

УДК 532.546
DOI 10.17223/19988621/39/11

В.Ш. Шагапов, О.В Дударева

ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ФИЛЬТРАЦИИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СКВАЖИНЫ¹

По предложенной ранее теоретической модели фильтрации с предельным градиентом давления изучены индикаторные зависимости при переменных режимах функционирования скважин. На основе численного моделирования эксплуатации скважины проанализирована возможность выявления нелинейных эффектов закона фильтрации в пластовых условиях.

Ключевые слова: *нелинейная фильтрация, сверхнизкая проницаемость, предельный градиент давления, нефтеотдача пластов, метод конечных разностей.*

В последнее время, в связи с уменьшением запасов углеводородного сырья, разрабатываются пласты со сверхнизкой проницаемостью. Примерами таких пластов могут служить песчаники, глиносодержащие песчаники, известняки с проницаемостью $k = 10^{-16} \dots 10^{-14} \text{ м}^2$. Из экспериментальных данных [1–3] известно, что в таких пластах наблюдаются необычные явления нелинейной фильтрации.

Изучению нарушения закона Дарси при малых скоростях фильтрации посвящено значительное число работ. Одной из причин нарушения линейного закона Дарси могут служить аномальные свойства нефти, характерные для неньютоновских жидкостей. Наряду с этим экспериментальные данные [4], проведенные в низкопроницаемой пористой среде, показывают, что при однофазной фильтрации воды, являющейся ньютоновской жидкостью, также возникают отклонения от линейного закона Дарси. Наиболее значительны отклонения от закона Дарси при фильтрации воды в глинах, но также наблюдаются при фильтрации в песчаниках не только воды, но и нефти.

Возникновение этого явления может происходить за счет поверхностного взаимодействия между флюидом и твердым скелетом породы, в результате чего изменяются свойства приповерхностных слоев жидкости и возникают дополнительные силы сопротивления движению. При таком взаимодействии образуются застойные зоны, уменьшающие сечения капилляров пористой среды или полностью перекрывающие поры. Возникновение этих зон приводит к снижению нефтеотдачи коллектора. Образование застойных зон происходит в областях пласта, где градиент давления меньше некоторого предельного значения q . Для преодоления (разрушения) застойных зон целесообразно приложить некоторый перепад давления.

Таким образом, фильтрация жидкости в низкопроницаемых пластах будет происходить при градиентах давления больше предельного значения q . Причем в

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-11-20022).

экспериментальных работах [3, 4] наблюдалось увеличение значения q при уменьшении абсолютной проницаемости пласта.

В работах [5, 6] предложена теоретическая модель применительно к наблюдаемым в опытах [7] зависимостям скорости фильтрации от градиента давления.

Обширное число работ [8–11] посвящено гидродинамическим методам исследования скважины при переходных режимах ее работы. В частности, проводились опыты с переменным дебитом скважины или депрессией на пласт. Такие опыты являются основой для определения фильтрационных свойств пластов. Представляется, что анализ кривых восстановления давления и перераспределения дебита также может позволить выявить отклонения закона фильтрации от линейного в низкопроницаемых пластах, а также судить о продуктивности скважины.

Решения модельных задач плоскорадиального фильтрационного потока упругой жидкости в скважине при переходных режимах ее работы, в рамках закона Дарси, были получены ранее в [10]. В данной статье рассматривается задача о перераспределении дебита скважины согласно предложенному в вышеотмеченных работах нелинейному закону фильтрации.

1. Модель нелинейной фильтрации с предельным градиентом давления

Как отмечено, в работах [5, 6] предложен обобщенный закон Дарси с учетом нелинейных эффектов фильтрации в виде

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \eta, \quad (1)$$

где η – безразмерный коэффициент, учитывающий фактор нелинейности:

$$\eta = 1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right)^\gamma \quad \text{при} \quad \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \geq q, \quad (2)$$

$$\eta = 0 \quad \text{при} \quad \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| < q.$$

Здесь q – предельный градиент давления, при достижении которого начинается движение жидкости, γ – показатель степени, определяющий темп выхода закона фильтрации к линейному закону Дарси с ростом величины градиента давления. Наиболее интересными для γ представляют значения $\gamma=1/2$, $\gamma=1$ и $\gamma=2$, характеризующие низкий и высокий темпы выхода к линейному закону фильтрации.

