

УДК 519.6:531.32

М. Б. АБДРАМАНОВА

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ПАРОМ И ПАРОГАЗОМ

Численно исследуется задача неизоэтермической фильтрации с учетом фазовых переходов. Рассматривается процесс вытеснения нефти паром и парогазом. Построен вычислительный алгоритм для численного решения поставленной задачи и проведен вычислительный эксперимент для определения эффективности процесса вытеснения нефти паром и парогазом.

Многие месторождения нефти содержат высоковязкой и парафинистой нефти, такие запасы нефти являются трудноизвлекаемыми. Использование водяного пара или парогаса в качестве вытеснителя для отбора высоковязкой нефти является эффективным методом [1]. Процесс описывается общезвестной моделью фильтрации Баклея-Левретта с учетом некоторых допущений [2]. В рассматриваемом исследовании в отличие от ранее известной работы [2] используются неявные разностные схемы и для решения используется метод прогонки. Разрабатывается эффективный вычислительный алгоритм для численного решения задачи неизоэтермической фильтрации. При моделировании процесса вытеснения нефти паром или парогазом пренебрегаем диффузным процессом переноса компонентов смеси и в пористой среде считаем равными температуру и давление фаз. А также изменением компонентного состава углеводородной фазы в процессе испарения пренебрегается. В рассматриваемом процессе можно выделить четыре фазы: 0 – скелет пористой среды, 1 – газовая, 2 – водная, 3 – углеводная и три компонента (1 – неконденсируемый газ, 2 – вода, 3 – нефть).

Процесс описывается следующими уравнениями [2]:

$$m \frac{\partial(\rho_\alpha \sigma_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(F_\alpha \rho_\alpha v)}{\partial x} = -J_{l\alpha},$$

$$\alpha = 2, 3. \quad (1)$$

$$m \frac{\partial(\rho_1 c_{1k} \sigma_1)}{\partial t} + \frac{\partial(F_1 \rho_1 c_{1k} v)}{\partial x} = J_{1k},$$

$$(J_{11} = 0, k = 1, 2, 3). \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \sum_{\alpha=1}^3 c_{p\alpha} \rho_\alpha^0 \sigma_\alpha T + (1-m) \rho_0^0 c_{p0} T + (c_{12} r_{12} + c_{13} r_{13}) \rho_1^0 \sigma_1 \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{\alpha=1}^3 c_{p\alpha} \rho_\alpha^0 F_\alpha T + (c_{12} r_{12} + c_{13} r_{13}) \rho_1^0 F_1 \right) = q. \quad (3)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 \sigma_\alpha = 1, \quad \sum_{\alpha=1}^3 F_\alpha = 1, \quad \sum_{\alpha=1}^3 c_{1\alpha} = 1 \quad (4)$$

$$v = -\kappa \sum_{\alpha=1}^3 \frac{f_\alpha}{\mu_\alpha} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

$$F_\alpha = \frac{f_\alpha}{\mu_\alpha} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{f_i}{\mu_{i\alpha}} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Здесь p - давление, T - температура, σ - насыщенность, v - вектор скорости фильтрации, m - пористость, κ - абсолютная проницаемость, F_i - доля в потоке i -й фазы, c_{1k} - концентрация k -го компонента в газовой фазе, r_{1k} - теплота фазового перехода k -го компонента в газовую фазу, ρ - плотность, f - относительная фазовая проницаемость, μ - вязкость, q - тепловые потери в кровлю и подошву пласта, t - время.

Зависимости для вязкости и фазовой проницаемости задаются в виде:

$$\mu_1 = (88.2 + 0.343T) \cdot 10^{-4},$$

$$\mu_2 = 42.8 \exp(-3.1T),$$

$$\mu_3 = \frac{(1316.6 - 1.8T) \cdot 10^{-3}}{47.7T - 12085.1}, \quad (7)$$

$$f_i = (b_{1i} - b_{2i}) \left(\frac{\sigma_i - \sigma_{ir}}{1 - \sigma_{ir}} \right)^3, \quad \sigma_i > \sigma_{ir} \quad (8)$$

$$f_i = 0, \quad \sigma_i \leq \sigma_{ir}$$

$$\sigma_{1x} = 0.1, \quad \sigma_{2x} = 0.25, \quad \sigma_{3x} = 0.3,$$

$$b_{11} = 4, \quad b_{12} = 1, \quad b_{13} = 1, \quad b_{21} = 2\sigma_1,$$

$$b_{22} = 2, 4 + 16, 5\sigma_2, \quad b_{23} = 0.$$

Расчет тепловых потерь осуществляется по следующей приближенной формуле [3].

