

УДК 532.546:949.8

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ ПРОПИТКИ

О.Б. БОЧАРОВ, И.Г. ТЕЛЕГИН

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск*

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Горно-Алтайск

С помощью математического моделирования исследуется влияние термических свойств фильтрующихся жидкостей и гравитационных сил на процесс противоточной пропитки. Рассматриваются два варианта условий, при которых в нефтяных пластах могут возникать такие процессы.

ВВЕДЕНИЕ

При определенных условиях капиллярные силы в модели фильтрации Маскета — Леверетта (МЛ) играют значительную роль, а в некоторых случаях роль капиллярных эффектов является определяющей. В первую очередь — это процесс капиллярного впитывания смачивающей жидкости в пористые среды, насыщенные несмачивающей жидкостью или газом. Явление это, называемое обычно капиллярной пропиткой, помимо своей важности для технологии добычи нефти и газа, имеет определенное значение и для почвоведения, некоторых процессов химической технологии и т. д. Процессы капиллярной пропитки изучались в работах [1, 2, 3, 4].

На основе МЛ модели в работе [5] была предложена модель неизотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей (МЛТ модель), для которой удалось доказать разрешимость основной краевой задачи. В работе [6] исследован режим термокапиллярной пропитки в автомоделных переменных при закачке горячей воды в пласт. В настоящей работе численно исследуются задачи пропитки нефтяного пласта для одномерного случая в физических переменных с учетом гравитационных сил.

1. УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Одномерная модель неизотермической фильтрации двух несмешивающихся жидкостей в однородной пористой среде с учетом гравитации имеет вид [5]:

$$\begin{cases} ms_t = (k_0 a_0 (a_1 s_x + a_2 \theta_x - f_1) - vb)_x \equiv -v_{1x}, \\ (k_0 k \bar{p}_x + a_3 \theta_x - f_2)_x = -v_x = 0, \\ \theta_t = (\lambda \theta_x - v \theta)_x, \end{cases} \quad (1)$$

где индексы $t, x \in [0, L]$ — время и пространственная переменная, $s = (s_1 - S_1^0)/(1 - S_1^0 - S_2^0)$ — динамическая насыщенность смачивающей фазы, s_1 — истинная насыщенность смачивающей фазы, $(S_1^0, S_2^0) = \text{const}$ — остаточные водо- и нефтенасыщенности, $\theta \in (\theta_{\min}, \theta_{\max})$ — температура, $m = m_0(1 - S_1^0 - S_2^0)$, m_0 — пористость породы, $k_0 = \text{const}$ — абсолютная проницаемость коллектора, $a_0(s, \theta) = k_1 k_2 / (\mu_2(k_1 + \mu k_2))$, $a_1(s, \theta) = -p_{cs}$, $a_2(s, \theta) = -p_{c\theta}$, $p_c(s, \theta) = (m_0/k_0)^{1/2} \gamma j$ — капиллярное давление, $\gamma(\theta)$ — коэффициент поверхностного натяжения, $j(s)$ — функция Леверетта, $b(s, \theta) = k_1 / (k_1 + \mu k_2)$ — коэффициент подвижности вытесняющей фазы, $f_1 = (\rho_1 - \rho_2) \vec{g} \cdot \vec{e}_x$, $\vec{g} \cdot \vec{e}_x = g \cdot \cos(\vec{g}, \vec{e}_x)$, \vec{e}_x — орт вектора оси OX (ось OX направлена от нагнетательной скважины к эксплуатационной), g — ускорение свободного падения, v_i — фазовые скорости фильтрации, v — суммарная скорость фильтрации, $k(s, \theta) = k_1 / \mu_1 + k_2 / \mu_2$, $a_3(s, \theta) = k_0 k (b_2 p_{c\theta}) + \int_s^1 (b_2 p_{cs})_\theta ds$, $b_2(s, \theta) = \mu k_2 / (k_1 + \mu k_2)$, $\tilde{p} = p_1 - \int_s^1 (b_2 p_{cs}) ds$ — эффективное давление, $\varphi_s, \varphi_\theta, \varphi_t, \varphi_x$ — обозначают частные производные по s, θ, t, x от соответствующей функции (например, s_x, s_t), p_i — давление в i -фазе, $k_i(s)$ — относительные фазовые проницаемости, $\mu = \mu_1 / \mu_2$, $\mu_i(\theta)$ — вязкости фаз, $\lambda(s, \theta) = \sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i \lambda_i}{\rho_i c_{pi}}$ — коэффициент температуропроводности смеси, ρ_i — плотности, $\alpha_1 = m_0 s_1$, $\alpha_2 = m_0 (1 - s_1)$, $\alpha_3 = 1 - m_0$ (индекс $i=1$ соответствует воде, $i=2$ — нефти, $i=3$ — пористой среде). Свойства функциональных параметров МЛТ модели описаны в работе [5]. Отметим, что $k_1(0) = k_2(1) = 0$.

