

УДК 622.011.4

В.Л. БАРАБАНОВ, С.Д. ВАСЮТИНСКАЯ

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПЛАСТА В ОКРЕСТНОСТИ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Исследованы аналитические решения пространственной задачи пороупругости о возмущении напряженного состояния насыщенного пласта в окрестности скважины. Поведение среды описывается в рамках теории Био. Возмущения на пласт передаются через конечный интервал скважины либо в виде радиальной нагрузки на твердый скелет, либо в виде оттока жидкости с произвольным дебитом. Проведены расчеты величин объемных и сдвиговых напряжений для параметров, соответствующих реальным геологическим условиям. Результаты расчетов сопоставлены с решениями упругой пространственной задачи и с традиционным решением задачи об откачке жидкости через одиночную скважину. Показано, что учет нелокального деформирования насыщенной среды в окрестности возмущающей скважины может сильно повлиять на оценку фильтрационных параметров.

1. Введение. В задачах оценки фильтрационных характеристик насыщенных пластов важное значение имеет реальное напряженное состояние горных пород в окрестности возмущающих скважин. Основным способом определения фильтрационных характеристик пластов являются их опытные гидрогеодинамические или промысловые испытания. При этом оценки водопроницаемости и пьезопроводности проводятся по упрощенным формулам, выведенным из гипотезы о постоянстве горного давления в испытываемом пласте. Между тем известно, что гидрогеодинамическое возмущение насыщенного пласта приводит к нелокальному деформированию собственно пласта и окружающего горного массива, нередко сопровождающемуся оседанием земной поверхности в окрестности устья возмущающей скважины. Влиянию этого эффекта на кривые хода пластового давления в наблюдательных скважинах и на точность оценок фильтрационных параметров посвящен ряд публикаций.

Так в работах [1–3] выведены обобщенные интегро-дифференциальные уравнения фильтрации и исследованы некоторые асимптотические случаи кривых понижения и восстановления пластового давления. В ряде работ оценка деформирования пластов при добыче подземных флюидов проводилась в рамках моделей упругого [4], вязкоупругого [5], пороупругого [6] и упруговязкопластичного [7] поведения горных пород.

Нелокальное деформирование покрывающих продуктивные пласты горных пород подтверждено лабораторным моделированием формирования и разрушения арочных конструкций над областями декомпрессии [8]. Влияние разработки продуктивных пластов на геодинамическое состояние недр в региональном масштабе подтверждено численно и экспериментально для ряда конкретных месторождений, в частности, Уньвинского [9] и Чашкинского [10, 11] нефтяных месторождений.

В настоящей работе проведено сопоставление параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности возмущающей скважины, поведение которого описывается упругой и пороупругой моделями деформирования.

2. Упругая задача. Рассмотрим задачу об упругом статическом равновесии пространства с бесконечной цилиндрической полостью радиуса r_0 .

$$(1 - 2\nu)\Delta\mathbf{u} + \text{grad}(\text{div } \mathbf{u}) = 0, \quad r \geq r_0, \quad |z| < \infty \quad (2.1)$$

где ν – коэффициент Пуассона, \mathbf{u} – вектор смещений, при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(r_0, z) &= g, \quad |z| \leq h; \quad \sigma_{rr}(r_0, z) = 0, \quad |z| > h \\ \sigma_{rz}(r_0, z) &= 0, \quad |z| < \infty \end{aligned} \quad (2.2)$$

и условию ограниченности напряжений при $r \rightarrow \infty$.

Бесконечная цилиндрическая полость моделирует скважину, поверхность которой свободна от касательных и нормальных напряжений, за исключением интервала $(-h, +h)$, где приложена нормальная постоянная нагрузка g .