Сжимаемость флюида в процессе фильтрации будем учитывать в линейном приближении, и тогда для зависимости плотности от давления будем иметь

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(p - p_0)). \quad (3)$$

Из уравнения неразрывности, записанного в пористой среде, с учетом предложенного нелинейного закона фильтрации и уравнения состояния (3) имеем основные уравнения для упругого режима фильтрации линейно-сжимаемой жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \left(1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right)^\gamma \right) \right) \quad \text{при} \quad \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \geq q, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= 0 \quad \text{при} \quad \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| < q, \quad \left(\chi = \frac{k}{m\mu\alpha} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь α – коэффициент сжимаемости жидкости, k – коэффициент проницаемости, m – пористость скелета, χ – коэффициент пьезопроводности.

При теоретическом описании фильтрационных течений уравнением вида (4) в области фильтрации возникает неизвестная граница $r = R(t)$, разделяющая зоны течения и покоя (где $u = 0$). Причем на этой границе $r = R(t)$ помимо непрерывности давления должно выполняться второе условие:

$$\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| = q. \quad (5)$$

Отметим, что при (3) автоматически также выполняется условие, следующее из закона сохранения масс.

2. Влияние величины депрессии на нефтеотдачу пластов с учетом нелинейных эффектов фильтрации

Рассмотрим задачу нестационарной фильтрации, описывающую приток жидкости к скважине в низкопроницаемых пластах при переменных перепадах давления. Допустим, что пористая среда однородна, ее фильтрационные характеристики проницаемость и пористость одинаковы во всех областях. Предполагается, что жидкость поступает к скважине радиусом r_c , расположенной в центре пласта радиусом R_0 , по предложенному нелинейному закону фильтрации (1). Первоначально ($t < 0$) давление в пласте и на забое скважины всюду постоянно и равно p_0 . Тогда начальные условия в пласте запишутся в виде

$$t = 0, r_c < r < R_0 : p = p_0. \quad (6)$$

Пусть в момент времени $t = 0$ давление на забое скважины понижается до p_e и создается перепад давления $\Delta p_0 = p_0 - p_e$. В дальнейшем, в момент времени $t = t_1$ в течение промежутка t_* перепад давления изменяется от значения Δp_0 до Δp_1 . Тогда для закона изменения перепада давления можем записать

$$\Delta p = \begin{cases} \Delta p_0, & \text{при } 0 < t < t_1, \\ \Delta p_0 + \frac{(\Delta p_1 - \Delta p_0)(t - t_1)}{t_*}, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_1 + t_*, \\ \Delta p_1, & \text{при } t > t_1 + t_*. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда граничное условие на скважине запишется как

$$t > 0, r = r_c : p = p_0 - \Delta p. \quad (8)$$

Граничное условие на контуре питания примем в виде

$$t > 0, r = R_0 : p = p_0. \quad (9)$$

Объемный расход жидкости, в соответствии с принятым нелинейным законом фильтрации, определяется из выражения

$$Q = 2\pi r_c h_c \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_c} \left(1 - \left(q \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=r_c} \right)^\gamma \right), \quad (10)$$

где h_c – протяженность открытого участка скважины.

Для получения численного решения по модели с предельным градиентом, используется регуляризация постановки задачи, согласно которой принято, что при низких градиентах давления ($|\partial p / \partial r| < q$) закон фильтрации имеет линейный вид

$$u = -\frac{\varepsilon k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \tag{11}$$

с низким значением коэффициента проницаемости εk , где ε – малый безразмерный параметр ($\varepsilon \ll 1$). При некотором значении градиента давления $(\partial p / \partial r)_*$ из условия неразрывности, величины скорости фильтрации согласно нелинейному (1) и линейному (11) законам должны быть равны. Из такого «сращивания» получим условие для «сшивки» решений

$$\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_* \left(1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|_* \right)^\gamma \right) = \frac{\varepsilon k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_*, \quad r = \tilde{R}(t), \tag{12}$$

где $\tilde{R}(t)$ граница «сшивки».

На рис. 1 схематично представлены зависимости скорости фильтрации от градиента давления при выполнении закона Дарси (сплошные линии) и закона фильтрации с предельным градиентом q (пунктирная линия). Точечная линия соответствует нелинейному закону в рамках принятой регуляризации.