Из второго уравнения системы (1) следует, что суммарная скорость фильтрации не зависит от пространственной переменной $v = v_1 + v_2 \equiv v(t)$. Противоточная пропитка реализуется в случае отсутствия в уравнениях для водонасыщенности S и температуры θ конвективного переноса, т. е. при $v \equiv 0$. Такие условия можно наблюдать в двух случаях. В первом случае левый конец пористого тела контактирует со смачивающей фазой, а правый — непроницаем. Граничное условие на проницаемом конце $x = 0$ следует из непрерывности капиллярного давления. Поскольку это давление вне пласта равно нулю, а в области течения оно обращается в ноль при $s = 1$, то в случае $x = 0$ будем иметь:

$$s|_{x=0} = 1, \quad \theta|_{x=0} = \theta_1. \quad (2a)$$

Правую непроницаемую границу $x = L$ считаем теплоизолированной:

$$v_1 = v_2 = 0, \quad \lambda \theta_x|_{x=L} = 0. \quad (2б)$$

Из условий непроницаемости для каждой фазы получаем

$$v = v_1 + v_2 \equiv 0.$$

Второй случай наблюдается при вытеснении нефти из пористых блоков в трещиновато-пористых коллекторах. В этом случае на границах блока (трещинах, по

которым поток воды выносит нефть) естественно задать симметричные краевые условия:

$$x=0: p_1 = p_2 = p_0, \quad \theta = \theta_1,$$

$$x=L: p_1 = p_2 = p_0, \quad \theta = \theta_1.$$

При отсутствии гравитации ($f_1 = f_2 = 0$) решение будет симметричным относительно точки $x=L/2$. Следовательно, в этой точке будем иметь условие $x=L/2: s_x = \theta_x = p_{1x} = 0$. Тогда при $x=L/2$

$$v(t) = -k_0 k [p_{1x} + b_2 p_{cx}] = -k_0 k [p_{1x} + b_2 p_{cs} s_x + b_2 p_{c\theta} \theta_x] = 0,$$

а значит $v \equiv 0$. То есть в этом случае на отрезке $[0, L/2]$ опять получаем задачу о противоточной пропитке. В итоге будут рассматриваться две начально-краевые задачи.

Уравнение для s системы (1), как следует из определения функциональных параметров и с учетом $v \equiv 0$, можно также переписать в следующем эквивалентном представлении

$$ms_t = (k_0 a_0 ((-p_c)_x - f_1))_x. \quad (3)$$

Исследования, проведенные в [7], показали, что представление (3) приводит к более экономичным численным алгоритмам, поэтому далее будет использоваться именно эта форма уравнения для водонасыщенности.

