

Рассматриваемая модель реализована в программном продукте WELLSIM, правильность программной реализации алгоритмов которой проверена аналитическими решениями однофазной и многофазной, стационарной и нестационарной фильтрации.

На основе созданной модели околоскважинной зоны пласта стало возможным решение следующих прикладных задач: приток флюидов к скважинам сложной траектории; приток к многозабойным скважинам и вторым стволам; приток к трещине гидроразрыва; приток к перфорационным каналам; приток при детальном учете неоднородности пласта и прискважинной области; проверка результатов интерпретации гидродинамических исследований скважин.

Получено 08.07.03

УДК 622.276

А.А. Щипанов

ПермНИПИнефть

МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ

Представлена модель двойной пористости/проницаемости, которая позволяет моделировать высокоскоростную фильтрацию по системе трещин и учитывает динамическую деформацию трещинно-порового коллектора, возникающую при изменении пластового давления. Классическая модель единичной пористости сопоставлена с моделью двойной пористости/проницаемости. С помощью математического моделирования определены некоторые особенности фильтрации в трещиновато-пористой среде и влияние обмена между матрицей и трещинами на скорость фильтрации.

В работе рассматривается модель двухфазной фильтрации в среде с двумя видами пустотности, которая известна также как модель двойной пористости/проницаемости [1–3]. Базовой для данной модели является модель фильтрации в среде с одним видом пустотности (единичной пористости), широко известная как модель фильтрации в пористой среде [4].

Уравнения течения однородной жидкости в трещиновато-пористой среде с двумя видами пустотности были сформулированы Г.Н. Баренблаттом и др. [5] исходя из континуального подхода (условия непрерывности). По Баренблатту, обе среды – система трещин и блоки пористой матрицы – рассматриваются как две сплошные среды, вложенные одна в другую, причем параметры движения жидкости и среды определяются в каждой математической точке. Уравнения движения и сохранения массы записываются независимо для каждой среды. Переток жидкости из одной среды в другую учитывается введением функции источника-стока в уравнениях сохранения массы. Подход Г.Н. Баренблатта был распространен на случай многофазной фильтрации Х. Каземи [2].

Математическая модель

Процесс двухфазной фильтрации сжимаемой жидкости в деформируемом коллекторе с двумя видами пустотности описывается системой уравнений (различные подходы к моделированию фильтрации в трещиновато-пористой среде описаны в работе [1]):

$$\nabla[\lambda_i^1(\nabla p_i^1 - \gamma_i^1 \nabla h)] + \lambda_i^{1,2} \Theta (p_i^2 - p_i^1) = \frac{\partial}{\partial t} \left[m^1 \frac{S_i^1}{B_i^1} \right] + f_i^1, \quad (1)$$

$$P_c^1 = p_o^1 - p_w^1 = f(S_w^1), \quad (2)$$

$$S_o^1 + S_w^1 = 1. \quad (3)$$

$$\nabla[\lambda_i^2(\nabla p_i^2 - \gamma_i^2 \nabla h)] + \lambda_i^{2,1} \Theta (p_i^1 - p_i^2) = \frac{\partial}{\partial t} \left[m^2 \frac{S_i^2}{B_i^2} \right] + f_i^2, \quad (4)$$

$$P_c^2 = p_o^2 - p_w^2 = f(S_w^2), \quad (5)$$

$$S_o^2 + S_w^2 = 1. \quad (6)$$

Верхний индекс 1 относится к блокам матрицы, 2 – к системе трещин; нижний индекс i соответствует o - и w -нефтяной и водной фазам.

Искомые величины (для простоты будем опускать верхние индексы): $p_i(X, t)$ – давление в фазе; $S_i(X, t)$ – насыщенность порового объема фазой, где вектор пространственных координат в трехмерном случае $X = (x, y, z)$.