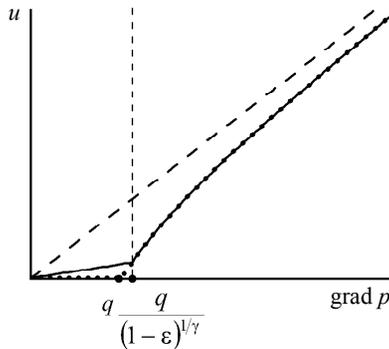


Рис. 1. Зависимость скорости фильтрации от градиента давления

Согласно принятой регуляризации, при описании процесса фильтрации в пласте необходимо ввести подвижную границу $r = \tilde{R}$, разделяющую всю область фильтрации на две зоны. Для градиента давления на этой границе из (12) следует условие

$$\left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|_* = \frac{q}{(1-\varepsilon)^{1/\gamma}}, \quad r = \tilde{R}. \tag{13}$$

Тогда для закона фильтрации в ближней и дальней зонах можем записать

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \left(1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right)^\gamma \right) \quad \text{при } r_c \leq r \leq \tilde{R}, \quad |\partial p / \partial r| \geq q / (1-\varepsilon)^{1/\gamma}, \tag{14}$$

$$u = -\varepsilon \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad \text{при } \tilde{R} \leq r \leq R_0, \quad |\partial p / \partial r| < q / (1-\varepsilon)^{1/\gamma}.$$

Принимая регуляризованный закон фильтрации в виде (14), основное уравнение для упругого режима фильтрации (3) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{\chi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \left(1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right)^\gamma \right) \right) \text{ при } r_c \leq r \leq \tilde{R}, \quad |\partial p / \partial r| \geq q / (1 - \varepsilon)^{1/\gamma}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{\varepsilon \chi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \text{ при } \tilde{R} \leq r \leq R_0, \quad |\partial p / \partial r| < q / (1 - \varepsilon)^{1/\gamma}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для численного решения основного уравнения фильтрации (15), с граничными условиями (6) – (9), используется метод конечных разностей, заключающийся в замене производных в уравнениях (6) – (9) и (15) их конечно-разностными аппроксимациями. При решении использовалась явная схема. Для обеспечения устойчивости метода расчетный шаг по времени Δt удовлетворяет условию

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2\chi},$$

где Δx – шаг сетки по пространственной координате.

Для параметров, определяющих физические свойства пласта и жидкости, приняты следующие величины: $m = 0.1$; $k = 10^{-15} \text{ м}^2$; $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $C = 10^3 \text{ м/с}$. Для геометрических параметров скважины, пласта и параметра, отвечающего за регуляризацию задачи, приняты следующие величины: $h_c = 100 \text{ м}$, $r_c = 10^{-1} \text{ м}$, $R_0 = 100 \text{ м}$, $\varepsilon = 10^{-1}$. Для исходного пластового давления принято значение $p_0 = 20 \text{ МПа}$.

На рис. 2 иллюстрируется влияние значения предельного градиента давления q (рис. 2, б) и показателя степени γ (рис. 2, в) на динамику расхода для режима работы добывающей скважины согласно рис. 2, а. Числа на линиях соответствуют значениям предельного градиента давления q в МПа/м. Предполагается, что перепад давления $\Delta p_0 = 10 \text{ МПа}$ с момента времени $t_1 = 2 \text{ сут}$ повышается до значения $\Delta p_1 = 15 \text{ МПа}$ за период $t_* = 1 \text{ сут}$. Здесь и в дальнейшем сплошные линии соответствуют линейному закону Дарси ($q = 0$), пунктирные, штрихпунктирные и точечные линии соответствуют значениям $\gamma = 1/2$, 1 и 2 для $q = 0.1 \text{ МПа/м}$.

Проанализируем динамику дебита скважины при изменении забойного давления на примере, представленном на рис. 2, б. Данный процесс условно можно разделить на три этапа. На первом этапе ($t < t_1$) работы скважины при $\Delta p_0 = 10 \text{ МПа}$ происходит снижение объемного дебита скважины. На втором этапе ($t_1 \leq t \leq t_1 + t_*$), при повышении перепада давления в течение 1 сут от значения перепада давления $\Delta p_0 = 10 \text{ МПа}$ до $\Delta p_1 = 15 \text{ МПа}$, наблюдается резкое повышение объемного дебита. Так, для $q = 0.1 \text{ МПа/м}$ за $t_* = 1 \text{ сут}$ дебит возрастает от значения $Q = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ до $Q = 8.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. На третьем этапе ($t > t_1 + t_*$) работы скважины, при $\Delta p_0 = 15 \text{ МПа}$, происходит снижение объемного дебита скважины, аналогично первому этапу.