Введем безразмерные величины: $\bar{x} = x/L$, $\bar{t} = \Gamma \sqrt{(k_0 m_0)} / (M_2 L^2 m) \cdot t$ ($M_2 = \max \mu_2(\theta)$, $\Gamma = \max \gamma(\theta)$), $\bar{\theta} = (\theta - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min})$, $\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_0$, где $\lambda_0 = \lambda(0, \theta_{\min})$. Черта над \bar{x} , \bar{t} , $\bar{\theta}$ и $\bar{\lambda}$ в дальнейшем опускается. В силу доказанного в [5] принципа максимума θ_{\max} и θ_{\min} достигаются на границах области при $x=0$ и $x=1$. Система (1) в новых переменных, с учетом (3) и $v \equiv 0$ будет иметь вид:

$$\begin{cases} s_t = (ap_x - Ga)_x, \\ \theta_t = (\varepsilon_\theta \lambda \theta_x)_x, \end{cases} \quad (4)$$

где $a(s, \theta) = k_1 k_2 / (\mu_2^* (k_1 + \mu k_2))$, $p(s, \theta) = -j\gamma^*$, $G = L \sqrt{k_0} [(\rho_1 - \rho_2) \vec{g} \cdot \vec{e}_x] / (\Gamma \sqrt{m_0})$,

$\varepsilon_\theta = \lambda_0 M_2 m / (\Gamma \sqrt{k_0 m_0})$, $\gamma^* = \gamma / \Gamma$, $\mu = \mu_1^* / \mu_2^*$, $\mu_2^* = \mu_2 / M_2$, $\mu_1^* = \mu_1 / M_2$.

Звездочки при μ_1^* , μ_2^* и γ^* в дальнейшем опускаются.

Задача 1 (без учета гравитации). В системе (4) $G = 0$. Краевые условия имеют вид:

$$s|_{x=0} = 1, \quad \theta|_{x=0} = \theta_1, \quad s_x|_{x=1} = \theta_x|_{x=1} = 0. \quad (5)$$

Задача 2 (с учетом гравитации). Условия при $x=0$ те же, что и в задаче (5), а на правом конце:

$$(ap_x - Ga)|_{x=1} = 0, \quad \varepsilon_\theta \lambda \theta_x|_{x=1} = 0. \quad (6)$$

При интерпретации результатов расчетов следует иметь в виду, что в безразмерной длине и времени для задачи 1 вместо L будет $L/2$, т. е. безразмерные времена связаны соотношением $t_1 = 4t_2$. Задача 1 (плоский пласт, отсутствие

гравитации) имеет два варианта решения при подаче горячей и холодной воды. В задаче 2 возникают четыре варианта: при подаче горячей и холодной воды с верхнего и нижнего краев пласта.

В начальный момент времени для обеих задач зададим распределения водонасыщенности и температуры:

$$s(x, 0) = 0, \quad \theta(x, 0) = \theta_0, \quad x \in (0, 1]. \quad (7)$$

2. РАЗНОСТНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Введем сетку с распределенными узлами $\omega_{nr} = \{x_i = ih, \quad t^n = n\tau, \quad i = 0, \dots, N, \quad n = 0, 1, 2, \dots\}$ $h = 1/N$ — шаг по пространственной координате, τ — шаг по временной переменной, $K = \tau/h^2$. Шаг h брался равным 0,01 ($N = 100$), а $\tau = 0,0002$.

Аппроксимируем уравнение для температуры в (4) – (7) неявной разностной схемой второго порядка аппроксимации:

$$\begin{cases} \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{\tau} = \frac{\varepsilon_\theta}{h} (\lambda_{i+1/2}^n \theta_{x,i}^{n+1} - \lambda_{i-1/2}^n \theta_{\bar{x},i}^{n+1}), & \theta_i^0 = \theta_0, \quad i = \overline{1, N}, \quad \theta_0^n = \theta_0^{n+1} = \theta_1, \\ \frac{\theta_N^{n+1} - \theta_N^n}{\tau} = -\frac{2\varepsilon_\theta}{h} \lambda_{N-1/2}^n \theta_{\bar{x},N}^{n+1}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\lambda_{i+1/2}^n = \lambda((s_i^n + s_{i+1}^n)/2, (\theta_i^n + \theta_{i+1}^n)/2)$. Уравнение для s также аппроксимировалось схемой второго порядка аппроксимации:

$$\begin{cases} \frac{s_i^{n+1} - s_i^n}{\tau} = \frac{1}{h} ((a_{i+1/2}^n P_{x,i}^{n+1} - a_{i-1/2}^n P_{\bar{x},i}^{n+1}) - \frac{G}{2} (a_{i+1}^n - a_{i-1}^n)), \\ \frac{h}{2} \frac{s_N^{n+1} - s_N^n}{\tau} = -a_{N-1/2}^n P_{\bar{x},N}^{n+1} + G a_{N-1/2}^n, \\ s_0^n = s_0^{n+1} = 1; \quad s_i^0 = 0, \quad i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (9)$$

где $a_{i+1/2}^n = a((s_i^n + s_{i+1}^n)/2, (\theta_i^{n+1} + \theta_{i+1}^{n+1})/2)$. Для численного решения систем (8) и (9) применялся метод правой прогонки.

Задачи (4) – (7) решались последовательно: полученное из (8) θ^{n+1} использовалось при решении (9). Для нелинейной функции $p(s, \theta)$ применялась линеаризация по Ньютону $p(s_i^{n+1}, \theta_i^{n+1}) = p(s_i^n, \theta_i^{n+1}) + p_s(s_i^n, \theta_i^{n+1})(s_i^{n+1} - s_i^n)$. Схема для температуры неявная, а для водонасыщенности явно-неявная. Последовательное решение также вносит элемент явности в метод расчета (8) – (9). Это ведет к необходимости подбора временного шага для устойчивого счета и сходимости итерационного процесса.

На каждом временном шаге вычислялась $\eta(t)$ — обводненность пласта

$\eta(t) = 100\% \int_0^1 s(x, t) dx$. Интеграл в правой части соотношения вычислялся по формуле трапеций. Контролировалась предельная точка распространения фронта водонасыщенности $x_f(t)$.

В работе [8] приведены графические данные по ряду одномерных вытеснений в искусственных пористых средах (засыпках). Там же подобраны относительные фазовые проницаемости и приведен экспериментальный график функции Леверетта $j(s)$. Для настоящих расчетов использовались фазовые проницаемости из [8], а функция Леверетта была подобрана в работе [9], вязкости и коэффициент поверхностного натяжения брались модельные, как в работе [7]:

$$k_1 = 0,12s^{1,6} + 0,35s^{3,6}, \quad k_2 = 0,64 \left(\frac{1-s}{1+s} \right)^{1,05}, \quad j = \frac{0,48(1,00000001-s)^{0,14}(1+0,5e^{-100s})}{(0,92+s)^{1,67}};$$

$\varepsilon_\theta = 0,01$, $\mu_1 = 0,1$, $\mu_2 = \mu_{2\max} + (\mu_{2\min} - \mu_{2\max})\theta$, $\mu_{2\max} = 1$, $\mu_{2\min} = 0,2$; $\gamma = \gamma_{\max} + (\gamma_{\min} - \gamma_{\max})\theta$, $\gamma_{\max} = 1$, $\gamma_{\min} = 0,2$. Данные, характеризующие температурные и физические свойства задачи, взяты из работы [10]:

$$\lambda_1 = 0,644 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad \lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad \lambda_3 = 2,40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad \rho_1 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3, \\ \rho_2 = 730 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad \rho_3 = 4216 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad c_{p1} = 4071 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_{p2} = 2100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \\ c_{p3} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

На рисунках жирными линиями обозначены зависимости, относящиеся к неизотермическому случаю с учетом гравитации, пунктиром — контрольные расчеты в изотермическом случае с учетом гравитации (при $\theta = \theta_0$), тонкими с кружками — температурные профили.

