

УДК 539.3

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ В ПЛАСТЕ ПРИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВМЕЩАЮЩЕМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, В. М. Фомин*,
Н. П. Ряшенцев*, А. Н. Ряшенцев*, А. В. Соловьев

Институт горного дела СО РАН, 630091 Новосибирск

* Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mail: naz@misd.use.ru

Разработана математическая модель механизма повышения нефтеотдачи продуктивных пластов, заключающаяся в вынужденном “переводе” участков разломной зоны вмещающей среды в запредельное состояние, что вызывает локальное перераспределение напряжений в блочном массиве горных пород, увеличение контурного и пластового давления. На основе решения задачи связанной фильтрации показано, что при реализации предложенного механизма относительный прирост дебита скважины может достигать 5–8 %.

Ключевые слова: блочная среда, фильтрация, повышение флюидоотдачи.

Введение. По оценкам [1], от 40 до 60 % разведанных запасов углеводородов оказываются не вовлеченными в разработку вследствие различных причин, таких как неоднородность структуры пластов, повышенная вязкость нефти и т. д. Данные натурных наблюдений [2, 3] и лабораторных экспериментов [4, 5] свидетельствуют о том, что нестационарные воздействия малой амплитуды в диапазоне частот $10 \div 500$ Гц приводят к увеличению флюидоотдачи действующих и иногда к реанимации выведенных из эксплуатации скважин. К настоящему времени предложен ряд механизмов, объясняющих эти явления: уменьшение вязкости флюида в динамическом поле [5], возникновение инициированных нестационарными воздействиями резонансных процессов в многофазной среде [6] или блочной структуре пласта [7], увеличение проницаемости коллектора вследствие интенсивного образования микротрещин [8]. Наблюдения за изменением сейсмической активности массива горных пород после квазистатических (заполнение водохранилищ [9]) и динамических (землетрясения [10], массовые взрывы [11]) воздействий показали, что в ряде случаев количество выделившейся энергии (оцениваемой на основе регистрации акустической эмиссии) значительно превышает таковое, привнесенное внешними источниками. Это свидетельствует о высвобождении накопленной массивом потенциальной энергии.

В настоящей статье представлено теоретическое обоснование механизма увеличения нефтеотдачи [12], основанное на блочном строении породного массива [13]: внешнее нестационарное воздействие вызывает локальное перераспределение напряжений во вмещающей среде, что может привести к повышению давления в продуктивном пласте и, следовательно, к увеличению дебита скважин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-05-65350); Schlumberger Oilfield Services, an international company in the oil and gas industry.

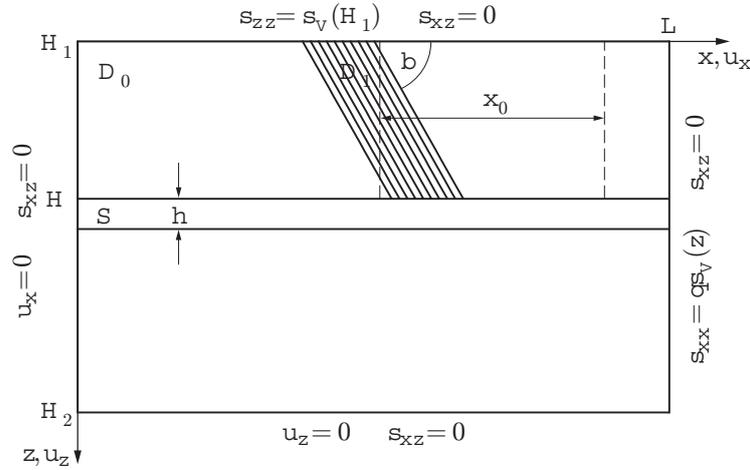


Рис. 1

Гипотезы и постановка задачи. Большинство очагов землетрясений локализуются в окрестности тектонических разломов [14]. Объяснением этого факта могут служить экспериментальные данные [15], свидетельствующие о том, что прочность межблочного контакта на сдвиг значительно меньше прочности слагающих его блоков. Растягивающих же напряжений контакты вообще не выдерживают. Поэтому можно ожидать, что именно на таких структурных ослаблениях произойдет нарушение равновесия при каком-либо внешнем воздействии.

