

УДК 532.546

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИН
ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА**

ТУРЕЦКАЯ Ф. Д.

Изучены процессы распространения возмущений в окрестности скважины в условиях линейного упругого режима при законе фильтрации с предельным градиентом, а также в условиях нелинейно-упругого режима для различной формы закона фильтрации. На основе полученных результатов исследован вопрос о различении двух видов фильтрационных аномалий — нелинейности закона фильтрации, связанной с неньютоновским поведением жидкости, и зависимости параметров нелинейного закона фильтрации от давления, обусловленной нелинейно-упругими деформациями пластов [1].

Рассматривается плоскорадиальное движение в круговом пласте радиуса R , постоянной мощности. Кровля и подошва пласта непроницаемы и горизонтальны. В центре пласта расположена совершенная скважина радиуса r_0 , закон изменения дебита которой $Q(t)$ известен.

Закон фильтрации записывается в форме, разрешенной относительно скорости [2—4]

$$w = -\frac{kG}{\mu} \Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| G^{-1} \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (1)$$

здесь w — скорость фильтрации, p — давление, k — проницаемость среды, μ — вязкость жидкости, G — некоторое характерное значение градиента давления, например предельный градиент, $\Psi(z)$ — безразмерная функция, определяющая закон фильтрации. Задание $\Psi(z)$ в виде $\Psi(z) = z$ отвечает закону Дарси

$$\Psi(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 1 \\ z-1, & z \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

закону фильтрации с предельным градиентом.

Нестационарные процессы при законе фильтрации (1) в условиях упругого режима описываются уравнением [3, 4]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa G \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| G^{-1} \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{k_0}{(a_m + a_p) m_0 \mu}$$

где κ — коэффициент пьезопроводности, m_0 , k_0 — пористость и проницаемость при давлении p_0 , a_m , a_p — коэффициенты сжимаемости пор и жидкости.

Начальные условия, соответствующие невозмущенному пласту, и граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} p(r, 0) &= p_0, & r_0 \leq r \leq R \\ p(R, t) &= p_0, & t > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$r_0 G \left[\Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| G^{-1} \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \Big|_{r=r_0} = - \frac{\mu Q}{k 2\pi}$$

Изучаются также течения в условиях нелинейно-упругого режима фильтрации, рассматривается случай пористости и проницаемости среды и плотности жидкости, экспоненциально зависящих от давления [5, 6]

$$m = m_0 \exp [a_m (p - p_0)], \quad k = k_0 \exp [a_k (p - p_0)] \quad (5)$$

$$\rho = \rho_0 \exp [a_p (p - p_0)]$$

где m , k , ρ — пористость, проницаемость и плотность при текущем давлении p ; ρ_0 — плотность при начальном давлении p_0 , a_k — коэффициент изменения проницаемости.

Уравнение неразрывности вместе с уравнением (1) приводит в этом случае к уравнению

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi G l^{-(a_m + a_p)(p - p_0)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r l^{-(a_k + a_p)(p - p_0)} \Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| G^{-1} \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \quad (6)$$

Задача решается в безразмерных переменных

$$r^* = \frac{r}{R}, \quad t^* = \frac{\chi t}{R^2}, \quad p^* = \frac{p - p_0}{GR}, \quad Q^* = \frac{Q\mu}{k_0 GR}$$

$$a_s^* = a_s GR, \quad s = k, m, \rho$$

что формально эквивалентно замене в уравнении (3) χ и G на единицу. Уравнение (6), начальные и граничные условия (4) переписываются следующим образом (знак звездочка при безразмерных переменных опускается):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = l^{-\beta p} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r l^{\alpha p} \Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \quad (7)$$

$$p(r, 0) = 0, \quad r_0 \leq r \leq 1$$

$$p(1, t) = 0, \quad t > 0$$

$$r_0 \left[l^{\alpha p} \Psi \left(\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \Big|_{r=r_0} = - \frac{Q}{2\pi} \quad (8)$$

где $\alpha = a_k + a_p$, $\beta = a_m + a_p$.