Параметры: $\lambda_i = k(F_i, \mu, B_i)$, $\gamma_i = -\rho_i g / B_i$, где $k(X, p)$ – абсолютная проницаемость коллектора; $F_i(S_i)$ – относительная фазовая проницаемость; $\mu_i(p_i)$ – динамическая вязкость; $B_i(p_i)$ – объемный коэффициент; ρ_i – плотность в поверхностных условиях; g – гравитационное ускорение; $h(X)$ – глубина залегания пласта; $m(X, p)$ – пористость; $f_i(X, t)$ – приток (отток) фазы в поверхностных условиях; $P_c(S_w)$ – капиллярное давление; $p(p_i, S_i)$ – среднее, взвешенное по насыщенности давление;

$$\lambda_i^{1,2} = \lambda_i^{2,1} = k^{1,2} \left(\frac{F_i}{\mu, B_i} \right)^{1,2}, \quad (7)$$

$$\Theta = 4 \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

где индекс ^{1,2} означает осреднение по двум средам; Θ – параметр, характеризующий геометрию среды; l_x, l_y, l_z – размеры блоков матрицы в трех направлениях. Идеализированная модель трещинно-порового коллектора приведена на рис. 1.

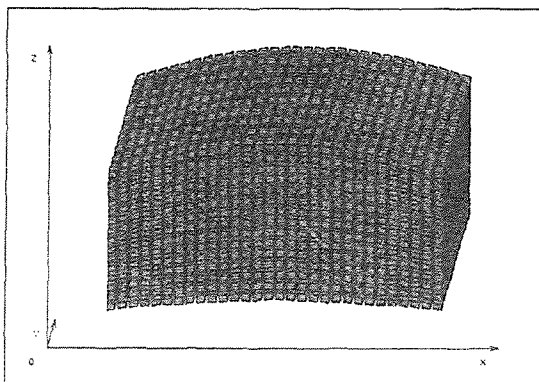


Рис. 1. Трещинно-поровый коллектор
в идеализированном представлении модели двойной
пористости

Если считать, что перегородки между блоками матрицы отсутствуют ($\lambda_j = 0$), а крупномасштабная (превышающая размеры блока матрицы) фильтрация происходит только по системе трещин, то модель двойной пористости/проницаемости сводится к модели двойной пористости единичной проницаемости (модели двойной пористости).

Обмен между системой трещин и блоками матрицы в данной модели происходит под действием упругих и капиллярных сил.

После ряда преобразований система уравнений (1)–(6) приводится в одномерном приближении к системе:

$$\begin{aligned}
 & B_o^j \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^j \sigma_o^j \frac{\partial p_o^j}{\partial x} \right) + B_w^j \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^j \sigma_w^j \frac{\partial p_o^j}{\partial x} \right) + \theta \left(B_o^j \kappa^j \sigma_o^{j,k} + B_w^j \kappa^j \sigma_w^{j,k} \right) (p_o^k - p_o^j) = \\
 & = z^j \frac{\partial p_o^j}{\partial t} + \tilde{f}^j + B_o^j \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^j \sigma_o^j \gamma_o^j \frac{\partial z}{\partial x} \right) + B_w^j \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^j \sigma_w^j \left[\frac{\partial p_c^j}{\partial x} + \gamma_w^j \frac{\partial z}{\partial x} \right] \right) + \\
 & \quad + B_w^j \kappa^j \sigma_w^{j,k} \theta (p_c^k - p_c^j), \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^j \sigma_o^j \left[\frac{\partial p_o^j}{\partial x} - \gamma_o^j \frac{\partial z}{\partial x} \right] \right) + \kappa^j \sigma_o^{j,k} \theta (p_o^k - p_o^j) = \frac{\partial}{\partial t} (\eta_o^j S_o^j) + f_o^j, \quad (10)$$

$$S_o^j + S_w^j = 1, \quad (11)$$

здесь при $j=1, k=2$ – система уравнений для матрицы, при $j=2, k=1$ – система уравнений для трещин;

$$\kappa = Ak, \quad (12)$$

$$\sigma_i = \frac{F_i}{\mu_i B_i}, \quad (13)$$

$$\chi = A \left(\frac{\partial m}{\partial p} - \sum_i \frac{m S_i}{B_i} \frac{\partial B_i}{\partial p_i} \right), \quad (14)$$

$$\eta_i = A m B_i, \quad (15)$$

$$\tilde{f} = \sum_i B_i f_i. \quad (16)$$

Такие параметры, как нефтенасыщенная мощность $A(x)$ и глубина залегания пласта (координата z), одинаковы для обеих сред. Зависящие от давления величины аппроксимируются экспоненциальными зависимостями, относительные фазовые проницаемости и капиллярное давление – степенными зависимостями.