Согласно [15] деформирование межблочных контактов в касательном направлении описывается функцией

$$\tau(R, \sigma_n) = \begin{cases} K_s R & \text{при } R \leq R_p, \\ \tau_p - K_f(R - R_p) & \text{при } R > R_p, \end{cases} \quad (1)$$

где τ и σ_n — касательное и нормальное напряжения; R — проскальзывание берегов; K_s — касательная жесткость; K_f — тангенс угла наклона ниспадающей ветви; $\tau_p = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + \tau_c$ — предел прочности на сдвиг; φ — аналог угла внутреннего трения; τ_c — сцепление; $R_p = \tau_p / K_s$. Предположим, что текущее состояние контакта (R_*, τ_*) близко к предельному (R_p, τ_p) , т. е. $\Delta R / R_p \ll 1$ ($\Delta R = R_p - R_* > 0$). Если внешнее воздействие вызывает относительную подвижку берегов Δu , причем $R_* + \Delta u > R_p$, то по (1) остаточное проскальзывание $R_s = (\Delta u - \Delta R)(1 + K_f / K_s)$ и в среде произойдет локальное перераспределение напряжений.

Относительные смещения блоков на расстояниях порядка километров от ядерного взрыва достигают 20 мм [16]. Мощные виброисточники (с возбуждающей силой 10^6 Н) могут создавать сигнал, амплитуда которого на глубине 2 км составляет порядка 0,01 мм [17]. Эту величину примем в качестве Δu . Возьмем достаточно типичную блочную структуру массива и подберем граничные условия и свойства среды так, чтобы можно было реализовать предложенный механизм.

В декартовой системе координат (x, z) с осью z , направленной вертикально вниз, рассмотрим прямоугольную область $D_0 \{0 \leq x \leq L, H_1 \leq z \leq H_2\}$, в которой на глубине H от дневной поверхности $z = 0$ расположен горизонтальный пласт S мощностью h . Часть налегающей толщи D_1 имеет наклонно-слоистую структуру с углом падения β (рис. 1). Полагаем, что среда в D_0 — упругая, деформирование межблочных нарушений в D_1 в касательном направлении описывается зависимостью (1), а σ_n и нормальные смещения на них непрерывны.

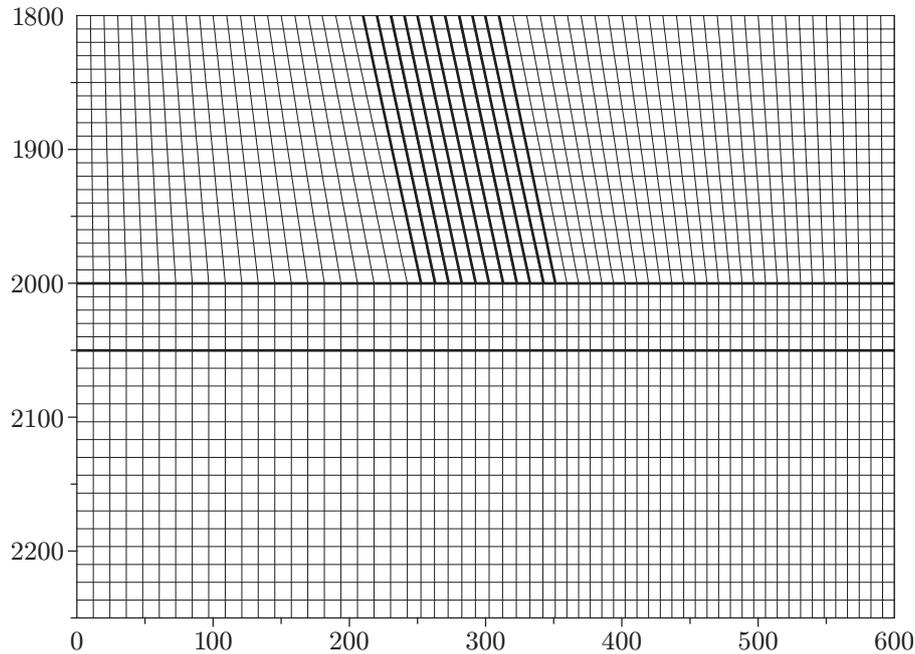


Рис. 2

В области D_0 выполнены уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \Phi_x, \quad \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \Phi_z \quad (2)$$