Согласно [12], выражения для напряжений σ_{rr} , σ_{zz} , σ_{rz} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ можно записать в виде следующих интегралов:

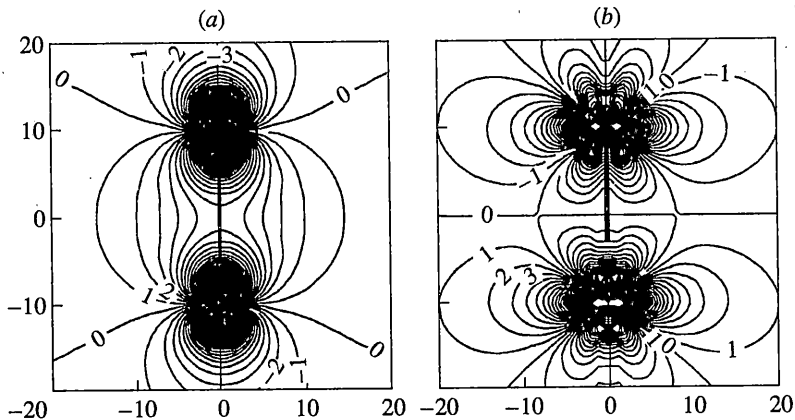
$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha^3 \left[a_1 \left(K_0 + \frac{K_1}{|\alpha|r} \right) - a_2 ((1 - 2\nu)K_0 - |\alpha|rK_1) \right] e^{-i\alpha z} d\alpha \\ \sigma_{zz} &= -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha^3 [a_1 K_0 - a_2 (2(2 - \nu)K_0 - |\alpha|rK_1)] e^{-i\alpha z} d\alpha \\ \sigma_{rz} &= -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha^2 |\alpha| [a_1 K_1 + a_2 (|\alpha|rK_0 - 2(1 - \nu)K_1)] e^{-i\alpha z} d\alpha \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha^3 \left[a_1 \frac{K_1}{|\alpha|r} + a_2 (1 - 2\nu)K_0 \right] e^{-i\alpha z} d\alpha \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для краткости записи аргументы α в функциях a_1 и a_2 и аргументы $(|\alpha|r)$ в цилиндрических функциях мнимого аргумента K_0 и K_1 опущены. Функции a_1 и a_2 находятся из граничных условий. В данном случае они равны, соответственно

$$a_1 = 2ig \sin \alpha h \frac{uK_0(u) - 2(1 - \nu)K_1(u)}{\alpha^4 D}, \quad a_2 = -2ig \sin \alpha h \frac{K_1(u)}{\alpha^4 D} \quad (2.4)$$

$$u = |\alpha|r_0, \quad D = [u^2(K_0^2(u) - K_1^2(u)) - 2(1 - \nu)K_1^2(u)]/u$$

Модельные расчеты напряженного состояния среды проведем для следующих параметров: $\nu = 0.25$, $r_0 = 0.1$ м, $g = 10^5$ Па, $h = 10$ м. На фиг. 1, a , b представлены результаты расчетов суммы нормальных $(\sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\varphi\varphi})/3$ (a) и сдвиговых σ_{rz} (b) напряжений в цилиндрическом объеме $-20 \text{ м} \leq z \leq 20 \text{ м}$ и $r \leq 20 \text{ м}$. Очевидно, что максимальная концентрация напряжений (на фиг. 1 – в единицах Па) приурочена к точкам $(r_0, \pm h)$. Суммарные нормальные напряжения принимают положительные значения (что соответствует упругому растяжению среды) в радиальном направлении от полости и отрицательные значения (что соответствует упругому сжатию) – в вертикальном направлении. Направляющая конуса смены знака суммы нормальных напряжений наклонена к вертикали под углом приблизительно 56° . Сдвиговые напряжения меняют знак на конусной поверхности, направляющая которой составляет с вертикалью угол приблизительно 40° . Как нормальные, так и сдвиговые напряжения быстро затухают при удалении от стенки полости. Из фиг. 1 видно, что эффективное возмущение напряженного состояния среды в окрестности скважины происходит в радиусе не более 5–10 м.



Фиг. 1

3. Пороупругая задача. Полученное решение упругой задачи о возмущении стенки скважины сравним с решением аналогичной пороупругой задачи.