Одномерное приближение приемлемо при моделировании фильтрации в некоторой части коллектора с заданными условиями на границах, а также при моделировании фильтрации в пласте, разрабатываемом с использованием многорядных линейных или круговых систем разработки, где реальное течение между рядами можно аппроксимировать квазиодномерным [6].

Для численного решения системы уравнений (1)–(6) используется неявный по давлению, явный по насыщенности метод (IMPES). Линеаризованные разностные уравнения для давления решаются методом прогонки [7], по нелинейности производятся итерации с линейной экстраполяцией зависящих от давления параметров. Осреднение параметров по пространству производится с учетом физики фильтрационных процессов. Среднее значение проводимости (12), определяемой свойствами коллектора, вычисляется как среднее гармоническое значение, подвижности (13) определяются «вверх по потоку» [4].

Сравнение моделей единичной и двойной пористости/проницаемости

Задачи исследования состояли в сравнении двух моделей и определении степени влияния на фильтрацию механизмов, реализованных в модели двойной пористости/проницаемости. Исходя из целей исследований, рассматривался процесс вытеснения нефти водой от ряда нагнетательных к ряду добывающих скважин, обусловленный заданным перепадом давления на границах (рядах скважин). Были проведены четыре расчета, отличающиеся следующим: (0) – расчет с использованием модели единичной пористости, которая является частным случаем модели двойной пористости; (1)–(3) – расчеты с использованием модели двойной пористости/проницаемости, в варианте (1) отсутствует обмен между матрицей и трещинами, (2) – обмен между матрицей и трещинами обусловлен только упругими силами, (3) – обмен обусловлен упругими и капиллярными силами. В расчетах использовались свойства коллектора и флюидов, характерные для башкиро-серлуховской залежи Сибирского месторождения Пермской области. Критерием соответствия моделей процессов фильтрации (0)–(3) являлась величина извлекаемых запасов нефти.

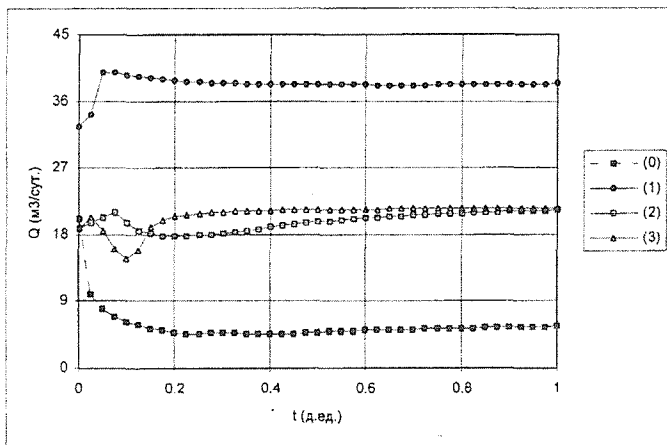


Рис. 2. Добыча жидкости Q , рассчитанная на моделях единичной (0) и двойной (1)–(3) пористости/проницаемости

Результаты расчетов приведены на рис. 2, 3. Анализ кривых добычи жидкости (рис. 2) свидетельствует о том, что скорость фильтрации в модели двойной пористости/проницаемости намного выше. Это связано с тем, что данная модель позволяет моделировать высокоскоростную фильтрацию по системе трещин. Отмечаем быстрое обводнение продукции (рис. 3) в вариантах (1)–(3).

Суммарная скорость фильтрации в отсутствии обмена флюидами между вложенными средами (1) значительно выше (см. рис. 1), чем в случае его присутствия (2)–(3). Этот факт свидетельствует о том, что обменные процессы значительно замедляют фильтрацию по системе трещин. Степень влияния упругих и капиллярных сил на обмен различна, при этом варианты (2)–(3) отличаются незначительно по добыче (см. рис. 2) и значительно по обводненности (см. рис. 3).