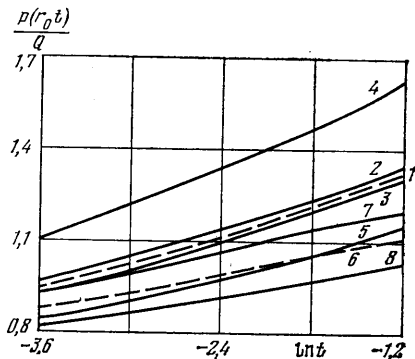
Случаю линейного упругого режима фильтрации формально отвечает уравнение (7) с граничными условиями (8) при $\alpha = \beta = 0$.

Задача решена численным методом. Применяется неявная конечно-разностная схема (с итерациями по нелинейности) на неравномерной сетке с узлами, сгущающимися к скважине.

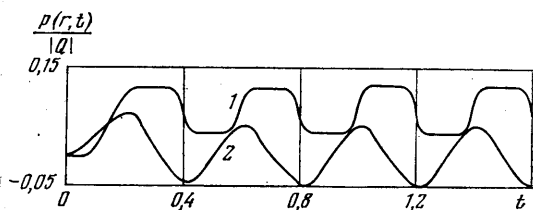
Вначале исследуются течения при законе фильтрации с предельным градиентом в условиях упругого режима. Результаты расчетов хорошо воспроизводят известные особенности движения однородной жидкости, связанные с нелинейностью закона фильтрации: так, кривые зависимости от $\ln t$ отношения $p(r_0, t)/Q$, отвечающие пуску скважины с постоянным дебитом, зависят от значения абсолютной величины дебита скважины (кривая 1 на фиг. 1 соответствует значению $|Q| = q = 2$, кривая 6 — $|Q| = q = 10$). Как известно [1, 3, 4], нелинейность закона фильтрации с предельным градиентом не может быть обнаружена при исследовании скважин методом восстановления давления (так как отклонение давления от первоначального, соответствующего стационарному движению, следует тем же уравнениям, что и в случае фильтрации при законе Дарси), и нужно рассматривать нестационарные процессы, при которых меняется направление течения. Представляет интерес периодический режим работы скважины с дебитом, принимающим через равные промежутки времени значения q и $-q$. График, приведенный на фиг. 2, дает сравнение кривых изменения со временем отношения $p(r, t)/q$ в точке, удаленной на расстояние $r = 0,475$ от скважины, при законе фильтрации с предельным градиентом (кривая 1) и при законе Дарси (кривая 2). В случае закона фильтрации с предельным градиентом возмуще-

ния распространяются на различные расстояния от скважины в зависимости от величины дебита скважины и периода колебаний T и не доходят (при рассмотренных значениях $q=2$ и 4 , $T=0,2$ и $0,4$) до внешней границы пласта.

Следующий тип исследуемых движений – плоскорадиальные течения в условиях нелинейно-упругого режима. Очевидно, и проведенные расчеты подтверждают, что на удалении от скважины, где возмущения давления малы, эффекты нелинейно-упругого режима вырождаются, и, наоборот, именно там, в области малых скоростей, наиболее ярко проявляются эффекты, связанные с наличием предельного градиента. Отмеченный факт может служить основой для различения этих двух типов нелинейности. Далее, из уравнения (6) и условий (4) с учетом (5) ясно, что при изменении знака дебита эффекты нелинейно-упругого режима в первом приближении меняют знак, в то время как эффекты нелинейной фильтрации сохраняют свою величину.



Фиг. 1



Фиг. 2

В дальнейшем с учетом сказанного изучаются нестационарные процессы при симметричных режимах отбора и закачки.