$$q = D_2 \left(\frac{\theta}{\sqrt{t}} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \sqrt{t} \theta \right),$$

$$D_2 = \frac{d}{c_{p2} \rho_2^0} \sqrt{\frac{\lambda c_{p0} l}{2\pi Q_0}}. \quad (9)$$

Задаются начальные распределения давления, насыщенности, концентрации и температуры. Для давления на входной границе задается давление нагнетания. Кровлю и подошву пласта считаем непроницаемыми, то есть отсутствуют потоки фаз через эти границы. На входной границе задаем температуру закачиваемого пара (согласованную с давлением нагнетания) и насыщенности фаз. На выходной границе считаем равным нулю теплопроводный поток.

С помощью следующих безразмерных параметров система уравнений (1)-(6) приведем к безразмерному виду.

$$R_{12} = \frac{\rho_i^0}{\rho_2^0}, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_0}, \quad J_{1k} = \frac{j_{1k} l}{\rho_2^0 v_0},$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T^0 - T_0}, \quad L_{1k} = \frac{r_{1k}}{c_{p2} (T^0 - T_0)},$$

$$G_{12} = \frac{c_{p1}}{c_{p2}}, \quad \bar{x} = \frac{x}{l}, \quad \bar{t} = \frac{v_0 t}{lm}.$$

С помощью некоторых преобразований получим уравнения для давления, насыщенности, концентрации и температуры.

Уравнение для давления

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_p \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (J_{12} + J_{13}) \left(\frac{1}{R_{12}} - \frac{1}{R_{32}} \right). \quad (10)$$

Уравнения для насыщенности

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} + \frac{\partial F_1 v}{\partial x} = \frac{J_{12} + J_{13}}{R_{12}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial F_\alpha v}{\partial x} = -J_{1\alpha}, \quad \alpha = 2, 3. \quad (12)$$

Уравнения для концентрации

$$\sigma_1 \frac{\partial c_{1k}}{\partial t} + \frac{\partial (F_1 c_{1k} v)}{\partial x} + c_{1k} \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = \frac{J_{1k}}{R_{1k}},$$

$$k = 2, 3. \quad (13)$$

Для решения системы уравнения (10)-(13) с заданными начально-краевыми условиями строятся разностные схемы с помощью интегро-интерполяционного метода [4].

$$F_{pi+1/2}^n \frac{p_{i+1}^{n+1} - p_i^{n+1}}{h^2} - F_{pi-1/2}^n \frac{p_i^{n+1} - p_{i-1}^{n+1}}{h^2} =$$

$$= (J_{12} + J_{13})_i^n \left(\frac{1}{R_{12}} - \frac{1}{R_{32}} \right)_i^n \quad (14)$$

$$\left(\frac{1-m}{m} R_{02} G_{02} + \sigma_2 + R_{32} G_{32} \sigma_3 + \right.$$

$$\left. + R_{12} G_{12} \sigma_1 \right)_i^n \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_{i-1}^{n+1}}{\tau} +$$

$$(c_{12} r_{12} + c_{13} r_{13})_i^n R_{12i}^n \frac{\sigma_{li}^{n+1} - \sigma_{li-1}^{n+1}}{\tau} +$$

$$+ (F_2 + R_{32} G_{32} F_3 + R_{12} G_{12} F_1)_i^n \times \quad (15)$$

$$\frac{\theta_i^{n+1} - \theta_{i-1}^{n+1}}{h} + (c_{12} r_{12} + c_{13} r_{13})_i^n R_{12i}^n F_{li}^n = -q_i^n.$$