Из рис. 2, б видно, что при фильтрации жидкости, когда проявляются эффекты предельного градиента давления, наблюдается более интенсивное снижение деби-

та скважины по сравнению со случаем, когда выполняется закон Дарси ($q = 0$). Причем с ростом величины предельного градиента давления q наблюдается более сильное снижение темпа дебита. Так, из третьего этапа видно, что после смены режима функционирования скважины в промежутке времени с 3 до 10 сут для $q = 0.1$ МПа/м и $\gamma = 2$ объемный дебит понижается в 1.4 раза (от значения $Q = 8.5 \cdot 10^{-4}$ до $Q = 6 \cdot 10^{-4}$ м³/с), а для случая линейного закона Дарси в 1.1 раза (от значения $Q = 1 \cdot 10^{-3}$ до $Q \approx 8.5 \cdot 10^{-4}$ м³/с) и в дальнейшем слабо меняется.

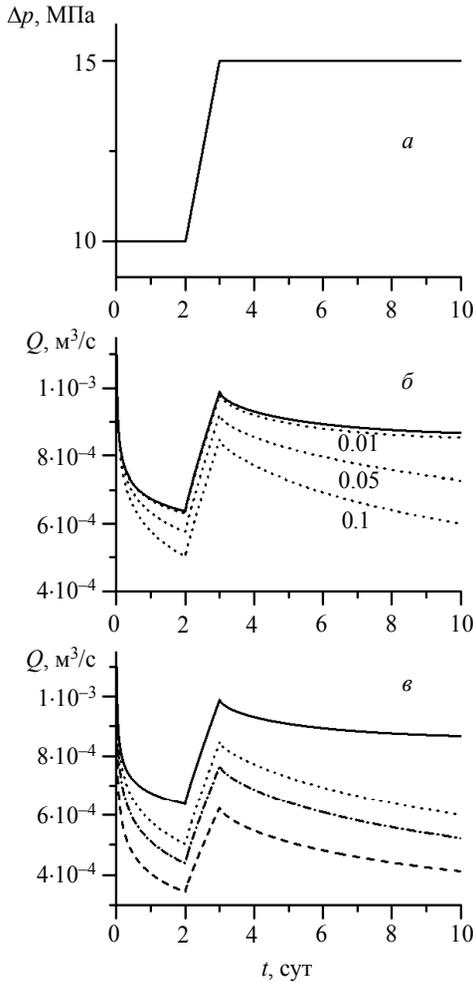


Рис. 2. Влияние значения предельного градиента давления q (б) и показателя степени γ (в) на процесс эволюции объемного дебита при повышении перепада давления Δp (а)

Из рис. 2, в также следует, что при уменьшении величины показателя степени γ происходит дополнительное снижение дебита скважины. Понижение забойного давления приводит к увеличению дебита. Например, для $\gamma = 2$ после 2 сут

функционирования скважины при $\Delta p_0 = 10$ МПа дебит достигает значения $Q = 5 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а при $\Delta p_0 = 15$ МПа дебит повышается до $Q = 7.5 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

На рис. 3 показано влияние значения предельного градиента давления q (рис. 3, б) и показателя степени γ (рис. 3, в) на перераспределение расхода при изменении режима работы добывающей скважины согласно рис. 3, а. Числа на линиях соответствуют значениям предельного градиента давления q в МПа/м. Предполагается, что перепад давления $\Delta p_0 = 10$ МПа снижается до значения $\Delta p_1 = 5$ МПа с момента времени $t_1 = 2$ сут за период $t_* = 1$ сут.

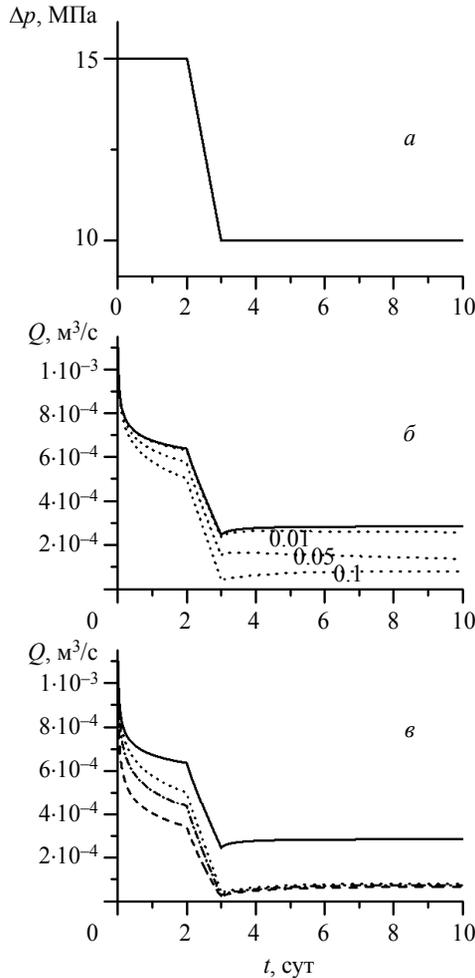


Рис. 3. Влияние значения предельного градиента давления q (б) и показателя степени γ (в) на процесс эволюции объемного дебита при понижении перепада давления Δp (а)

