

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМА ПО ДАННЫМ НАЛИВА В ПЬЕЗОМЕТР

DETERMINING THE PERMEABILITY OF BED SEDIMENTS OF A WATER BODY USING FALLING HEAD TESTING IN A PIEZOMETER

ЛЕХОВ М.В.

Ведущий научный сотрудник геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, mvlekhov@geol.msu.ru

ПОЗДНЯКОВ С.П.

Заведующий кафедрой гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, spozzd@mail.ru

LEKHOV M.V.

Leading researcher of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow, mvlekhov@geol.msu.ru

POZDNIAKOV S.P.

Head of the Hydrogeology Department of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), professor, Moscow, spozzd@mail.ru

Ключевые слова:

проницаемость; анизотропия; пьезометр; забой пьезометра; экспресс-налив; водоем; донные отложения; грунты; осесимметричная фильтрация; способы расчета; численная модель; сферический поток; программа 1WELL.

Key words:

permeability; anisotropy; piezometer; piezometer bottom; slug test; water basin; bottom sediments; soils; axisymmetric seepage; calculation methods; numerical model; spherical flow; 1WELL program.

Аннотация

Определение проницаемости донных отложений водоема рекомендуется проводить с помощью налива в пьезометр. Расчет производится по данным наблюдений за уровнем воды в пьезометре в период восстановления после экспресс-налива. В статье приведено обоснование двух полуаналитических графоаналитических способов расчета, базирующихся на предпосылке квазистационарного режима фильтрации вблизи забоя скважины. Рассматривается общий случай потока с анизотропной проницаемостью в цилиндрических координатах r , z (горизонтальной и вертикальной). Справедливость предложенных полуаналитических зависимостей подтверждена численным экспериментом с использованием программы моделирования профильной осесимметричной фильтрации 1WELL. Дано описание особенностей математического моделирования плоского источника (забоя пьезометра) вблизи границы (под дном водоема).

Введение

В гидрогеологических расчетах разгрузки подземных вод в водоем, взаимосвязи поверхностных и подземных вод необходима характеристика фильтрационного сопротивления донных отложений. Задачи профильной фильтрации требуют прямого задания проницаемости слоя. Для определения коэффициента фильтрации может быть использован пьезометр, установленный непосредственно в акватории. В него производится налив и регистрируется восстановление уровня воды. Опыт не сложен, не требует специального оборудования. При задавливании или забивании трубы в дно водоема от опыта к опыту на все большую глубину наливов дают возможность взаимной корректировки результатов и изучения проницаемости в разрезе. В статье представлено обоснование метода определения проницаемости однородных грунтов, имеющих фильтрационную анизотропию.

Обработка данных налива производилась с использованием простых графиков и формул расчета. Обоснование метода потребовало проверки используемых аналитических зависимостей численным моделированием. Опытные данные для иллюстрации метода были генерированы программой моделирования профильной фильтрации для откачек и наливов в несовершенные скважины 1WELL [1, 2].

Модель фильтрации

Модель описывает опыт в пьезометре¹ — скважине, обсаженной глухой трубой. Глубина пьезометра — это

Abstract

The authors recommend to determine the permeability of bottom sediments of a water body using data of falling head tests in a piezometer. The calculation is carried out according to the observation data of the water level in the piezometer during the recovery period after a slug test. The article substantiates two semianalytical graph-analytic calculation methods based on the assumption of quasi-stationary flow near the piezometer bottom. The vertical anisotropy of permeability is considered. Validity of the semianalytical methods is confirmed by a numerical experiment in the 1WELL program of simulation of axisymmetric flow in cylindrical coordinates. Specific features of mathematical modeling of a plane source (the piezometer hole bottom) near the border (under the bottom of a water body) is described.

¹ Термин «пьезометр» в практической гидрогеологии используется для скважин с небольшой длиной фильтра или без фильтра с открытым забоем. Он заимствован из гидравлики, в которой так называется тонкая трубка, позволяющая измерить напор в точке потока жидкости. Как показано в статье далее, напор на забое не постоянен по площади и в заполненной грунтом скважине измерение производится не на забое.

глубина вскрытия отложений, в рассматриваемом случае под дном водоема. Налив в несовершенную скважину, налив через забой создает в пласте псевдосферический поток с осевой симметрией (рис. 1). Распределение напоров $H [L]^2$ в этом случае может быть описано уравнением упругой фильтрации в цилиндрических координатах $r, z [L]$:

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \eta^* \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

где t — время [Т]; k_r, k_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной фильтрации соответственно [ЛТ⁻¹]; η^* — упругоёмкость [Л⁻¹]; r, z — соответственно горизонтальная и вертикальная координаты в цилиндрической системе координат [L].