и закон Гука

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{zz}, \quad \sigma_{zz} = \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz}, \quad \sigma_{xz} = 2\mu\varepsilon_{xz}, \quad (3)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений ($i, j = x, z$); λ, μ — параметры Ламе; $\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i})$ — компоненты тензора деформаций; u_i — смещения; $\Phi = (\Phi_x, \Phi_z)$ — вектор массовых сил.

На ∂D_0 сформулируем граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(x, H_1) = \sigma_V(H_1), \quad \sigma_{xz}(x, H_1) = 0, \quad u_z(x, H_2) = 0, \quad \sigma_{xz}(x, H_2) = 0, \\ u_x(0, z) = 0, \quad \sigma_{xz}(0, z) = 0, \quad \sigma_{xx}(L, z) = q\sigma_V(z), \quad \sigma_{xz}(L, z) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma_V(z) = \rho gz$ — литостатическое напряжение; ρ — плотность; g — ускорение свободного падения; q — коэффициент бокового отпора.

Краевая задача (1)–(4) при $\Phi_x = 0$, $\Phi_z = \rho g$, решение которой определяет исходное поле напряжений σ_{ij}^0 массива, сформулирована для модели плоского деформированного состояния, хорошо описывающего сбросовый ($q < 1$) тектонический режим [18], характерный для большинства нефтеносных районов Западной Сибири [19].

Решение (1)–(4) осуществлялось методом конечных элементов по программе 2МКЭЧК [20]. На рис. 2 показан фрагмент дискретизации расчетной области. Были выбраны следующие параметры: $H_1 = 1500$ м, $H_2 = 2500$ м, $H = 2000$ м, $L = 1000$ м, $h = 50$ м. Зона D_1 , расположенная в средней части D_0 , состоит из десяти слоев (мощность каждого 5 м), разделенных нарушениями сплошности (см. рис. 1). Физические свойства пород приведены в таблице, для межблочных контактов: $K_s = 3$ ГПа/м, $K_f = 0,2K_s$, $\varphi = 25^\circ$, $\tau_c = 0,5$ МПа.

Цель проведенного численного эксперимента — найти значения q и β так, чтобы величина ΔR вдоль нарушений была порядка 10^{-5} м. На рис. 3, а, б приведено распределение ΔR на одном из межблочных контактов при различных значениях β для $q = 0,3$ и

Физические свойства пород

Область	λ , ГПа	μ , ГПа	ρ , кг/м ³
D_0	7,4	8,0	2500
D_1	6,7	7,2	2500
S	5,2	6,0	2200