Следуя [13], механическое поведение среды опишем в рамках модели пороупругости Био, т.е.

$$\begin{aligned} N\Delta\mathbf{u} + (A + N)\text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) + Q\text{grad}(\text{div}\mathbf{w}) &= -b(\mathbf{w} - \mathbf{u}), \\ Q\text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) + R\text{grad}(\text{div}\mathbf{w}) &= b(\mathbf{w} - \mathbf{u}), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где \mathbf{u} и \mathbf{w} – соответственно, векторы смещения твердой матрицы среды и насыщающей ее жидкости; N , A , Q и R – упругие коэффициенты; b – фильтрационное сопротивление среды при течении через нее жидкости.

Упругие коэффициенты A , Q и R выражаются через модуль сдвига N , модуль всестороннего сжатия K , сжимаемость жидкости β_f и сжимаемость материала матрицы β_s следующим образом:

$$\begin{aligned} A &= (K - 2N/3) + (1-f)^2(1-\varepsilon)^2/\beta^*, \quad Q = f(1-f)(1-\varepsilon)/\beta^* \\ R &= f^2/\beta^*, \quad \beta^* = f\beta_f + (1-f)(1-\varepsilon)\beta_s, \quad \varepsilon = \beta_s K \end{aligned} \quad (3.2)$$

где f – пористость, β^* и ε – эффективная сжимаемость и жесткость среды.

Коэффициент b выражается через пористость f , вязкость жидкости μ и абсолютную проницаемость среды k :

$$b = f^2\mu/k \quad (3.3)$$

Для эффективных напряжений в матрице σ_{ij} и порового давления p справедливы следующие формулы:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= N(u_{i,j} + u_{j,i}) + (A\text{div}\mathbf{u} + Q\text{div}\mathbf{w})\delta_{ij} \\ \sigma &= -fp = Q\text{div}\mathbf{u} + R\text{div}\mathbf{w} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Используя преобразование Лапласа, уравнения (3.1) приведем к виду

$$\begin{aligned} N\Delta\bar{\mathbf{u}} + (A + N)\text{grad}(\text{div}\bar{\mathbf{u}}) + Q\text{grad}(\text{div}\bar{\mathbf{w}}) &= -bs(\bar{\mathbf{w}} - \bar{\mathbf{u}}) \\ Q\text{grad}(\text{div}\bar{\mathbf{u}}) + R\text{grad}(\text{div}\bar{\mathbf{w}}) &= bs(\bar{\mathbf{w}} - \bar{\mathbf{u}}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Решения уравнений (3.5) можно записать в виде

$$\begin{aligned}\bar{u}_r &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[-(Q+R)a_1 \frac{\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2} K_1(\beta r) - \frac{H-N}{2} a_2 \alpha r K_0(\alpha r) + Na_3 K_1(\alpha r) \right] \cos \alpha z d\alpha \\ \bar{u}_z &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[-(Q+R)a_1 \frac{\alpha^2}{\beta^2 - \alpha^2} K_0(\beta r) - a_2 \left(\frac{H-N}{2} \alpha r K_1(\alpha r) - HK_0(\alpha r) \right) + \right. \\ &\quad \left. + Na_3 K_0(\alpha r) \right] \sin \alpha z d\alpha \\ \bar{w}_r &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[(P+Q)a_1 \frac{\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2} K_1(\beta r) - a_2 \left(\frac{H-N}{2} \alpha r K_0(\alpha r) + N(Q+R) \frac{\alpha^2}{bs} K_1(\alpha r) \right) + \right. \\ &\quad \left. + Na_3 K_1(\alpha r) \right] \cos \alpha z d\alpha\end{aligned}\quad (3.6)$$

$$\begin{aligned}\bar{w}_z &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[(P+Q)a_1 \frac{\alpha^2}{\beta^2 - \alpha^2} K_0(\beta r) - a_2 \left(\frac{H-N}{2} \alpha r K_1(\alpha r) - (H-N(Q+R)) \frac{\alpha^2}{bs} K_0(\alpha r) \right) + \right. \\ &\quad \left. + Na_3 K_0(\alpha r) \right] \sin \alpha z d\alpha\end{aligned}$$

$$P = A + 2N, \quad H = P + 2Q + R, \quad \beta^2 = \alpha^2 + \frac{bsH}{PR - Q^2}\quad (3.7)$$

Для краткости записи аргументы α в функциях a_1 , a_2 и a_3 опущены. Неизвестные функции a_1 , a_2 и a_3 находятся из граничных условий.