Уравнение (7) в случае линейности функции Ψ , задающей закон фильтрации, путем введения функции Л. С. Лейбензона $u(r, t) = \exp[\alpha p(r, t)]$ преобразуется к виду

$$\frac{\partial u}{\partial t} = u^{1-\beta/\alpha} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (9)$$

Функция $u(r, t)$ удовлетворяет условиям

$$u(r, 0) = 1, \quad r_0 \leq r \leq 1; \quad u(1, t) = 1, \quad t > 0 \quad (10)$$

$$r_0 \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\frac{\alpha Q}{2\pi}$$

Для получения линеаризованного по Л. С. Лейбензону уравнения следует положить в уравнении (9) величину $u^{1-\beta/\alpha}$ равной единице, что соответствует либо $\alpha = \beta$, либо $p = 0$; в результате уравнение (9) сводится к уравнению теплопроводности, решение которого, удовлетворяющее условиям (10), можно представить в виде

$$u(r, t) = 1 + \alpha Q u_0(r, t) \quad (11)$$

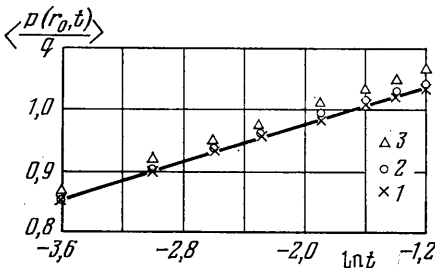
где u_0 – решение уравнения теплопроводности при интенсивности источника равной единице, отвечающее нулевым начальным условиям и обращающееся в нуль при $r=1$.

В работах [6, 7] показано, что при малых значениях абсолютной величины αQ решения уравнения (9) близки решениям линеаризованного по Л. С. Лейбензону уравнения, исходя из этого развиты методы определения параметров пластов по неустановившемуся притоку жидкости к скважине.

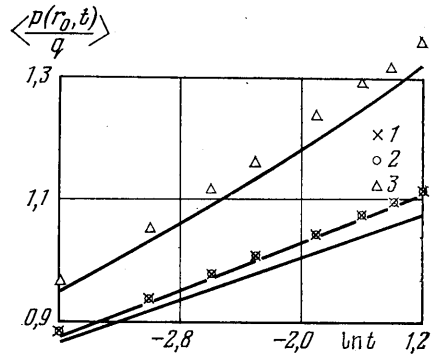
При использовании (11) в качестве приближенного решения уравнения (9) для давления получается приближенное представление

$$\frac{p(r, t)}{Q} = \frac{\ln(1 + \alpha Q u_0)}{\alpha Q} = u_0 - \alpha Q \frac{u_0^2}{2} + \dots \quad (12)$$

Пусть p_+ — кривая изменения давления при нестационарном процессе нагнетания с дебитом $Q_+ = q$, p_- — аналогичная кривая при отборе с дебитом $Q_- = -q$. Величина $\langle p/q \rangle = (p_+/Q_+ + p_-/Q_-)/2$ оказывается в этом случае близка отношению давления к величине дебита скважины в линейной задаче упругого режима (или, что то же, решению линейного уравнения $u_0(r, t)$). Сопоставление величины $\langle p/q \rangle$ при различных значениях αq с решением линейной задачи дает график, приведенный на фиг. 3, где



Фиг. 3



Фиг. 4

сплошной линией изображена зависимость от $\ln t$ отношения $p(r_0, t)/q$ при мгновенном пуске скважины с постоянным дебитом q (в линейной задаче упругого режима), точками — величина $\langle p/q \rangle$ при $\alpha q = 0,03; 0,15; 0,3$ (кривые 1, 2, 3 соответственно).

Ограничиваясь двумя членами ряда в представлении (12), можно составить комбинацию решений

$$2 \left(\frac{p_-}{Q_-} - \frac{p_+}{Q_+} \right) \left(\left\langle \frac{p}{q} \right\rangle \right)^{-2} \quad (13)$$

позволяющую определить величину αq с довольно высокой точностью (погрешность не превосходит 3% от αq).