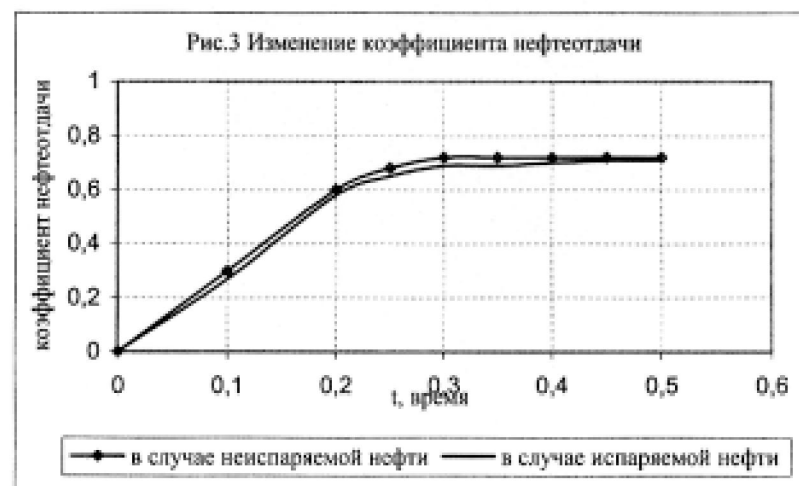
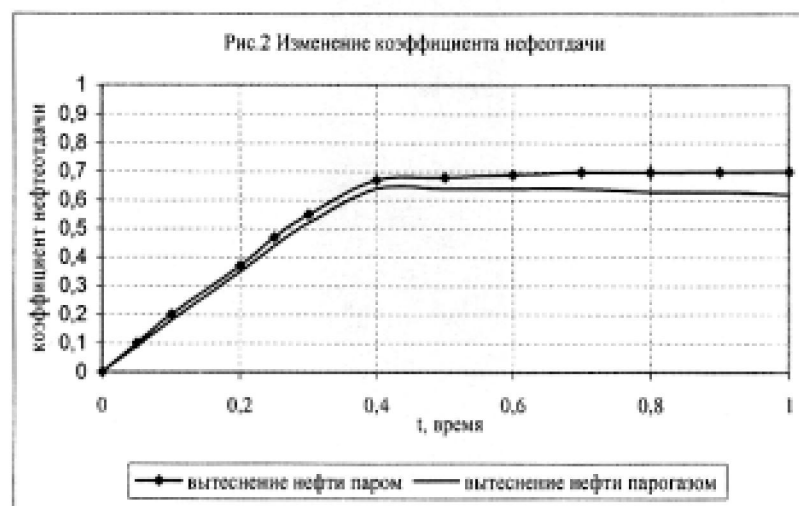
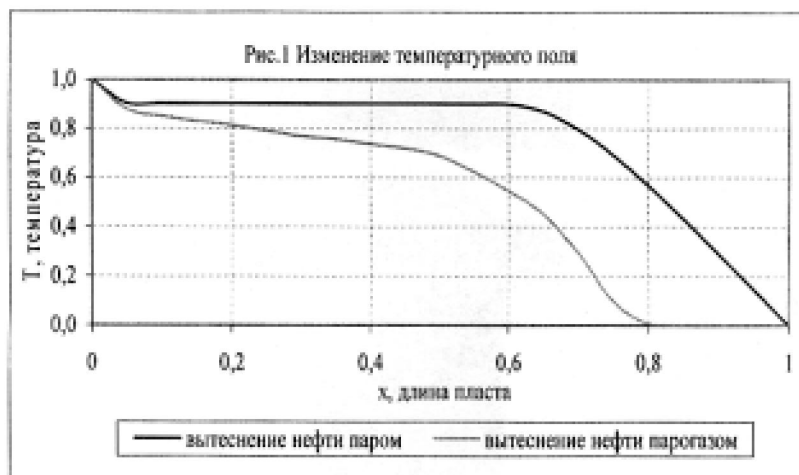
$$\sigma_{li}^n \frac{c_{12i}^{n+1} - c_{12i-1}^{n+1}}{\tau} + (F_1 v)_i^n \frac{c_{12i+1/2}^{n+1} - c_{12i-1/2}^{n+1}}{\partial x} +$$

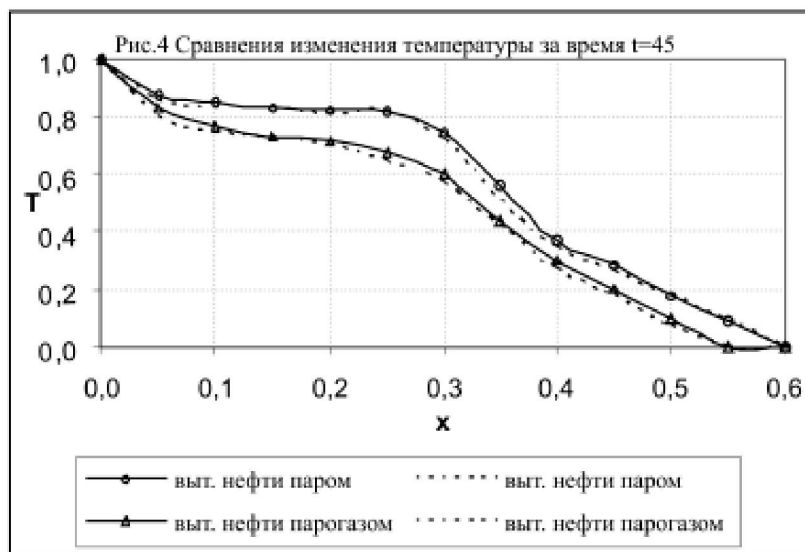
$$+ c_{12i}^n \frac{\sigma_{li}^n - \sigma_{li-1}^n}{\partial t} = \left(\frac{J_{12}}{R_{12}} \right)_i^n. \quad (16)$$