Рассматривается поток, неограниченный по площади и полуограниченный в разрезе. Верхняя граница — дно водоема с отметкой z_a и напором H_e :

$$H(r, z_a, t) = H_e \quad (2)$$

Пьезометр вскрывает отложения на глубину l , в трубе оставляется невыбранным столб грунта такой же высоты. После того как труба задавливается в дно, уровень воды в пьезометре устанавливается на отметке уровня водоема H_e (рис. 1)

Начальное распределение напоров в пласте определяется уровнем водоема $H(r, z, t=0) = H_e$. Повышение уровня воды в пьезометре после мгновенного налива равно s_0 . На поверхности грунта внутри трубы напор $H_w = H_e + s_0 = H_0$ при $t=0$.

Формулировка задачи пренебрегает упругой емкостью грунта внутри трубы и полагает жесткой передачу по нему давления. Тогда граница потока может быть помещена на забое пьезометра с заданием условия третьего рода:

$$z = z_a - l, r \leq r_T, \quad k_z \frac{\partial H}{\partial z} = k_z \frac{H(r) - H_w}{l} \quad (3)$$

где r_T — внутренний радиус трубы, $H(r)$ — напор на забое пьезометра, неравномерный по площади.

Интегральное условие для расхода Q :

$$Q = 2\pi \frac{k_z}{l} \int_0^{r_T} [H_w - H(r, z_a - l)] r dr \quad (4)$$

Связь расхода и изменения уровня воды в пьезометре

Связь уровня воды в скважине с поступающим в пласт расходом $Q [L^3T^{-1}]$ может быть представлена следующим образом:

$$Q(t) = \frac{s(t)}{\Phi}, \quad \Phi = \Phi_{in} + \Phi_{out} \quad (5)$$

² В квадратных скобках приведены обозначения международной системы физических величин ISQ (International System of Quantities), использующей рационализированную запись формул: L — длина, M — масса, T — время.

где повышение уровня воды в скважине $s = H_w - H_e$ отсчитывается от начального напора $H_e [L]$; Φ — гидравлическое сопротивление системы [ТЛ⁻²]; Φ_{in} — гидравлическое сопротивление течения внутри трубы [ТЛ⁻²]; Φ_{out} — гидравлическое сопротивление пласта [ТЛ⁻²].

В окрестности несовершенной скважины режим водообмена с пластом довольно быстро обретает квазистационарный характер. В пьезометре, работающем только дном (предельный случай несовершенства), квазистационарный режим наступает практически сразу. При этом соотношение s/Q не зависит от времени и в реальном диапазоне декомпрессии не зависит от коэффициента упругоёмкости η^* (рис. 2), что позволяет пренебречь упругими свойствами пласта при выводе упрощенного аналитического решения.

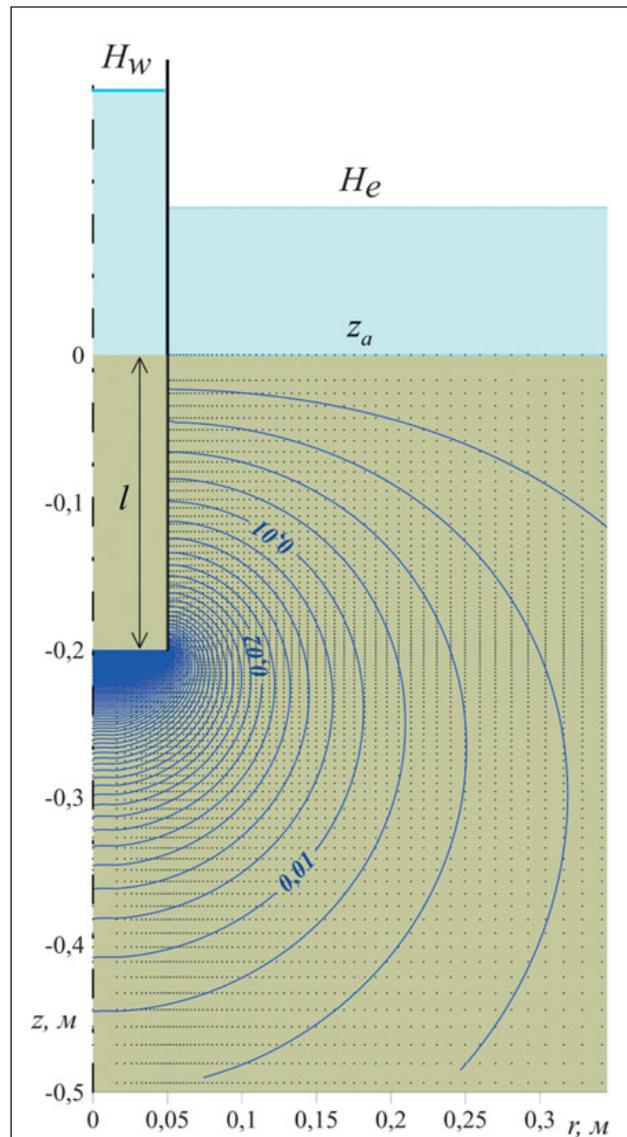


Рис. 1. Изолинии повышенных напоров (м) фильтрационного потока под водоемом при наливе в пьезометр. Условные обозначения: z_a — отметка дна водоема; H_e — уровень водоема; H_w — уровень воды в пьезометре, l — глубина пьезометра, r, z — цилиндрические координаты; голубой цвет — слой воды; серовато-зеленоватый цвет — донный грунт; точки — узлы модели, реализуемой программой 1WELL