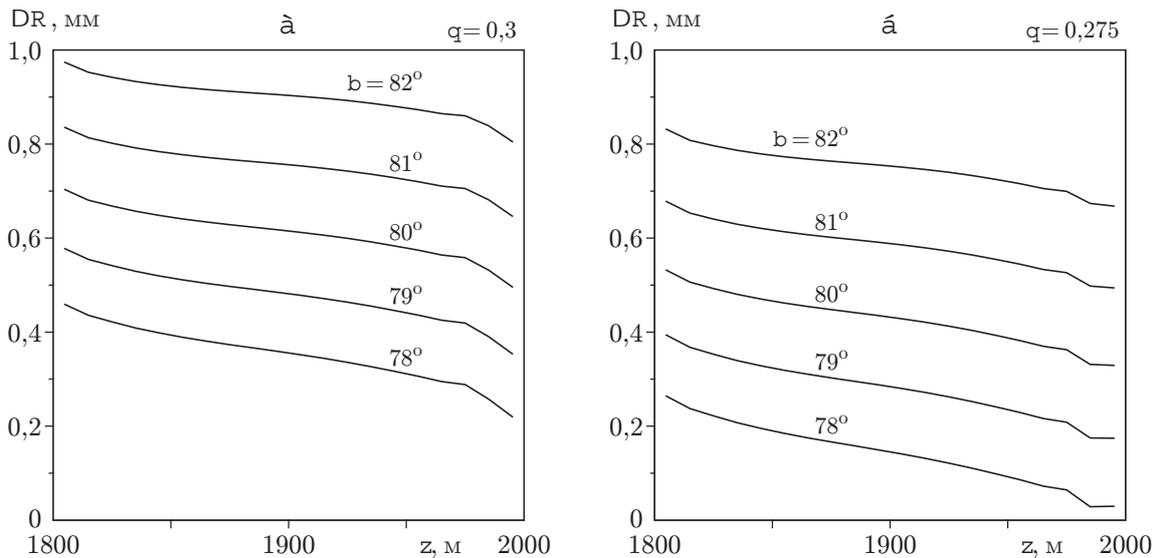


Рис. 3

$q = 0,275$ соответственно. Можно видеть, что в окрестности пласта разломная зона при $\beta = 78^\circ$ и $q = 0,275$ находится в близком к предельному состоянию с $\Delta R = 0,05$ мм. Это дает возможность с помощью группы нестационарных источников, сфокусировав сигнал на определенный участок, нарушить равновесие среды и тем самым вызвать перераспределение напряжений во вмещающем блочном массиве, увеличение давления в пласте и, следовательно, повышение дебита.

Анализ процесса фильтрации при вынужденном изменении давления. На основе модели нестационарной фильтрации сделаем качественную оценку изменения расхода скважины при локальном перераспределении напряжений в массиве.

В момент времени $t = 0$ пласт S (см. рис. 1) вскрывается скважиной, расположенной на расстоянии x_0 от середины разломной зоны. Движение флюида описывается уравнениями: сохранения массы

$$\frac{\partial(m\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma w_z)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

состояния

$$p = p_0 + C(\gamma/\gamma_0 - 1) \quad (6)$$

и законом Дарси

$$w_x = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad w_z = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (7)$$

где w_x, w_z — составляющие скорости; p — давление; k — проницаемость; m — пористость; γ, η, C — соответственно плотность, вязкость и сжимаемость флюида; p_0 — атмосферное давление; γ_0 — значение γ при $p = p_0$.

Влияние изменения давления на напряженно-деформированное состояние пласта учитывалось введением в S нового вектора массовых сил

$$\Phi_x = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \Phi_z = \rho g + \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Для задания начального распределения p воспользуемся гипотезой С. А. Христиановича “в нескрытом пласте давление флюида равно среднему горному давлению” [21], тогда

$$p(0, x, z) = (1 + \nu)(\sigma_{xx}^0(x, z) + \sigma_{zz}^0(x, z))/3. \quad (8)$$

Здесь принято во внимание, что для плоской деформации $\sigma_{yy} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})$, ν — коэффициент Пуассона.

Сформулируем также для (5)–(7) граничные условия

$$w_z(t, x, H) = w_z(t, x, H + h) = 0; \quad (9)$$

$$p(t, 0, z) = (1 + \nu)(1 + q)\sigma_V(z)/3; \quad (10)$$

$$p(t, x_0 + L/2, z) = p_0. \quad (11)$$

Решение системы (1)–(11) проводилось по методике и программам, разработанным в [22].

Пусть при $t = t_p$ происходит проскальзывание на нескольких участках контактов разломной зоны. Это вызывает перераспределение напряжений в породном массиве; компоненты нового поля напряжений обозначим σ_{ij}^1 . Тогда и давление в пласте скачкообразно меняется:

$$p(t_p, x, z) \rightarrow p(t_p, x, z) + \Delta\sigma(x, z),$$

где $\Delta\sigma = (1 + \nu)(\sigma_{xx}^1 - \sigma_{xx}^0 + \sigma_{zz}^1 - \sigma_{zz}^0)/3$ — приращение среднего напряжения. Проницаемость пласта также изменяется: $k = k_0(1 - \Delta\sigma/K)$, $K = (1 - m)K_0 + mC$ — сжимаемость коллектора, $K_0 = \lambda + 2\mu/3$ — модуль объемного сжатия скелета.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $k_0 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$; $\eta = 0,03 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $m = 0,2$; $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$; $q = 0,275$; $d_0 = 850 \text{ кг/м}^3$; $C = 3 \text{ ГПа}$ (тогда $K_0 = 11,5 \text{ ГПа}$, $K = 9,8 \text{ ГПа}$). На рис. 4,а показаны изолинии $\Delta\sigma$ для случая проскальзывания шести контактов в середине D_1 с $\Delta u = 0,024 \text{ мм}$ на участках, непосредственно граничащих с пластом. Видно, что перераспределение напряжений создает заметное увеличение давления в пласте (до 1,5 атм) в локальной зоне, расположенной ближе к кровле. На рис. 4,б также приведены линии равных значений $\Delta\sigma$, но проскальзывание с $\Delta u = 0,06 \text{ мм}$ вызвано на участках нарушений, расположенных на расстоянии 20 м от кровли пласта. Здесь эффект заметнее (значения $\Delta\sigma$ достигают 3 атм), а область повышенного давления обширнее. Тем не менее предложенный механизм нецелесообразно реализовывать на мощных пластах.

Проанализируем изменение дебита продуктивной скважины на основе поведения относительного приращения

$$\Delta\bar{Q}(t) = \frac{Q_p(t) - Q(t_p)}{Q(t) - Q(t_p)} - 1,$$

где

$$Q(t) = \int_0^t \int_H^{H+h} w_z\left(t, x_0 + \frac{L}{2}, z\right) dz dt$$

— удельный расход; Q_p — расход после реализации рассматриваемого механизма пере-