Как и в предыдущей задаче будем рассматривать бесконечную цилиндрическую полость радиуса r_0 , свободную от сдвиговых напряжений σ_{rz} . Рассмотрим два варианта другого граничного условия: интервал приложения возмущения непроницаем для жидкости и интервал приложения возмущения проницаем для жидкости. В первом случае возмущение будем задавать через радиальные напряжения, во втором случае – через отток жидкости из среды в полость.

3.1. Непроницаемый интервал приложения возмущения. Пусть в интервале $(-h, +h)$ стенки полости нормальная нагрузка g приложена и к твердой матрице и к жидкости, и стенка полости по всей длине непроницаема для жидкости. В этом случае граничные условия задачи (3.1) запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}(r_0, z) + \sigma(r_0, z) &= g, \quad |z| \leq h \\ \sigma_{rr}(r_0, z) + \sigma(r_0, z) &= 0, \quad |z| > h\end{aligned}\quad (3.8)$$

$$\sigma_{rz}(r_0, z) = 0, \quad |z| < \infty, \quad u_r = w_r, \quad |z| < \infty$$

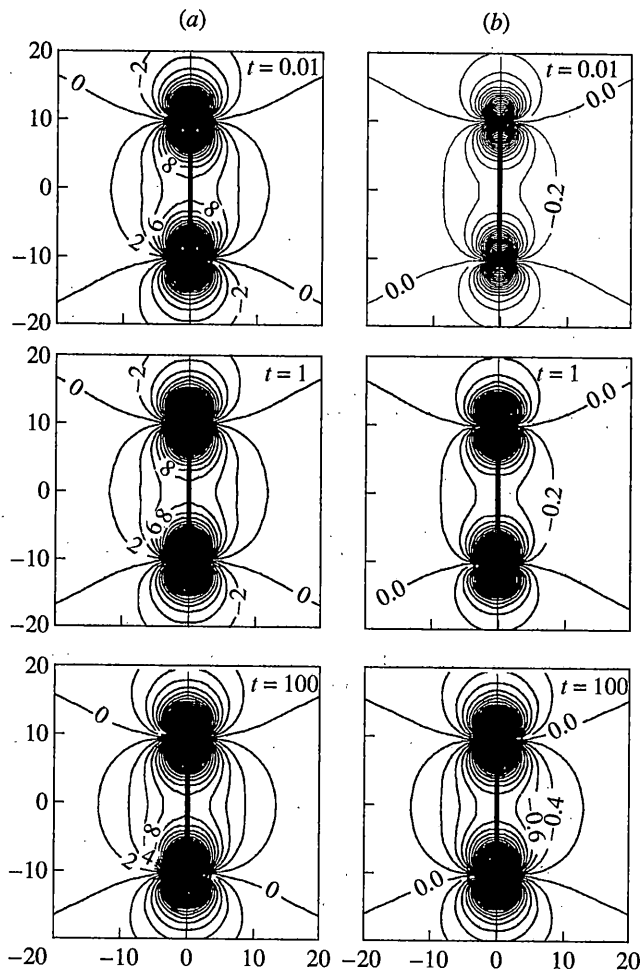
Функция $\sigma_{rr}(r_0, z) + \sigma(r_0, z)$ в виде (3.8) допускает разложение

$$\sigma_{rr}(r_0, z) + \sigma(r_0, z) = \frac{2}{\pi} g \int_0^\infty \frac{\sin \alpha h \cos \alpha z}{\alpha} d\alpha\quad (3.9)$$

Подставляя формулы (3.6) в (3.4) и удовлетворяя граничным условиям (3.8), получим алгебраическую систему из трех уравнений для определения функций a_1 , a_2 и a_3 . Вводя их затем в формулы для смещений и напряжений и выполнив обратное преобразование Лапласа, рассчитаем изменение напряженного состояния среды.