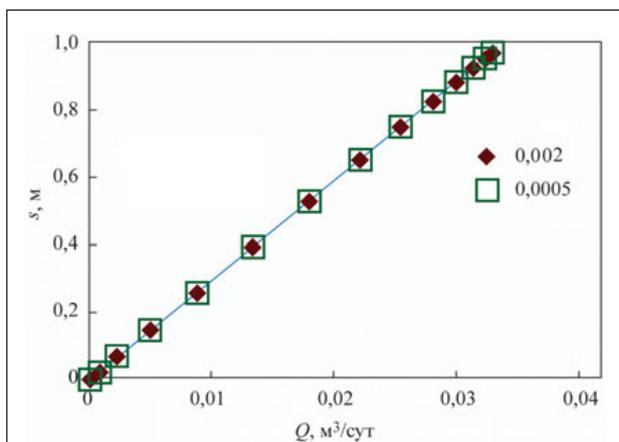


Рис. 2. Связь изменения напора в пьезометре s и расхода через забой Q после налива. Варианты численного решения уравнения (1) с упругостью 0,002 и 0,0005 м³/сут и проницаемостью 1 м/сут, характерной для песчано-глинистых грунтов

В трубе с площадью сечения ω остается столб грунта высотой l . В приближенном решении полагается, что внешний и внутренний диаметры трубы равны d . Расчет внутреннего сопротивления следует из закона Дарси:

$$\Phi_{in} = \frac{l}{k_z \omega}, \quad \omega = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (6)$$

В неограниченном пласте гидравлическое сопротивление потока Φ_{out} может быть определено исходя из

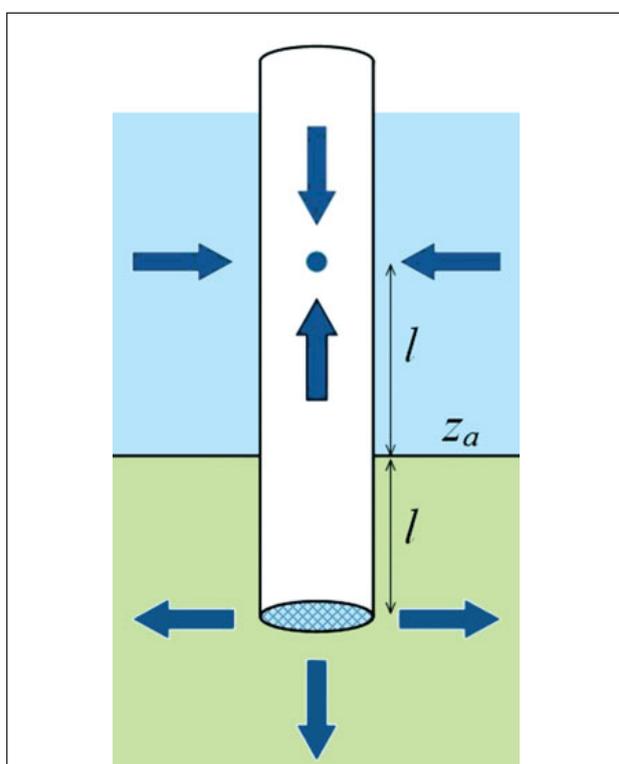


Рис. 3. Схема отражения дном водоема z_a плоского одностороннего источника (забоя пьезометра) в виде точечного стока. Условные обозначения: l — расстояние от источника до границы; голубой цвет — толщина воды водоема; зеленоватый цвет — донный грунт; стрелки — направления течения

аналитического решения стационарной задачи для не совершенной скважины:

$$\Phi_{out} = \frac{1}{akd}, \quad (7)$$

где a — коэффициент, зависящий от положения пьезометра; k — величина коэффициента фильтрации, с помощью которой для анизотропного пласта используются формулы для изотропного:

$$k = \sqrt{k_r k_z} = \lambda k_z, \quad \lambda^2 = \frac{k_r}{k_z}, \quad (8)$$

где λ — коэффициент фильтрационной анизотропии.

В случае расположения плоского забоя на непроницаемой кровле $a=2$ [3]. Для скважины без фильтра с плоским забоем в неограниченном по мощности пласте аналитическое решение (5) имеет аппроксимацию (7), в которой $a=2,8$. Близкие значения a приводятся и в других, более ранних, работах [3, 5].

Поток под водоемом — полуограниченный. В отличие от зависимости (7) сопротивление Φ_{out} определяется с учетом отражения дном водоема источника (забоя пьезометра) в виде фиктивного стока. При удалении от границы, превышающем диаметр трубы ($l \gg d$), плоский сток может рассматриваться как точечный.