3. ПРОТИВОТОЧНАЯ ТЕРМОПРОПИТКА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА БЕЗ УЧЕТА ГРАВИТАЦИИ (ЗАДАЧА 1)

Пропитка нефтяного пласта водой с температурой выше пластовой описывается начально-краевой задачей (5) с $\theta_1 = 1$ и $\theta_0 = 0$. Так как $G = 0$, то решение задачи определяется взаимодействием капиллярных и сил вязкого трения, определяемых членом ap_x . При этом капиллярные силы находятся в числителе и поскольку $\gamma_\theta < 0$, то с увеличением температуры капиллярное впитывание уменьшается. С другой стороны, знаменатель характеризует вязкое сопротивление, и так как $\mu_{i\theta} < 0$, то с ростом температуры подвижность флюидов увеличивается. Существует три случая особенности взаимодействия этих сил. Рассмотрим два из них.

В первом случае на рис. 1 приведены графики водонасыщенности и температуры с непостоянными $\mu(\theta)$ и $\gamma(\theta)$. Хорошо видно положительное влияние теплой воды на процесс вытеснения нефти. Продвижение фронта термопропитки более быстрое по сравнению с изотермическим случаем и вытеснение происходит полнее. Это можно объяснить тем, что если раскрыть дифференцирование в уравнении (4), то там появляется член, пропорциональный θ_{xx} (см. систему (1)). В данном случае, как видно на рис. 1, он положителен и играет роль источника или дополнительной подсасывающей силы. Во втором случае на рис. 2 приведены решения задачи пропитки нефтяного пласта холодной водой, т. е. $\theta_1 = 0$, $\theta_0 = 1$ и $\mu(\theta) \neq \text{const}$, $\gamma(\theta) \neq \text{const}$. Видно, что $\theta_{xx} < 0$ и неизотермическое решение дает отставание x_f и менее полное вытеснение нефти. Влияние тепловых эффектов на нефтеотдачу образца хорошо иллюстрирует рис. 3, на котором приведены данные для всех случаев.

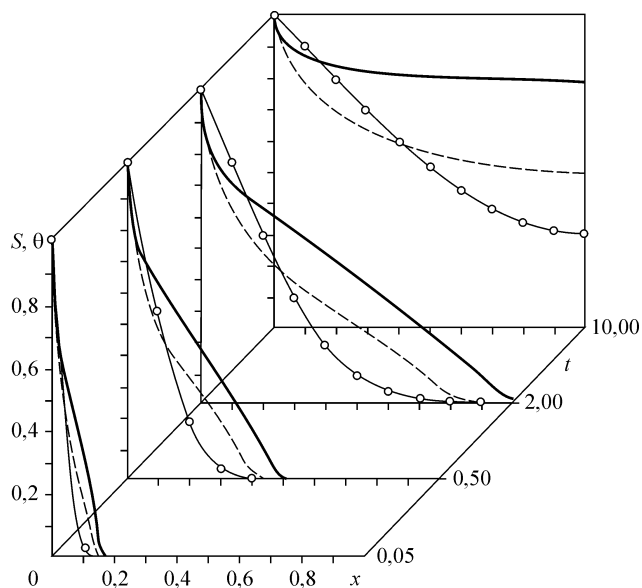


Рис. 1. Пропитка пласта горячей водой, $G = 0$.

Для выяснения влияния зависимости капиллярных и вязких сил от температуры были проведены расчеты с вытеснением нефти горячей водой. На рис. 4 показано решение с $\mu = \text{const}$, $\gamma = \gamma(\theta)$, на рис. 5 с $\mu = \mu(\theta)$, $\gamma = \text{const}$. Структура решений заметно отличается. Если сравнивать эти расчеты с изотермическим вариантом расчетов как с эталоном, то видно, что для решения (см. рис. 4) фронт