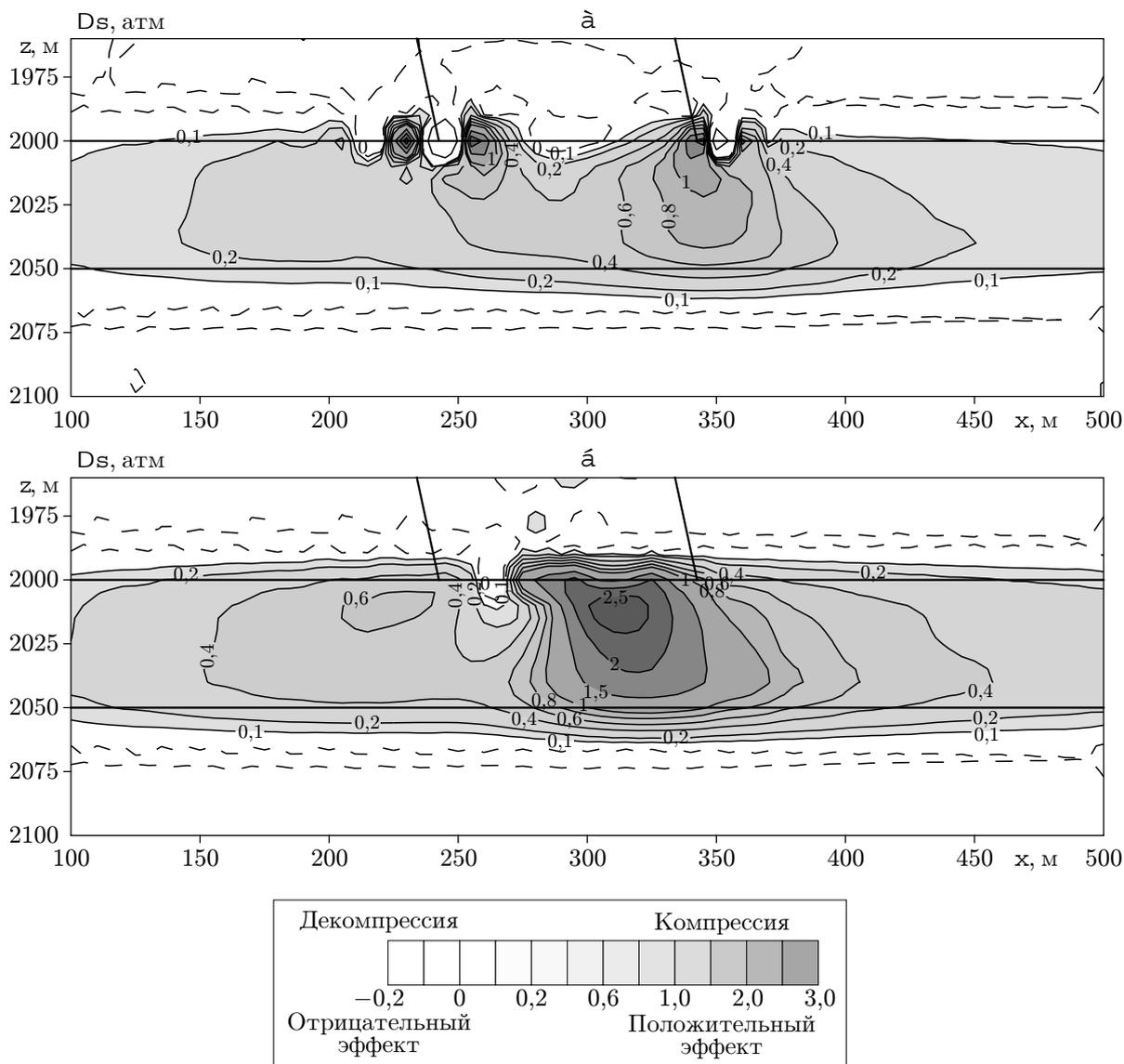


Рис. 4

распределения напряжений. На рис. 5, а, б при различных значениях t_p показана зависимость $\Delta\bar{Q}$ от времени для $x_0 = 50$ м и $x_0 = 100$ м соответственно. Следует отметить, что $\Delta\bar{Q}$ уменьшается с удалением разломной зоны от скважины; возрастает с увеличением промежутка времени t_p от начала эксплуатации скважины до момента подвижки по контактам; достаточно быстро стремится к некоторому стационарному значению, которое характеризует “остаточный эффект” после вынужденного изменения давления в пласте.

Заключительные замечания. Реализация предложенного механизма может привести и к отрицательному эффекту: если в рассмотренной модели массива вызвать проскальзывание двух крайних контактов, то практически всюду в пласте давление понизится.

Анализ показал, что для взбросового тектонического режима, характеризуемого высокими ($q > 1$) горизонтальными напряжениями, состояние разломной зоны (при заданных здесь структуре и свойствах массива) с $\Delta R \sim 0,05$ мм может иметь место при $\varphi \leq 10^\circ$ и $\tau_c \approx 0$. Такие значения прочностных характеристик присущи межблочным разломам, заполненным глинистыми материалами с высокой влажностью.