Отметим, что увеличение значения предельного градиента давления q приводит к снижению нефтеотдачи пласта. Так, для 10 сут функционирования скважины при увеличении предельного градиента давления в пять раз (от значения

$q = 0.01$ до 0.05 МПа/м) объемный дебит скважины понижается в два раза (от значения $Q = 2.6 \cdot 10^{-4}$ до $1.3 \cdot 10^{-4}$ м³/с).

Из рис. 3, в видно, что при работе скважины с перепадом давления $\Delta p_1 = 5$ МПа увеличение показателя степени γ также приводит к повышению притока нефти в скважину. Так, для $\gamma = 2$ МПа/м после 2 сут эксплуатации скважины при $\Delta p_0 = 10$ МПа дебит достигает значения $Q = 5 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а при $\Delta p_0 = 5$ МПа дебит понижается до $Q = 10^{-4}$ м³/с. Причем эта величина для всех принятых значений γ , на поздних этапах эксплуатации скважины, остается почти постоянной и равной $Q \approx 10^{-4}$ м³/с.

Необходимо отметить, что смена режима функционирования скважины влияет на характер перераспределения дебита. Так, при переходе скважины на режим работы с меньшим перепадом давления, на третьем этапе ее функционирования, наблюдается слабое повышение дебита. Например, для $\gamma = 2$ при переходе на режим с меньшим перепадом давления (рис. 3, в) с 3 до 4 сут происходит слабое повышение дебита от значения $Q \approx 0.5 \cdot 10^{-4}$ до $0.8 \cdot 10^{-4}$ м³/с. При снижении перепада давления, в призабойной области пласта на третьем этапе с течением времени наблюдается слабое увеличение градиентов давления. Так, из рис. 6, в видно, что для $\gamma = 2$ на расстоянии 1 м от забоя скважины для 3.5 сут градиент давления составляет 0.3 МПа/м, а для 4.5 сут повышается до 0.4 МПа/м, в результате чего происходит слабое повышение дебита скважины.

Таким образом, результаты численных расчетов свидетельствуют о существовании влияния нелинейных эффектов фильтрации на дебит скважины. Следовательно, по результатам гидродинамических исследований скважины возможно выявлять проявление предельного градиента давления и количественно и качественно оценить его влияние на процесс фильтрации.

На рис. 4 представлено влияние продолжительности закрытия скважины на процесс перераспределения дебита при $q = 0.1$ МПа/м и $\gamma = 2$. Предполагается, что перепад давления $\Delta p_0 = 10$ МПа повышается до значения $\Delta p_1 = 15$ МПа (рис. 4, а) и снижается до значения $\Delta p_1 = 5$ МПа (рис. 4, б) в момент времени $t_1 = 2$ сут. Числа на линиях соответствуют моментам времени t_* . Видно, что чем протяженнее время t_* , за которое происходит смена режима работы скважины, тем значительнее происходит снижение дебита. Так, на рис. 4, а в случае $t_* = 1$ сут к третьему этапу дебит достигает значения $Q \approx 8.5 \cdot 10^{-4}$ м³/с, в случае $t_* = 3$ сут значения $Q \approx 7.5 \cdot 10^{-4}$ м³/с. В дальнейшем к 10 суткам для различных значений t_* дебит приобретает постоянное значение равное $Q \approx 6 \cdot 10^{-4}$ м³/с. На рис. 4, б в случае $t_* = 1$ сут к третьему этапу дебит достигает значения $Q \approx 0.5 \cdot 10^{-4}$ м³/с, в случае $t_* = 3$ сут значения $Q \approx 0.2 \cdot 10^{-4}$ м³/с. В дальнейшем к 10 суткам дебит приобретает постоянное значение равное $Q \approx 1 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

На рис. 5 в логарифмических координатах иллюстрируется влияние проницаемости на дебит скважины для $\gamma = 2$ и $q = 0.1$ при повышении перепада давления. Числа на линиях соответствуют значениям проницаемости пласта.