Расход стока равен расходу источника Q с обратным знаком. Сложение течений дает выражение для гидравлического сопротивления забоя пьезометра на глубине l под дном водоема:

$$\Phi_{out} = \frac{1}{akd} - \frac{1}{4\pi k(2l)}. \quad (9)$$

Из формул (5–9) следует выражение для общего сопротивления:

$$\Phi = \frac{1}{k_z} \left[\frac{l}{\omega} + \frac{1}{a\lambda d} - \frac{1}{8\pi\lambda l} \right]. \quad (10)$$

Расход осушения пьезометра (5) определяется темпом снижения уровня:

$$Q = -\omega \frac{ds}{dt} = \frac{s}{\Phi}. \quad (11)$$

Выполним следующие преобразования с учетом формул (6–10):

$$\omega\Phi = \omega \frac{1}{k_z} \left[\frac{l}{\omega} + \frac{1}{a\lambda d} - \frac{1}{8\pi\lambda l} \right] = \frac{1}{B}; \quad (12)$$

$$B = \frac{k_z}{lb}, \quad b = 1 + \frac{\pi}{4a\lambda} \left(\frac{d}{l} \right) - \frac{1}{32\lambda} \left(\frac{d}{l} \right)^2. \quad (13)$$

Безразмерный коэффициент b представляет собой сумму, в которой каждое слагаемое позволяет оценить вклад соответствующего сопротивления. Из графиков на рис. 4 следует, что в реальном диапазоне геометрических характеристик $d/l \ll 1$ значение b при-

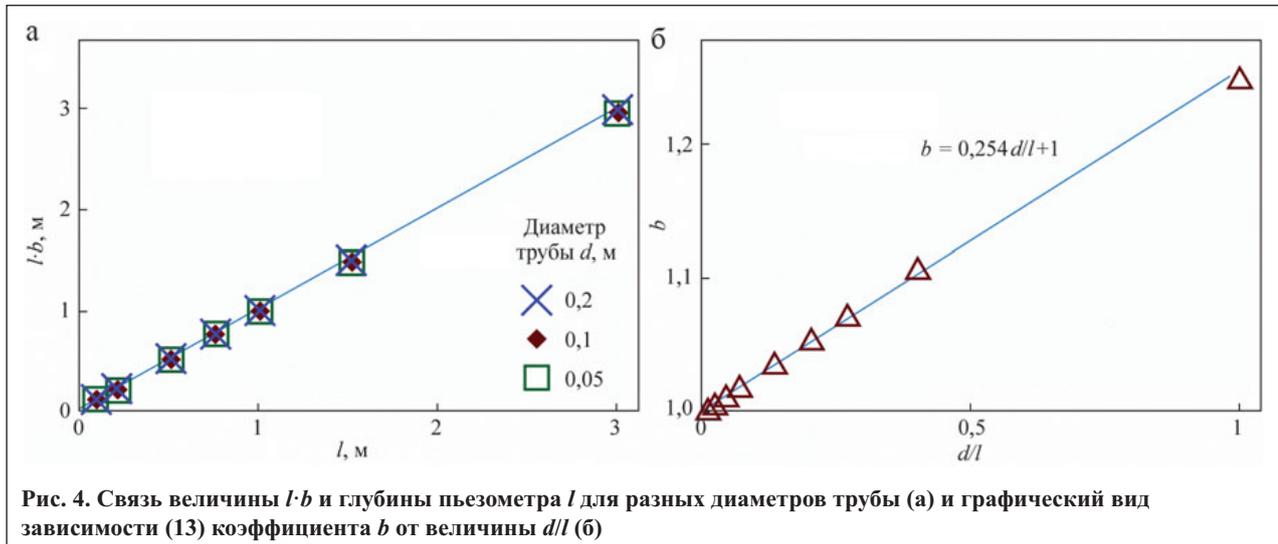


Рис. 4. Связь величины $l \cdot b$ и глубины пьезометра l для разных диаметров трубы (а) и графический вид зависимости (13) коэффициента b от величины d/l (б)

мерно равно единице и с высокой точностью $l \cdot b = l$ (рис. 4, а), откуда $B \approx k_z/l$.

Зависимость (13) аппроксимируется выражением $b = (d/l) \cdot a/11 = 0,254 \cdot d/l$ (рис. 4, б). Такой же вид зависимости можно получить путем преобразований формулы Хворслева [3] для пьезометра с грунтом внутри в неограниченном пласте.

Два способа расчета проницаемости

Способ 1

В результате интегрирования уравнения (11) и подстановки выражения (12) получим уравнение:

$$\ln s = \ln s_b - Bt, \tag{14}$$

где $s_b = s$ при $t=0$; t — время от начала восстановления.