Здесь и далее обратное преобразование Лапласа проводилось численно по схеме Стехфеста

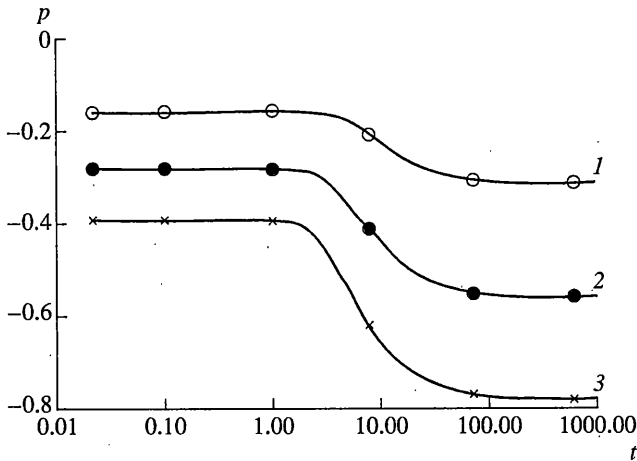
$$F(t) \approx \frac{\ln 2}{t} \sum_{n=1}^N C_n \bar{F}\left(n \frac{\ln 2}{t}\right)$$



Фиг. 2

$$C_n = (-1)^{n+\frac{1}{2}N} \frac{k^{N/2}(2k)!}{\sum_{k=\lfloor \frac{1}{2}(n+1) \rfloor}^{\min(n, \frac{1}{2}N)} (\frac{1}{2}N - k)! k!(k-1)!(n-k)!(2k-n)!}, \quad N \geq 8 \quad (3.10)$$

Модельные расчеты напряженного состояния среды в окрестности полости были проведены при следующих значениях параметров: $r_0 = 0.1$ м, $h = 10$ м, $N = 2,0 \cdot 10^9$ Па, $K = 3.33 \cdot 10^9$ Па, $\beta_f = 4.4 \cdot 10^{-10}$ Па $^{-1}$, $\beta_s = 0.6 \cdot 10^{-10}$ Па $^{-1}$, $f = 0.3$, $k = 10^{-12}$ м 2 , $\mu = 10^{-3}$ Па \cdot с, $g = 10^5$ Па. На фиг. 2, *a, b* представлены расчеты (в единицах Па) суммарных нормальных напряжений $(\sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\phi\phi})/3 + \sigma$ (*a*) и порового давления p (*b*) в моменты времени $t = 0.01$ с, 1 с и 100 с. По сравнению с упругой задачей конфигурация напряженного состояния вокруг полости принципиально не изменилась. Как и прежде, максимальная концентрация напряжений приурочена к точкам $(r_0, \pm z)$. Суммарное нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном полости, имеет положительный знак, что соответствует растяжению среды. Смена знака происходит на вогнутой поверхности, асимптотически переходящей в конус: выше и ниже интервала приложения нагрузки развивается сжатие. Аналогично построено и поле порового давления: в радиальном направлении от интервала приложения нагрузки давление принимает отрицательные значения, выше и ниже интерва-



Фиг. 3

ла – положительные. Сравнивая поля напряжений в различные моменты времени (фиг. 2), можно видеть, что фронт напряжений постепенно удаляется от полости в радиальном направлении, что обусловлено движением жидкой фазы относительно твердого скелета. Наиболее значительное возмущение напряженного состояния среды в окрестности полости происходит, как и в упругом случае, в радиусе не более 5–10 м.

Эволюция порового давления p [Па] в радиальном направлении при $z = 0$ и $r = 10$ м (1), $r = 6$ м (2) и $r = 3$ м (3) представлена на фиг. 3 (время t [с]). Очевидно нарастающее запаздывание уменьшения порового давления с увеличением расстояния от центра полости.