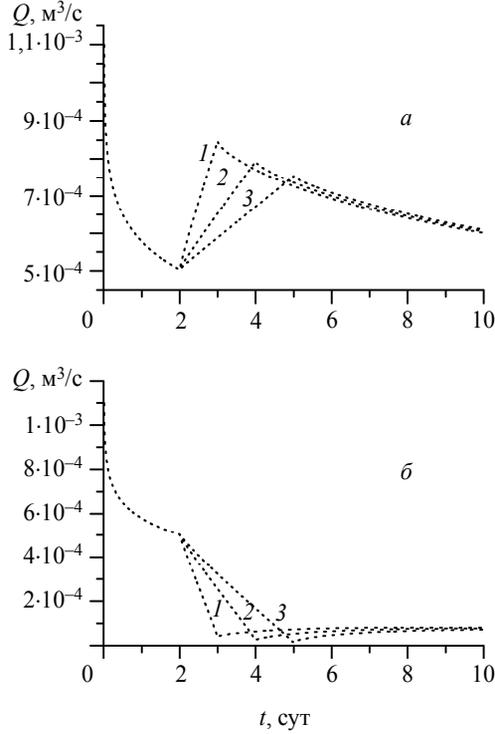


Рис. 4. Влияние продолжительности закрытия скважины на процесс перераспределения дебита при повышении перепада давления (а) и понижении перепада давления (б)

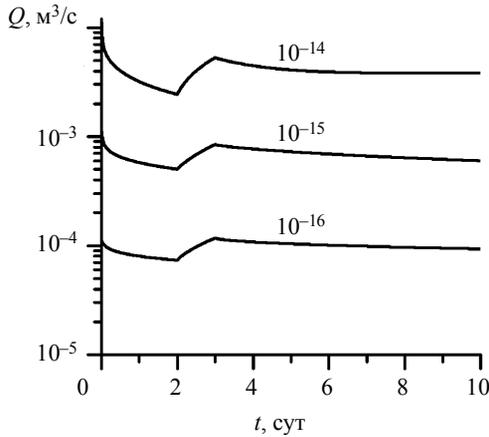


Рис. 5. Влияние проницаемости на дебит скважины

На рис. 6 представлены профили давления в пласте при переходе скважины на режим работы с пониженным забойным давлением для $q = 0.1$ МПа/м и $\gamma = 2$. Числа на линиях соответствуют моментам времени в сутках. Из увеличенных фрагментов рисунка видно, что для первого этапа функционирования скважины с

течением времени происходит снижение градиентов давления во всей области пласта. Отметим, что после понижения перепада давления на втором и третьем этапах в призабойной области пласта со временем происходит незначительное повышение градиентов давления. В дальнейшей области пласта с течением времени происходит снижение градиентов давления.