В координатах « $\ln s$ — t » уравнение (14) соответствует условию $s/Q = \Phi = \text{const}$. По координатам двух точек t_1, s_1 и t_2, s_2 на прямой линии, аппроксимирующей опытные данные (рис. 5, а), рассчитывается $B = \ln(s_1/s_2)/(t_2 - t_1)$. Коэффициент фильтрации определяется по формуле:

$$k_z = lbB = lb \frac{\ln(s_1/s_2)}{t_2 - t_1}. \tag{15}$$

Значение s_b соответствует точке пересечения прямой с осью $\ln s$ на графике « $\ln s$ — t ». При соблюдении сделанных ранее предпосылок $s_b = s_0$. Следует заметить, что в реальных условиях сразу после налива может не соблюдаться условие (5) в силу переменного сопротивления забоя. Кроме того, залить воду в пьезометр и измерить уровень мгновенно — задача невыполнимая. Поэтому не рекомендуется следовать сложившейся практике перехода к величинам s_0/s или s/s_0 . Это ведет к ошибкам. И в этом нет необходимости, так как в расчете коэффициента фильтрации по формуле (15) величина s_0 не участвует.

Способ 2

График на рис. 2 указывает на линейную связь напора в пьезометре с расходом, подтверждая справедливость уравнения (5) и предпосылки квазистационарного течения. Коэффициент корреляции зависимости равен 1, и аппроксимирующая прямая приходит точно в ноль. Из уравнения (5) следует простой прием оценки коэффициента вертикальной фильтрации k_z с использованием графика « v — s », где скорость снижения уровня в пьезометре $v = dH_w/dt$ (рис. 5, б).

Из формулы (11) следует прямолинейная зависимость, которая с учетом формулы (12) принимает вид:

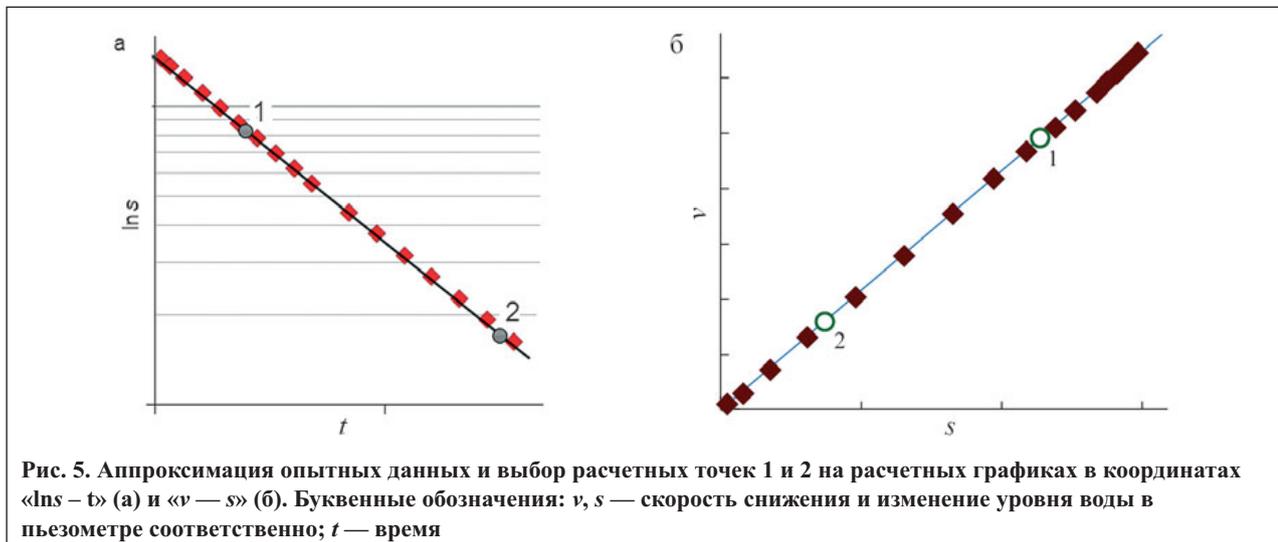


Рис. 5. Аппроксимация опытных данных и выбор расчетных точек 1 и 2 на расчетных графиках в координатах « $\ln s$ — t » (а) и « v — s » (б). Буквенные обозначения: v, s — скорость снижения и изменение уровня воды в пьезометре соответственно; t — время

$$-v = Bs. \quad (16)$$

Используя измерения уровней воды H_i в моменты времени t_i , следует рассчитать скорости снижения уровня в пьезометре v_i по формуле:

$$v_i = \frac{H_i - H_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad i = 2, 3, 4, \dots \quad (17)$$

По значениям H_i и v_i необходимо построить график (рис. 5, б). По двум точкам с координатами v_1, H_1 и v_2, H_2 , выбранным на аппроксимирующей прямой, рассчитывается коэффициент $B = (v_1 - v_2) / (H_1 - H_2)$ и коэффициент вертикальной фильтрации:

$$k_z = lbB = lb \frac{v_1 - v_2}{H_2 - H_1}. \quad (18)$$

Теоретически можно обойтись двумя-тремя определениями величин v_i , но, учитывая неизбежные ошибки измерений, рекомендуется аппроксимация скоростей v_i , рассчитанных для всего периода восстановления.