3.2. Проницаемый интервал приложения возмущения. В этом случае граничные условия задачи (3.1) запишем в следующем виде:

$$\partial\sigma(r_0, z)/\partial r = \omega q(t), \quad |z| \leq h$$

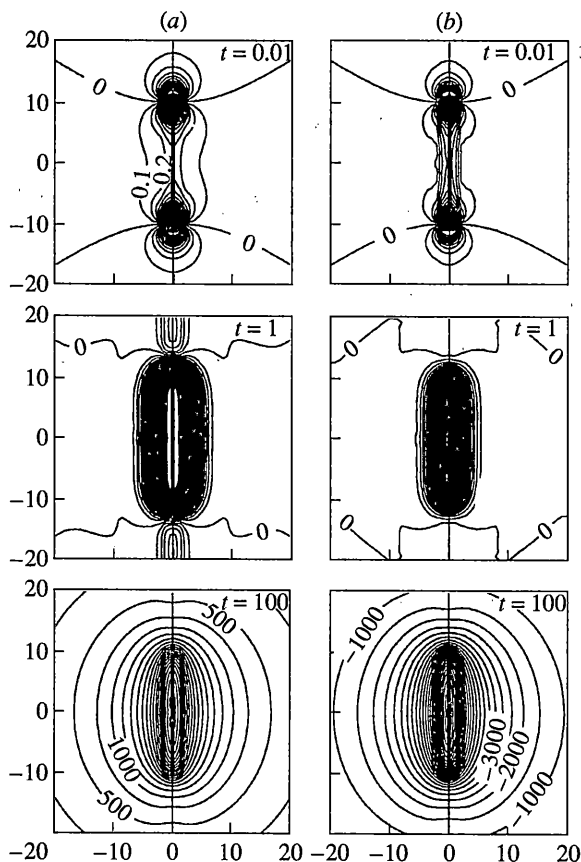
$$\partial\sigma(r_0, z)/\partial r = 0, \quad |z| \leq h$$

$$\sigma_{rz}(r_0, z) = 0, \quad |z| < \infty; \quad \sigma_{rr}(r_0, z) = 0, \quad |z| < \infty \quad (3.11)$$

где $\omega = b/4\pi r_0 h f$. Эти граничные условия означают, что на всей поверхности полости отсутствуют сдвиговые и радиальные напряжения, приложенные к твердой матрице среды, а в интервале $(-h, +h)$ задается поток жидкости с произвольным расходом $q(t)$. Вне этого интервала стенки полости непроницаемы для жидкости. Такие граничные условия близки к реальным ситуациям, например, при откачке или закачке жидкости в пласт через скважину.

Расчеты напряженного состояния среды проводились для тех же упругих и фильтрационно-емкостных параметров, что и в предыдущем разделе. Объемный расход жидкости $q(t)$ принимался постоянным и равным -0.001 м³/с, что соответствует откачке жидкости из пласта.

На фиг. 4, a, b представлены расчеты (в единицах Па) суммарных нормальных напряжений $(\sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\varphi\varphi})/3 + \sigma$ (a) и порового давления p (b) в моменты времени $t = 0.01$ с, 1 с и 100 с. По сравнению с предыдущей задачей о непроницаемом интервале приложения нагрузки конфигурация напряженного состояния среды вокруг полости