Расчеты проводились для четырех вариантов процесса вытеснения нефти паром и парогазом. Начальная температура пласта и давление равны $T_0 = 20^\circ C$, $p_0 = 5 \text{ МПа}$. Первый вариант – вытеснение нефти из пласта паром при температуре

$T^0 = 275^0C$. Второй вариант – вытеснение нефти из пласта парогазом при температуре $T^0 = 275^0C$. Третий вариант – вытеснение испаряемой нефти из пласта паром $T^0 = 285^0C$.

Четвертый вариант – вытеснение неиспаряемой нефти из пласта парогазом $T^0 = 285^0C$ и $c_{13} = 0$. Сопоставляя результаты расчетов за время $t = 200$, можно увидеть, что при вытеснении нефти паром по сравнению с парогазом большая





часть пласта подвергается тепловому воздействию (рис. 1). Это связано с тем, что пар содержит больше тепла и из-за конденсации пара образуется зона горячей воды, что приводит к быстрому продвижению теплового фронта.

Расчеты показали, что значительные изменения коэффициента нефтеотдачи наблюдается после длительного времени закачки теплоносителя (рис. 2). Из результатов последних расчетов вытекает, что влияние испарения нефти на коэффициент нефтеотдачи мала (рис. 3). Анализируя результаты проведенных расчетов, приходим к выводу, что как и водяной пар, так и парогаз является эффективным вытеснителем при добычи высоковязкой нефти. На рис. 4 пунктирными линиями заданы результаты вычисления по методу работы [2]. Сопоставление полученных результатов с результатами работы [2] показывает, что разница между решениями не больше, чем 0,02 (рис. 4). Это доказывает, что предложенная методика расчета является применимой для исследования основных характеристик высоковязких нефтяных пластов в случае нагнетания пара как теплоноситель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байбаков Н.К., Гарушев А.Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1977. 238 с.
2. Федоров К.М., Шарафутдинов Р.Ф. К теории неизоэнтальной фильтрации с фазовыми переходами // Механика жидкости и газа. 1989. №5. С. 78-85.

3. Баширов В. В., Карнов В. П., Федоров К. М. Парогазотермическая обработка призабойной зоны и пласта в целом // Итоги науки и техники. Сер. Разработка нефтяных и газовых месторождений. Т. 19. М.: ВИНТИ, 1987. С. 3-86.

4. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.

Резюме

Фазалық ауысулар ескерілетін изотермиялық емес фильтрация есебі сандық түрде зерттелінді. Мұнайды су буымен және газ буымен айдау үрдістерін пішімдеу кезінде келесі қағидалар ескерілді: кеуекті ортада қоспа бөлшектері тасымалының диффузиялық үрдісі ескерілмейді. Кеуекті ортада фазалардың температурасы мен қысымын бірдей деп есептейміз. Үрдіс Баклей-Леверетт пішімдеуімен сипатталады. Қысым, температура және қаныққандық үшін теңдеулерді түрлендіру арқылы аламыз. Есеп сандық түрде шешіліп, алынған нәтижелер салыстырыла отырып талқыланды.

Summary

The problem of non isothermal filtration is investigated numerically taking into account of phase's transitions in this work. The following assumptions are done at modeling process of petroleum extracting with water's steam and gas's steam: neglecting process of transfer of components of a mixture. The temperature and pressure of phases are considered equal in the porous environment. Process is described by the model of Barclay and Leverett. The equations for definition of pressure, temperatures and saturations in process of petroleum extracting with water's steam and gas's steam are received with the help of some transformations. This problem is solved numerically and is analyzed with help of comparing results.

КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 27.06.2009г.