Проверка расчета на численной модели

Для анализа были генерированы данные опытного налива (рис. 2). Расчеты производились с помощью программы численного моделирования профильно-радиальной фильтрации при откачке и наливе в скважину IWELL [1].

Схема и узлы сетки конечных элементов показаны на рис. 1. Пьезометр диаметром $d=0,1$ м задален в дно водоема на глубину $l=0,2$ м. Уровень воды в водоеме $H_e=1$ м. Глубина до подошвы пласта равна 30 м. Внешняя граница области решения задачи отнесена на расстояние с радиальной координатой $R=50$ м. В ходе нестационарного решения она отодвигается для предотвращения влияния на ход опыта. Налив произведен мгновенно, подъем уровня воды

($H_0 - H_e$) составил 1 м. В варианте 1 — грунты изотропные, $k_r=k_z=1$ м/сут; в варианте 2 — анизотропные, $k_r=1$ м/сут, $k_z=0,2$ м/сут. Коэффициент упругоемости $\eta^*=0,0005$ м⁻¹.

Расчеты показывают высокую степень сходимости численного решения и упрощенной аналитической зависимости, особенно для донных отложений с низкой вертикальной проницаемостью. Из графиков сопоставления данных (рис. 6) следует, что для расчета проницаемости следует выбирать начальный период наблюдений за восстановлением.

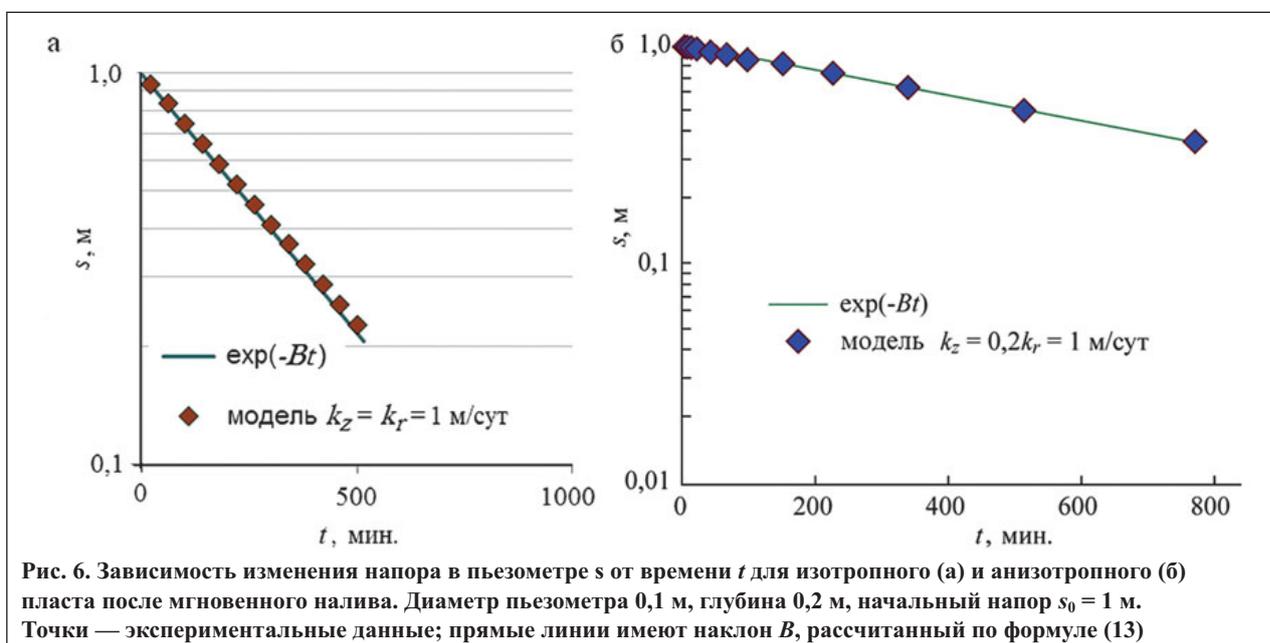
В анизотропных грунтах определяющее значение имеет коэффициент вертикальной фильтрации k_z . Объяснением служит то, что сопротивление потока внутри пьезометра несоизмеримо больше внешнего. Наклон прямой на графике в соответствии с формулой (13) пропорционален коэффициенту k_z , в то время как коэффициент горизонтальной фильтрации k_r практически не влияет на его величину.

Заключение

Проницаемость отложений в основании водоема может быть определена с помощью налива в пьезометр, который заглублен под уровень дна и из которого не выбран грунт. Расчет производится с помощью графиков зависимостей « $\ln s - t$ » или « $v - s$ », где $s=H_w - H_e$ — превышение уровня воды в пьезометре H_w над статическим уровнем H_e , t — время от начала восстановления, $v=\Delta H/\Delta t$ — скорость снижения уровня воды в пьезометре, определяемая по падению уровня воды ΔH за время Δt между двумя измерениями.