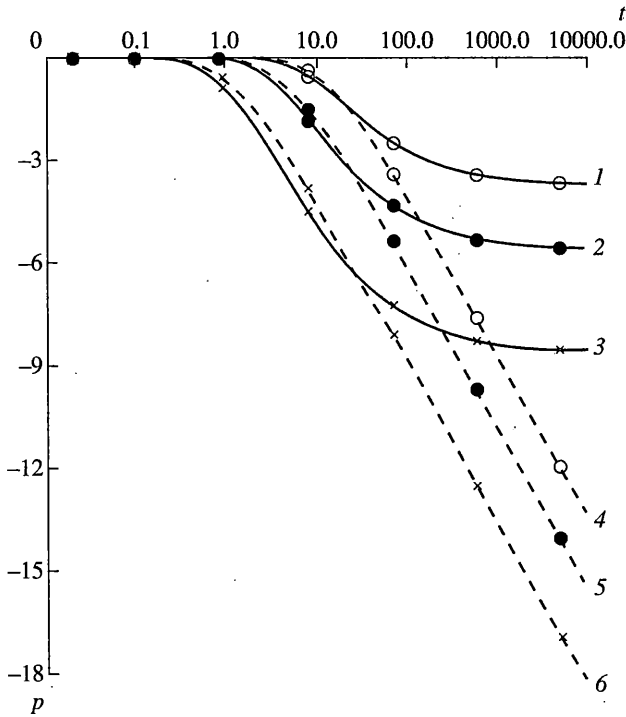
Фиг. 4

принципиально изменилась. Сразу после начала откачки жидкости вокруг скважины формируется область растяжения, которая со временем постепенно распространяется в радиальном направлении. Эта область соответствует воронке депрессии пластового давления. Интересно отметить, что на переднем фронте этой воронки существует зона сжатия и эта зона также постепенно мигрирует в радиальном направлении.

Более детально формирование и развитие воронки депрессии пластового давления со временем представлено на фиг. 5. Сплошными линиями на фиг. 5 показано понижение порового давления p [кПа] на расстояниях от скважины 10 м (1), 6 м (2) и 3 м (3) при откачке с постоянным дебитом. Ось абсцисс представлена в логарифмических координатах. Такое представление наглядно демонстрирует, что, начиная с некоторого момента времени поровое давление (или, иными словами, положение динамического уровня жидкости в скважине) фактически стабилизируется, что обусловлено процессом нелокального деформирования насыщенной среды в зоне возмущения порового давления. Покажем далее, что подобная стабилизация не описывается в рамках традиционных гидрогеодинамических расчетов, не учитывающих нелокальное деформирование насыщенных пластов в окрестности возмущающих скважин.

3.3. Сравнение с традиционными расчетами. Полученное в п. 3.2 решение и величины понижения порового давления при откачке жидкости из скважины сравним с результатами традиционных гидрогеодинамических расчетов.

Согласно общепринятым представлениям, широко используемым в практической гидрогеологии, распространение фронта порового давления в условиях упругого



Фиг. 5

режима фильтрации жидкости в проницаемых пористых пластах описывается уравнением пьезопроводности [13, 14]:

$$p_{,t} = \varkappa \Delta p \quad (3.12)$$

где коэффициент пьезопроводности \varkappa определяется через проницаемость среды k , вязкость жидкости μ и упругую сжимаемость β^* среды следующим образом:

$$\varkappa = k/\mu\beta^* \quad (3.13)$$

При выводе уравнения пьезопроводности исходят из постоянства главных компонентов горного давления $\sigma_{ij}^f - p\delta_{ij} = \text{const}$, что определяет упругую сжимаемость пласта в таком виде:

$$\beta^* = (1 - \varepsilon) / K + f(\beta_f - \beta_s) \quad (3.14)$$

Задача об откачке жидкости через скважину сводится к интегрированию уравнения (3.12) в цилиндрических координатах с граничным условием

$$\frac{\partial p(r_0, t)}{\partial r} = -\frac{\mu}{k} \frac{1}{4\pi r_0 h} q(t) \quad (3.15)$$

В изображениях по Лапласу решение уравнения (3.12) при граничном условии (3.15) выражается через цилиндрические функции мнимого аргумента следующим образом:

$$\bar{p} = \bar{q} \frac{\mu}{k} \frac{1}{4\pi r_0 h} \sqrt{\frac{\varkappa}{s}} \frac{K_0(r\sqrt{s/\varkappa})}{K_1(r_0\sqrt{s/\varkappa})} \quad (3.16)$$

Соответствующие расчеты понижения пластового давления при постоянном дебите откачки представлены на фиг. 5 штриховыми линиями для точек, расположенных на расстоянии от скважины 10 м (4), 6 м (5) и 3 м (6) [кПа]. Очевидно, что на некотором интервале времени сплошные и штриховые линии для одного и того же расстояния фактически совпадают. Далее традиционные расчеты понижения пластового давления прогнозируют его асимптотическое снижение по закону $\ln(t)$, тогда как расчеты с учетом нелокального деформирования насыщенной среды прогнозируют постепенную стабилизацию давления. Отметим, что в практике опытно-фильтрационных работ наиболее часто наблюдается именно стабилизация динамического уровня, т.е. экспериментальные данные более правильно описывать в рамках изложенной модели фильтрации с нелокальным деформированием среды в окрестности возмущающей скважины.