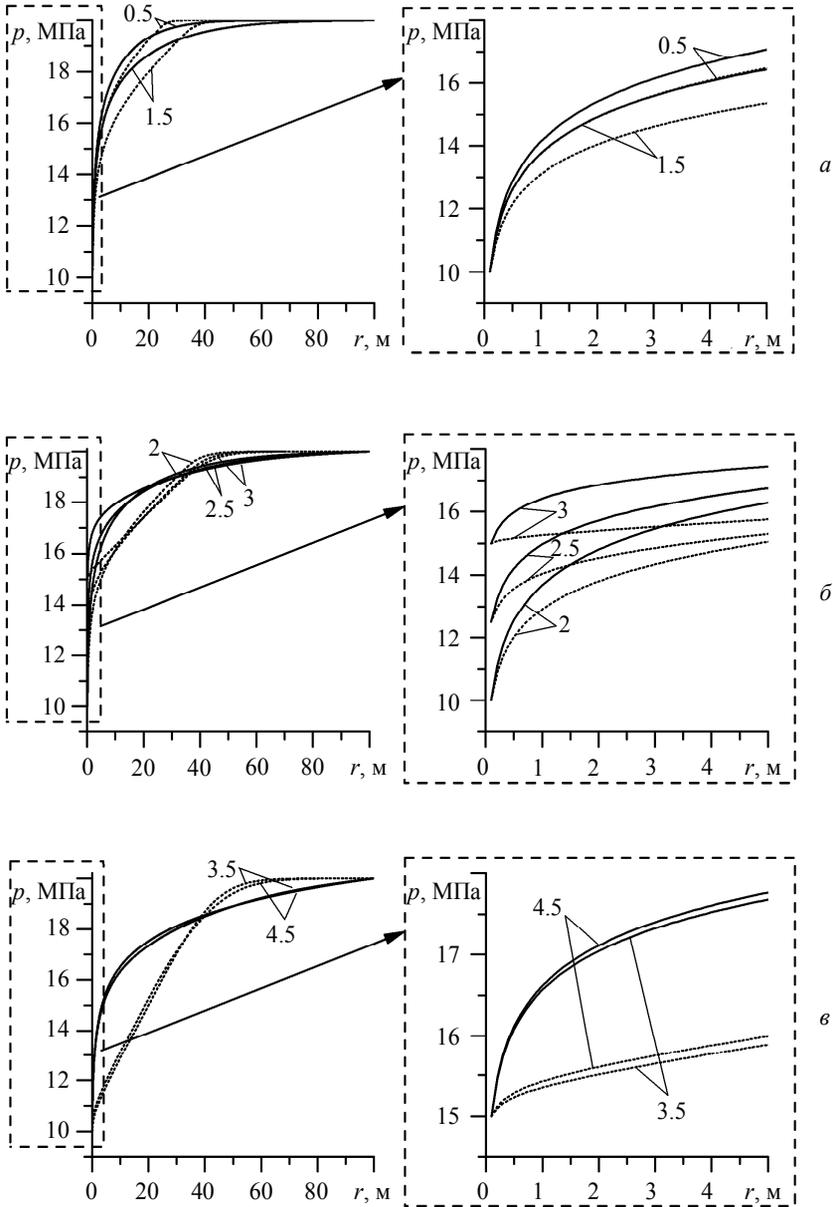


Рис. 6. Влияние показателя степени γ на профили распределения давления в пласте при режимах работы скважины с переменным забойным давлением: 10 МПа (а), при понижении от 10 до 5 МПа (б), 5 МПа (в)

Заключение

С учетом нелинейного закона фильтрации в низкопроницаемых пластах, численно решена задача о перераспределении объемного дебита скважины для переменного значения устьевого давления.

Установлено, что по индикаторным кривым перераспределения дебита скважины при переходных режимах ее работы (изменении забойного давления) возможно выявлять нелинейные эффекты фильтрации и качественно увидеть проявление предельного градиента давления q .

Из-за проявления нелинейных эффектов фильтрации наблюдается снижение темпов отбора жидкости из скважины по сравнению со случаем линейного закона Дарси. Установлено, что повышение нефтеотдачи пластов происходит с уменьшением значения предельного градиента давления q и с увеличением показателя степени γ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В., Макатров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г., Якасов А.В. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований керн Приобского месторождения // Вестник ОАО НК «Роснефть». 2013. Вып. 31. № 2. С. 8–12.
2. Xu J., Jiang R., Xie L., Yang M., Wang G., Liu J. Transient pressure behavior for dual porosity low permeability reservoir based on modified Darcy's equation // SPE 153480. 2012. P. 1–10.
3. Коробов К.Я., Антилин Ю.В. О нарушениях линейного закона фильтрации при низких градиентах давления // Нефтяное хозяйство. 1968. № 8. С. 26–28.
4. Байков В.А., Колонских А.В., Макатров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керн Приобского месторождения // Вестник ОАОНК «Роснефть». 2013. Вып. 31. № 2. С. 4–7.
5. Белова О.В., Шагапов В.Ш. Метод последовательной смены стационарных состояний для плоскоодномерной задачи фильтрации с предельным градиентом давления // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. Механика. 2014. №7. С. 76–86.
6. Шагапов В.Ш., Белова О.В., Давлетбаев А.Я. Особенности фильтрации в низкопроницаемых коллекторах с проявлением предельного градиента // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 6. С. 1269–1281.
7. Shagapov V.Sh., Belova O.V., Davletbaev A.Ya. Features of filtration in low-permeability traps with a limiting gradient // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2014. V. 87. No. 6, November. P. 1322–1334.
8. Байков В.А., Колонских А.В., Макатров А.К. Фильтрация в сверхнизкопроницаемых коллекторах // Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений: Материалы V науч.-практич. конф. ООО «РН-Уфа НИПИнефть». Уфа, 2012.
9. Мирзаджанзаде А.Х. Технология и техника добычи нефти. М.: Недра, 1986. 382 с.
10. Гиматудинов Ш.К. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1988. 312 с.
11. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. М.: Наука, 1998. 304 с.
12. Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986. 303 с.

Статья поступила 15.11.2015 г.