В анизотропных грунтах определяемая величина — коэффициент вертикальной фильтрации k_z , от которого и зависит сопротивление, создаваемое донными отложениями при разгрузке подземных вод в водоем или их питания за счет инфильтрации из водоема.

Численное моделирование подтвердило справедливость линейной связи расхода из пьезометра с напором в нем при восстановлении после налива — исходной предпосылки изложенного метода.



Приложение Особенности модели фильтрации через забой скважины

Декларация метода как нового способа определения параметров, по мнению авторов, нуждается в верификации чистым экспериментом. Таковым является численное моделирование, а не полевой опыт, осложненный техническими или неизученными природными факторами. Поэтому требуется пояснение обоснованности экспериментального решения.

Программа IWELL, с помощью которой были генерированы экспериментальные данные, разработана как симулятор работы скважин при планировании и обработке данных опытных откачек и наливов [1]. Программа обеспечивает решение уравнения фильтрации методом конечных элементов. Интерфейс включает визуализацию графиков, редактор данных и операции с файлами и результатами, работу с опытными данными для определения гидрогеологических параметров.

Особенностью рассматриваемой задачи является то, что неизвестны и расход оттока после налива, и напор в пьезометре. Неравномерный расход по площади забоя пьезометра соответствует условиям (3) и (4), что определяет нелинейный характер задачи и необходимость итерационного счета. Удовлетворительная точность решения требует задания допустимой погрешности не более 0,1 мм.

Сеточная разбивка области радиальной профильной фильтрации производится цилиндрическими поверхностями и горизонтальными плоскостями. В разрезе сетка образуется ортогональными вертикалями с номерами j и горизонталями с номерами i (рис. 7). Номер узла на ребре забоя — (i_s, j_s) .

Источником ошибок моделирования радиальной фильтрации является пренебрежение требованиями к построению сетки. Уравнение (1) указывает на то, что в радиальном потоке требуется постоянный шаг логарифмов координат r соседних вертикалей $\Delta \ln r$, постоянное отношение $l_r = r_j / r_{j-1}$. Шаг устанавливается по соотношению координат r вертикали j_s на стенке скважины и соседней вертикали $j_s + 1$. С внешней стороны скважины вычисляются координаты $r_j = l_r^{j-j_s} r_{j_s}$ вертикалей $j > j_s$. Для скважин с фильтром приемлемую точность дает шаг $l_r = 1,5 \div 2$.

В случае потока в окрестности плоского источника с коротким фильтром или без фильтра (рис. 7) требуется разбивка площади забоя. Здесь начиная от стенки скважины вычисляются координаты $r_j = r_{j+1} / l_s$ вертикалей $1 < j < j_s$.

Следует принимать во внимание, что логарифмическая разбивка по оси r приводит к быстрому уменьшению вертикальных сопротивлений по мере удаления от скважины, что обуславливает неравномерность вычислительных матриц и ошибки численных операций.

Разбивка области решения по вертикали в профильно-радиальных задачах обеспечивает хорошую точность при условии равномерного шага Δz . Но в случае с работающим забоем без фильтра тестовые исследования показали необходимость логарифмической разбивки вверх и вниз начиная от уровня за-

боя $z = z_a - l$. Помимо этого на решение оказывает влияние увеличение и неравномерность скоростей фильтрации на забое. Поэтому стороны элементов, примыкающих с трех сторон к его ребру, заданы равными по вертикали и горизонтали ($\Delta z = \Delta r$, см. рис. 7), что обеспечило изометрию фильтрационных сопротивлений.

Удовлетворительный результат в схеме с проникаемым забоем дают значения $l_r \leq 1,05$. Но такая величина существенно увеличивает матрицы коэффициентов уравнений и время счета.

Расход потока (4) рассчитывается суммированием расходов Q_j через основания элементов на забое:

$$Q_j = 2\pi \frac{k_z}{l} [H_w - H_z] (r_{j+1}^2 - r_j^2), \quad (20)$$

где j — номер узла и элемента справа от него по оси r ; H_z — средний напор между узлами (i_s, j) и $(i_s, j+1)$ на забое.

При использовании модели в качестве эталона непременным условием является тестирование, особенно в отношении влияния дискретности сетки. Ввиду отсутствия строгого аналитического решения для рассматриваемого случая исследовалась схема с полым пьезометром. Для нее имеется стационарное решение $Q = akdS_0$ для двух случаев расположения плоского забоя — на непроницаемой кровле пласта ($a=2$) и в неограниченном пласте ($a=2,8$) [5].

В узлах ($i=i_s, j < j_s$) на забое задается граничное условие первого рода $H(r) = H_0$. Расход определяется интегральным условием (4) с заменой $\Delta H/l$ на производную $I_z = \partial H / \partial z$. В численном алгоритме $I_z \approx (H_w - H_z) / \Delta z$, где $H_z = (H_{i,j} + H_{i,j+1}) / 2$, $j < j_s$, $i = i_s - 1$, Δz — шаг сетки.