4. Заключение. Исследованы аналитические решения пространственных задач поупругости о нелокальном деформировании проницаемых пористых сред в окрестности возмущающей скважины. Возмущения передаются через конечный интервал скважины либо в виде радиальной нагрузки на твердый скелет, либо в виде оттока жидкости с произвольным дебитом. Проведены расчеты величин нормальных и сдвиговых напряжений для параметров, соответствующих реальным геологическим условиям. Результаты расчетов сопоставлены с решением упругой пространственной задачи и с традиционным решением задачи об откачке жидкости через одиночную скважину. Показано, что учет нелокального деформирования насыщенной среды в окрестности возмущающей скважины может сильно повлиять на оценку фильтрационных параметров.

Работа поддержана РФФИ (проект № 98-05-64607).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ентов В.М., Малахова Т.А.* Об изменении напряженно-деформированного состояния горных пород при изменении давления в насыщенном жидкостью пласте // Изв. АН СССР. МТТ. 1974. № 6. С. 53–65.
2. *Зазовский А.Ф.* О напряженном состоянии насыщенного жидкостью пласта в окрестности эксплуатационной скважины // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. № 3. С. 111–119.
3. *Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* Напряженно-деформированное состояние пласта и восстановление давления в скважине // Механика деформируемого тела. М.: Наука, 1986. С. 94–105.
4. *Граусман А.А.* Оценка величины необратимой деформации пластов при добыче нефти, газа и воды // Геология нефти и газа. 1995. № 4. С. 23–24.
5. *Кашиников Ю.А., Ашихмин С.Г.* Численная модель для расчета сдвижений горных пород при добыче нефти // Проблемы механики горных пород. Тр. 11-й Рос. конф. по механике горных пород. СПб., 1997. С. 193–198.
6. *Каракин А.В.* О пороупругих напряжениях, возникающих при фильтрации в тонком слое с плоско-параллельными границами. Ч. 1. // Геоинформатика. 1997. № 4. С. 3–14.
7. *Бураго Н.Г., Ковшов А.Н.* Численное исследование процессов деформирования слоистого горного массива в окрестности скважины // Изв. РАН. МТТ. 1999. № 1. С. 139–143.
8. *Кондратьев В.Н., Турунтаев С.Б.* Лабораторное моделирование формирования разрушения арочных конструкций над областями декомпрессии, возникающими при нефтегазодобыче // Проблемы механики горных пород. Тр. 11-й Рос. конф. по механике горных пород. СПб., 1997. С. 249–254.
9. *Барях А.А., Кудряшов А.И., Еремينا Н.А., Грачева Е.А.* Оценка влияния разработки нефтяного месторождения на геодинамическое состояние недр // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1998. № 2. С. 31–42.
10. *Кашиников Ю.А., Ашихмин С.Г.* Влияние добычи нефти в упругом режиме на изменение напряженно-деформированного состояния горного массива. Ч. 1. Анализ инструментальных

- наблюдений. Модель деформирования нефтяного коллектора под нагрузкой // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1998. № 5. С. 71–80.
11. *Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г.* Влияние добычи нефти в упругом режиме на изменение напряженно-деформированного состояния горного массива. Ч. 2. Результаты численного моделирования // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 3. С. 51–57.
 12. *Александров В.М., Пожарский Д.А.* Неклассические пространственные задачи механики контактных взаимодействий упругих тел. М.: Факториал, 1998. 288 с.
 13. *Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
 14. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.

Москва

Поступила в редакцию
10.03.2000