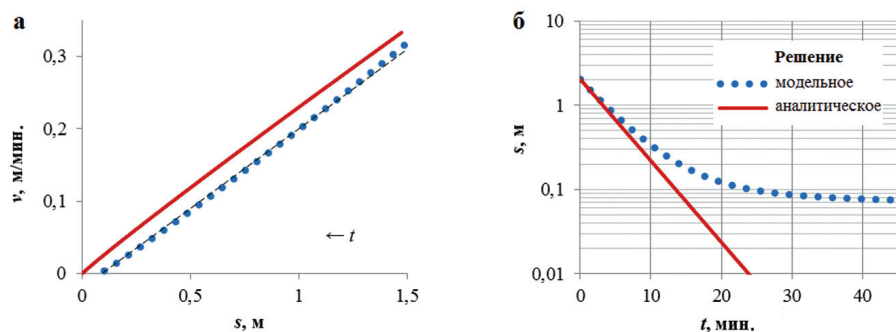


Рис. 18. Модельное и аналитическое решения на графиках « v — s » (а) и « $\lg s$ — t » (б) по результатам эксперимента с нарушенными начальными уровнями воды в пласте и в скважине. Обозначения: s — понижение (на рис. б — в логарифмическом масштабе); t — время

«Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости» экспресс-откачки и наливов не упоминаются. Следствием этого противоречия становятся фиктивные результаты изысканий.

Экспресс-откачки и наливов не следует использовать в практике изысканий. Разубедить оппонентов, возмож-

но, поможет мнение В.А. Мироненко и В.М. Шестакова: «Достоверность оценки проницаемости по данным экспресс-налива (или откачки) в значительной степени зависит от сохранности прискважинной зоны, поэтому для их применения требуется доказательство незначительного влияния со-

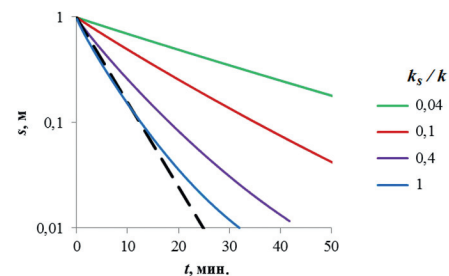


Рис. 19. Графики метода « $\lg s$ — t » по данным откачек из скважины с различными отношениями k_s/k при толщине скина 4 см. Обозначения: s — понижение (в логарифмическом масштабе); t — время; k_s, k — коэффициенты фильтрации скина и пород водоносного горизонта соответственно; штриховая прямая линия — график для скважины без кольматации

противления прискважинной зоны... Доказательств достоверности полученных результатов пока еще не получено» [4].

Список литературы

1. Веригин Н.Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М.: Госстройиздат, 1962. 181 с.
2. Лехов М.В. Профильное моделирование скважин в безнапорном водоносном горизонте. Программа 1WELL // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 52–64.
3. Лехов М.В., Поздняков С.П. Определение проницаемости донных отложений водоема по данным налива в пьезометр // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 22–28.
4. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
5. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 769 с.
6. Bouwer H., Rice R.C. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells // Water Resources Research. 1976. V. 12. № 3. P. 423–428.
7. Duffield G.M. AQTESOLV for Windows. Version 4.5. User's guide. Reston, Virginia, USA: HydroSOLVE Inc., 2007.
8. Fabbri P., Ortombina M., Piccinini L. Estimation of hydraulic conductivity using the slug test method in a shallow aquifer in the Venetian plain (NE, Italy) // AQUA mundi. 2012. Am06045. P. 125–133.
9. Hvorslev M.J. Time lag and soil permeability in ground-water observations: bulletin № 36. Vicksburg, Mississippi, USA: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, 1951. P. 1–50.
10. Hyder Z., Butler J.J. Jr., McElwee C.D., Liu W. Slug tests in partially penetrating wells // Water Resources Research. 1994. V. 30. № 11. P. 2945–2957.
11. Keller J.E. Accurate cylindrical-coordinate numerical models for the analysis of hydrologic tests: PhD dissertation. Carbondale, Illinois, USA: Southern Illinois University, 2009. 113 p.
12. Mathias S.A., Butler A.P. An improvement on Hvorslev's shape factors // Geotechnique. 2006. V. 56. № 10. P. 705–706.
13. Muskat M. The flow of homogeneous fluids through porous media. Ann Arbor, Michigan, USA: J.W. Edwards Inc., 1946. 763 p.
14. Pozdniakov S.P., Ping Wang, Lekhov M.V. A semi-analytical generalized Hvorslev formula for estimating riverbed hydraulic conductivity with an open-ended standpipe permeameter // Journal of Hydrology. 2016. V. 540. P. 736–743.
15. Silvestri V., Abou-Samra G., Bravo-Jonard C. Shape factors of cylindrical piezometers in uniform soil // Ground water. 2012. V. 50. № 2. P. 279–284.
16. Yang L., Wang X., Jiao J. Numerical modeling of slug tests with MODFLOW using equivalent well blocks // Groundwater. 2015. V. 53. № 1. P. 492–501.