Для учета двухмерного поля скоростей на ребре забоя в численном алгоритме предусмотрен расчет расхода Q_{edge} :

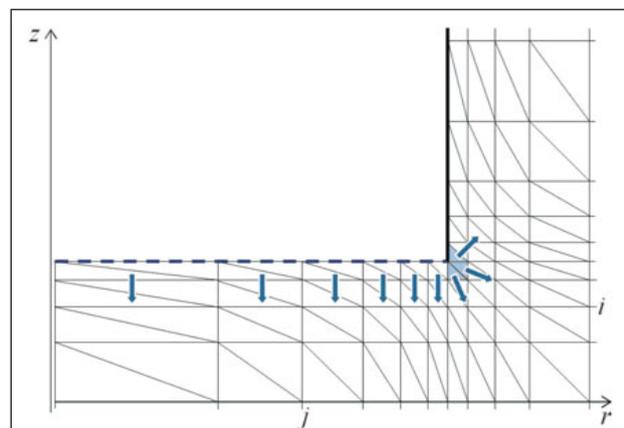


Рис. 7. Логарифмическая разбивка области на конечные элементы. Условные обозначения: стрелки — векторы фильтрации в элементах; затененные участки — элементы, по которым рассчитывается расход Q_{edge} ; r, z — горизонтальная и вертикальная цилиндрические координаты соответственно; i, j — номера горизонталей и вертикалей соответственно; вертикальная жирная линия — труба скважины; пунктирная линия — граница на забое с напором в скважине H_w (1 или 3 рода)

$$Q_{edge} \approx 2\pi r_c \sum \left[k(H_w - H_{cp}) \frac{\alpha}{2} \right], \quad (21)$$

где H_{cp} — среднее значение напора в элементе, вершина которого расположена на ребре забоя, α — угол треугольного элемента в этой вершине; суммирование производится для трех примыкающих к ребру элементов [1].

Расчеты показали, что отмеченные требования к конечноэлементной сетке в сферическом потоке являются строгими и оправданными. Приемлемую точность дает логарифмическая разбивка в четырех направлениях от ребра забоя с одинаковым шагом $l_r=1,03$ (несколько хуже — с шагом 1,10) и длиной сторон элементов до 5 мм.

На точность решения задачи в стационарной постановке может влиять недостаточная величина «радиуса питания» — расстояния от скважины до внешней границы, а также недостаточная глубина задания нижней границы (водоупора). В нестационарном решении требования не столь строгие. Питающая граница в начале численного эксперимента может быть отнесена от скважины на расстояние, соизмеримое с мощностью пласта. По мере распространения возмущения потока граница автоматически отодвигается. Мощность пласта, учитывая незначительную глубину

пьезометра, всегда оказывается несоизмеримо большей, что позволяет считать схему полуограниченного пласта справедливой. +

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-55-53010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехов М.В. Профильное моделирование скважин в безнапорном водоносном горизонте. Программа 1WELL // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 52–65.
2. Лехов М.В. Профильные модели безнапорной фильтрации в задачах инженерной гидрогеологии (программы PERFIL, 1WELL, SINK) / Материалы Международной научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование и практика». М.: МАКС Пресс, 2013.
3. Hvorslev M.J. Time lag and soil permeability in groundwater observations // U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Bulletin. Vicksburg, Mississippi, USA, 1951. № 36. P. 1–50.
4. Min L., Yu J., Liu C., Zhu J., Wang P. The spatial variability of streambed vertical hydraulic conductivity in an intermittent river, northwestern China // Environmental earth sciences. 2013. V. 69. № 3. P. 873–883.
5. Silvestri V., Abou-Samra Gh., Bravo-Jonard Ch. Shape factors of cylindrical piezometers in uniform soil // Ground water. 2012. V. 50. № 2. P. 279–284.

Журнал «Инженерные изыскания» — лучшая площадка для Вашей рекламы!

www.geomark.ru

Реклама

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Реклама

**Стоимость годовой подписки на журналы
(через редакцию) с учетом почтовых расходов и НДС:**

- «Инженерные изыскания» (14 номеров) – 9660 рублей.
- «Инженерная геология» (6 номеров) – 3600 рублей.
- «Геориск» (4 номера) – 2400 рублей.
- «Геотехника» (6 номеров) – 3900 рублей.

Полный комплект журналов: 19560 рублей.

ОТДЕЛ ПОДПИСКИ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

+7 (495) 210-89-92

PR@GEOMARK.RU
WWW.GEOMARK.RU

Подписку на журналы можно оформить через подписные агентства:

Оформление подписки на журналы
возможно через агентства
«Роспечать» и «Урал-пресс».
Стоимость подписки устанавливается
агентствами самостоятельно
и может отличаться от стоимости
указанной редакцией.

Подписные индексы Агентства Роспечать:

«Инженерные изыскания»	71509
«Инженерная геология»	36611
«ГеоРиск»	71510
«Геотехника»	22780

Подписку через агентство «Урал-пресс» можно оформить на
официальном сайте — www.ural-press.ru