Shagapov V.Sh., Dudareva O.V. MANIFESTATION OF NONLINEAR FILTRATION EFFECTS IN LOW PERMEABILITY RESERVOIRS AT VARIABLE MODES OF WELL FUNCTIONING

DOI 10.17223/19988621/39/11

According to the earlier theoretical model of filtration with a limiting gradient of pressure, indicator dependencies under variable modes of well-functioning are studied. On the basis of numerical simulation of the well operation, the possibility of revealing non-linear effects of the filtration law under the reservoir conditions is analyzed. For example, considering the curves of well production redistribution during transient conditions of the well operation, one can identify possible non-linear effects of filtration and see the manifestation of the limiting pressure gradient q . The presence of the limiting pressure gradient significantly affects the nature of the filtering process. The manifestation of the limiting pressure gradient q can be seen by the intensity of the well production rate decrease with time. When the filtration occurs by the linear law, the intensity of the flow rate decrease is insignificant and, to a due time, takes a constant value.

Due to the manifestation of nonlinear filtering effects, a decrease in the fluid production rate of the well is observed as compared to the case of the linear Darcy law. It is found that the enhanced oil recovery occurs with a decrease in the limiting pressure gradient q and with an increase in the power exponent.

Keywords: nonlinear filtration, ultralow permeability, limiting gradient of pressure, oil recovery of layers, finite difference method.

SHAGAPOV Vladislav Shaihulagzamovich (Academician of Academy of Sciences of RB, Doctor of Physics and Mathematics, Birsky branch «Bashkir State University», Birsk, Russian Federation; Researcher Institute of Mechanics and Engineering, Kazan, Russian Federation; Researcher Institute of Mechanics, Kazan, Russian Federation).

E-mail: Shagapov@rambler.ru

DUDAREVA Olga Vladimirovna (Postgraduate, Birsky branch «Bashkir State University», Birsk, Russian Federation)

E-mail: BelovaOlgaV@mail.ru.

REFERENCES

1. Baykov V.A., Galeev R.R., Kolonskikh A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telin A.G., Yakasov A.V. Nelineynaya fil'tratsiya v nizkopronitsaemykh kollektorakh. Analiz i interpretatsiya rezul'tatov laboratornykh issledovaniy kerna Priobskogo mestorozhdeniya. *Vestnik OAO NK «Rosneft'»*, 2013, no. 31, no. 2, pp. 8–12. (in Russian)
2. Xu J., Jiang R., Xie L., Yang M., Wang G., Liu J. Transient pressure behavior for dual porosity low permeability reservoir based on modified Darcy's equation. *SPE 153480*, 2012, pp. 1–10.
3. Korobov K.Ya., Antilin Yu.V. O narusheniyakh lineynogo zakona fil'tratsii pri nizkikh gradientakh davleniya. *Neftyanoe khozyaystvo*, 1968, no. 8, pp. 26–28. (in Russian)
4. Baykov V.A., Kolonskikh A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telin A.G. Nelineynaya fil'tratsiya v nizkopronitsaemykh kollektorakh. Laboratornye fil'tratsionnye issledovaniya kerna Priobskogo mestorozhdeniya. *Vestnik OAO NK «Rosneft'»*, 2013, vol. 31, no. 2, pp. 4–7. (in Russian)
5. Belova O.V., Shagapov V.Sh. Metod posledovatel'noy smeny statsionarnykh sostoyaniy dlya ploskoodnomernoy zadachi fil'tratsii s predel'nym gradientom davleniya. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya. Mekhanika*, 2014, no. 7, pp. 76–86. (in Russian)
6. Shagapov V.Sh., Belova O.V., Davletbaev A.Ya. Osobennosti fil'tratsii v nizkopronitsaemykh kollektorakh s proyavleniem predel'nogo gradienta. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1269–1281. (in Russian)

7. Shagapov V.Sh., Belova O.V., Davletbaev A.Ya. Features of filtration in low-permeability traps with a limiting gradient. *J. Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, November, pp. 1322–1334.
8. Baykov V.A., Kolonskikh A.V., Makatrov A.K. Fil'tratsiya v sverkhnikopronitsaemykh kollektorakh. *Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternye tekhnologii v protsessakh razrabotki mestorozhdeniy: Materialy V nauch.-praktich. konf. OOO «RN-UfaNIPIneft'»*. Ufa, 2012. (in Russian)
9. Mirzadzhanzade A.Kh. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefii*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 382 p. (in Russian)
10. Gimatudinov Sh.K. *Razrabotka i ekspluatatsiya nefyanykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy*. Moscow, Nedra Publ., 1988. 312 p. (in Russian)
11. Shagiev R.G. *Issledovanie skvazhin po KVD*. Moscow, Nauka Publ., 1998. 304 p. (in Russian)
12. Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidravlika*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 303 p. (in Russian)