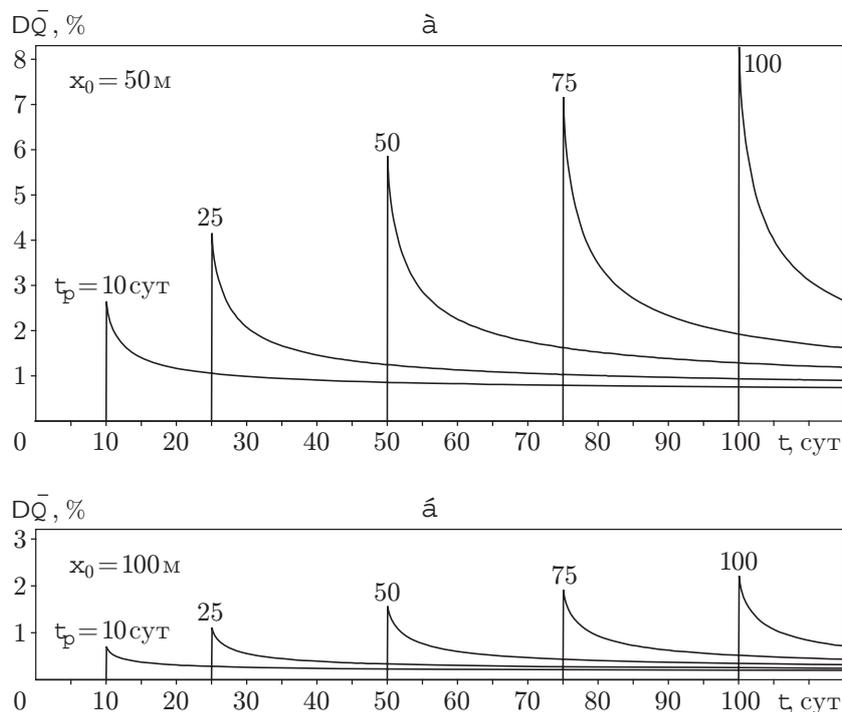


Рис. 5

Для определения возможности и целесообразности реализации предложенного механизма повышения давления в продуктивных пластах необходим предварительный анализ напряженно-деформированного состояния массива для выявления “слабых” зон с последующей оценкой влияния последствий их вывода из состояния равновесия на процесс фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О. Л., Симкин Э. М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты. М.: Мир, 2001.
2. Малышева В. В. Влияние Старогрозненского землетрясения 1938 г. на динамику нефтеотдачи и состояние скважин // Проблемы физической географии Северного Кавказа. Грозный: Чеч.-Инг. кн. изд-во, 1979. С. 176–180.
3. Гадиев С. М. Применение вибрации для извлечения нефти. М.: Недра, 1977.
4. Аммосов С. М., Барабанов В. Л., Войтов Г. И. и др. Результаты экспериментального изучения вибрационного воздействия на нефтяные залежи. Современные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Наука, 1992.
5. Вахитов Г. Г., Симкин Э. М. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. М.: Недра, 1985.
6. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
7. Алексеев А. С., Цецохо В. А., Белоносова А. В. и др. Вынужденные колебания трещиновато-блочных флюидонасыщенных слоев при вибросейсмических воздействиях // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2001. № 6. С. 3–12.
8. Черных В. А. Модель изменения проницаемости неоднородной горной породы в процессе деформации // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1990. № 1. С. 126, 127.

9. **Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х.** Влияние механических вибраций на выделение сейсмической энергии // Прогноз землетрясений. 1983–1984. № 4. С. 365–372.
10. **Краус Е. В., Кузнецов О. Л., Симкин Э. М. и др.** К вопросу о прогнозировании неглубоких землетрясений // Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана. Ташкент: Фан, 1986. С. 292–302.
11. **Еременко А. А., Скляр Н. И.** Влияние геологических нарушений на удароопасность массива горных пород // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1999. № 1. С. 14–21.
12. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ряшенцев А. Н. и др.** Об одном механизме повышения нефтеотдачи пластов // Докл. РАН. 2002. Т. 382, № 1. С. 41–44.
13. **Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф.** Деформирование среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987.
14. **Zoback M. L.** First and second order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N B8. P. 11.703–11.728.
15. **Barton N. R.** Deformation phenomena in jointed rock // Geotechnique. 1986. V. 36, N 2. P. 147–167.
16. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Движение блоков горной породы при крупномасштабных подземных взрывах. Ч. 1: Экспериментальные данные // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2001. № 1. С. 71–83.
17. **Ряшенцев Н. П., Ащепков Ю. С., Назаров Л. А. и др.** Управляемое сейсмическое воздействие на нефтяные залежи. Новосибирск, 1989. (Препр. / АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т горн. дела; № 31).
18. **Назарова Л. А.** Использование сеймотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1999. № 1. С. 28–36.
19. **Артюшков Е. В.** Физическая тектоника. М.: Наука, 1993.
20. **Назарова Л. А.** Напряженное состояние наклонно-слоистого массива горных пород вокруг выработки // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1985. № 2. С. 33–37.
21. **Христианович С. А.** Об основах теории фильтрации // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1989. № 5. С. 3–18.
22. **Назаров Л. А., Назарова Л. А.** Некоторые геомеханические проблемы извлечения газа из угольных пластов // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1999. № 2. С. 35–44.

Поступила в редакцию 19/XI 2003 г.