При использовании функции Ψ в форме (2) учитываются одновременно оба вида нелинейности. Кривые зависимости $p(r_0, t)/Q$ от $\ln t$ при пуске скважины с постоянным дебитом $Q = \pm q$ приведены на фиг. 1. Линии 2, 3 отвечают значениям $Q = -2$ и 2 соответственно при $\alpha = 0,015$, $\beta = -0,002$, кривые 4, 5 при $\alpha = 0,15$, $\beta = 0,02$, кривые 7, 8 — $Q = -10$ и 10 при $\alpha = 0,015$, $\beta = 0,002$. При фиксированных значениях величин α , β кривые, отвечающие значениям дебита $Q_+ = q$ и $Q_- = -q$, расположены симметрично относительно линии, соответствующей решению уравнения линейного упругого режима при законе фильтрации с предельным градиентом (кривые 1, 6 отвечают $q = 2$ и 10). По аналогии с предложенным выше составляется комбинация решений $\langle p/q \rangle$. Сплошными линиями на фиг. 4 изображены кривые зависимости $p(r_0, t)/q$ от $\ln t$, отвечающие пуску скважины с постоянным дебитом q при законе фильтрации с предельным градиентом в условиях линейного упругого режима (кривая 1 — при $q = 20$, 2 — при $q = 10$, 3 — при $q = 2$), точками — полусумма $\langle p/q \rangle$ при $\alpha = 0,015$, $\beta = 0,002$ в случаях $q = 10, 20$ и при $q = 2$, $\alpha = 0,15$, $\beta = 0,02$ (кривые 1, 2, 3 соответственно).

Составлялась также комбинация (13), определяющая величину αq с погрешностью, не превосходящей 10%.

Таким образом, нестационарные исследования на симметричных режимах отбора и закачки целесообразны при необходимости различения фильтрационных аномалий, связанных с нелинейностью закона фильтрации или с зависимостью параметров линейного закона фильтрации от давления. На величину $\langle p/q \rangle$ слабо влияют эффекты нелинейно-упругого режима, и по ней могут быть определены параметры закона фильтрации. Напротив, величина $(p_-/Q_- - p_+/Q_+)$ относительно мало чувствительна к эффектам нелинейной фильтрации, а характеризует главным образом эффекты нелинейно-упругого режима.

Перспективным средством обнаружения эффектов нелинейной фильтрации типа предельного градиента, как показано выше, может служить гидропрослушивание на таких режимах возмущающей скважины. Близкая к прямоугольной форма импульсов давления в наблюдательной скважине и полное прекращение реагирования при снижении интенсивности возмущающих воздействий ниже определенной величины — характерные признаки наличия предельного градиента.

Автор выражает благодарность В. М. Ентову и Л. А. Чудову за полезные советы и обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мингареев Р. Ш., Валиханов А. В., Вахитов Г. Г. и др. Гидродинамические особенности разработки слоистых пластов с проявлением начального градиента давления. — Казань, 1972, 111 с.
2. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
3. Мирзаджанзаде А. Х., Ахмедов З. Т., Алиев В. А. и др. Особенности разработки месторождений не-newтоновских нефтей. М., 1971. 115 с.
4. Бернадинер М. Г., Ентов В. М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. М.: Наука, 1975. 200 с.
5. Бан А., Богомолова А. Ф., Максимов В. А., Николаевский В. Н., Оганджанян В. Г., Рыжик В. М. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М.: Гостоптехиздат, 1962. 275 с.
6. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970. 355 с.
7. Горбунов А. Т. Гидродинамические исследования разработки нефтяных месторождений с учетом изменения фильтрационных свойств пластов: Автореф. дис. на соискание уч. ст. док. техн. наук. М., 1977. 49 с.

Москва

Поступила в редакцию
15.III.1982