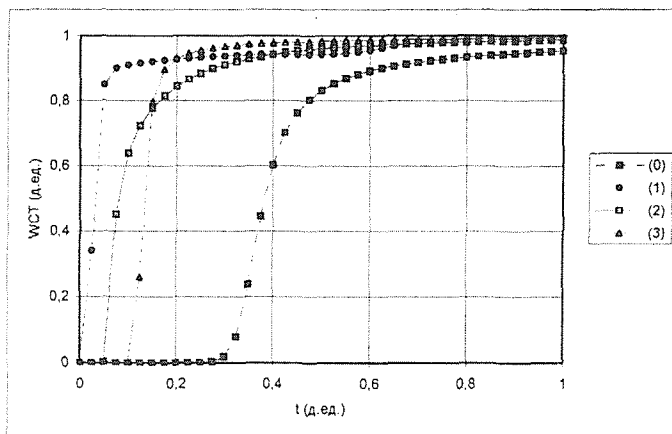


Рис. 3. Обводненность добываемой продукции WCT, рассчитанная на моделях единичной (0) и двойной (1)–(3) пористости/проницаемости

Проведенные исследования дают основание выделить следующие аспекты моделирования процессов фильтрации в трещиновато-пористом пласте с использованием рассматриваемых моделей:

1. Результаты моделирования фильтрации с использованием моделей единичной и двойной пористости/проницаемости значительно отличаются.
2. Модель двойной пористости/проницаемости позволяет моделировать быстропротекающие процессы в системе трещин.
3. Модель двойной пористости/проницаемости является более сложной в реализации и требует определения параметров трещиноватости (проницаемости трещин, геометрического параметра матрицы и др.).
4. Модель единичной пористости лишена отмеченных выше недостатков, однако моделирование быстропротекающих процессов в системе трещин затруднительно и требует разработки дополнительных подходов.

Библиографический список

1. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / Пер. с англ. Н.А. Бардиной, П.К. Голованова, В.В. Власенко, В.В. Покровского; Под ред. А.Г. Ковалева. М.: Недра, 1986. 608 с.
2. Kazemi H., Merrill L.S., Porterfeld L., Zeman P.K. Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs // SPEJ. December 1976. P. 317–326.

3. Gilman J. R. An Efficient Finite-Difference Method for Simulating Phase Segregation in the Matrix Blocks in Double-Porosity Reservoirs // SPE Reservoir Engineering, July 1986. P. 403–413.

4. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем: Пер. с англ. М.: Недра, 1982. 407 с.

5. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Прикл. матем. и механика. 1960. Т. 24, вып. 5. С. 852–864.

6. Справочная книга по добыче нефти / Под. ред. Ш.К. Гиматудинова. М.: Недра, 1974. 704 с.

7. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

Получено 25.04.03

УДК 551.735.15(470.53)

М.В. Щербакова

Пермский государственный технический университет

ЦИКЛИЧНОСТЬ ПОГРАНИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НИЖНЕГО И СРЕДНЕГО КАРБОНА БАССЕЙНА РЕКИ ВИШЕРЫ НА СЕВЕРНОМ УРАЛЕ

Рассматривается цикличность верхнесерпуховских и нижнебашкирских отложений. По выпадению циклитов и горизонтов обосновывается наличие перерыва в осадконакоплении между сюранским и акавасским горизонтами, его амплитуда и ее связь с франско-гурейским структурным планом.

В настоящей работе рассматривается положение и характер границы между нижним и средним карбоном по результатам послыдного изучения ряда разрезов бассейна среднего течения р.Вишеры, таких как «Гостинный Остров», «Акчим», «Велгур», «Волим», «Ольховка» и другие (рис. 1).

Во всех разрезах пограничные отложения нижнего и среднего карбона сложены карбонатными породами, преимущественно известняками, которые по своей природе являются скрытоциклическими. Для выявления цикличности использованы изменения структурных особенностей пород, в частности, изменение размерности частиц, составляющих породу. По этому главному признаку определялась прогрессивная или регрессивная направленность процесса осадконакопления и выявлялись прогрессивные и регрессивные элементарные (ЭЛЦ), субрегиональные (СБРГЦ) и региональные (РГЦ) циклиты с помощью структурных кривых, отражающих направленность и непрерывность изменения размеров частиц, составляющих горную породу (рис. 2).

Сочетание биостратиграфического и циклического методов дало новый биолитомстратиграфический метод определения возраста горных пород.