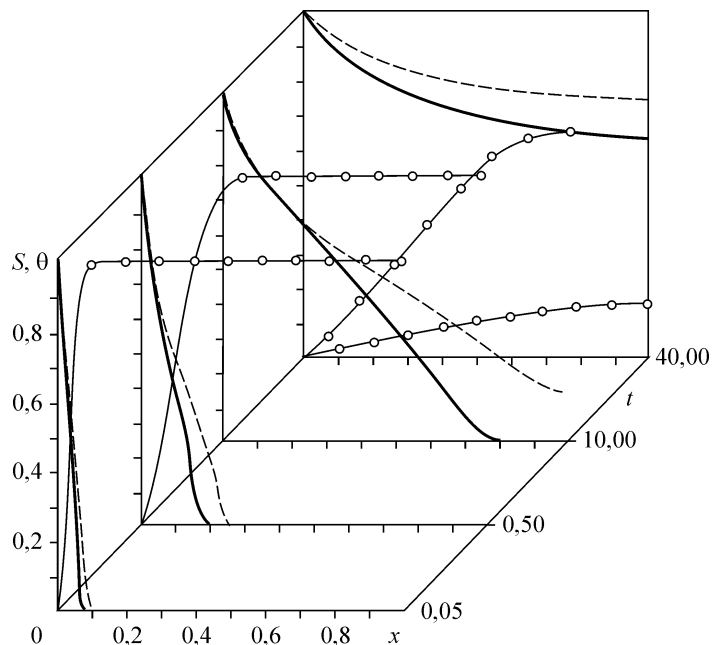


Рис. 2. Пропитка пласта холодной водой, $G = 0$.

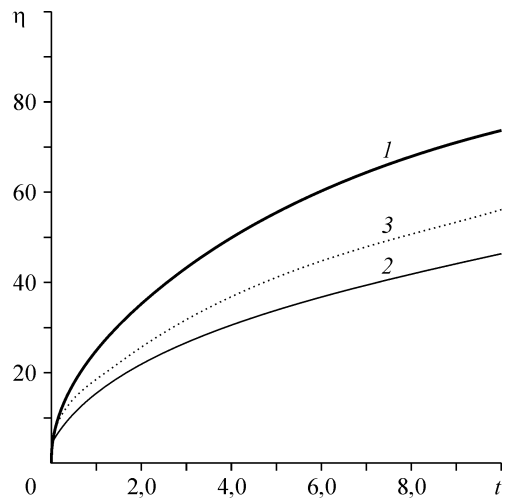


Рис. 3. Графики обводненностей.

Подача горячей воды — жирная линия, холодной — тонкая, изотермический вариант — пунктир.

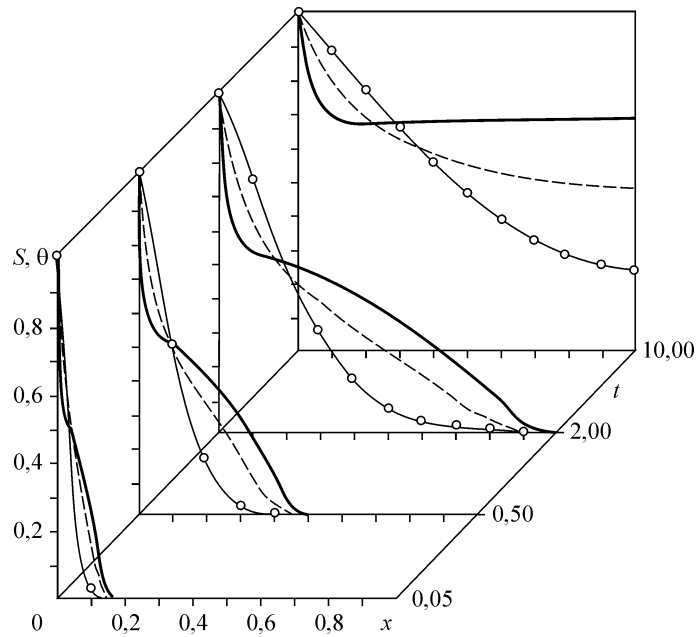


Рис. 4. Пропитка пласта горячей водой, $G = 0$, $\gamma = \gamma(\theta)$.

насыщенности движется быстрее. Однако как следует из рис. 6, вытеснение для другого решения (см. рис. 5) происходит более полно. Отсюда можно сделать вывод, что воздействие на подвижность флюидов (вязкость) является более эффективным. Для настоящей работы взяты слишком простые зависимости μ и γ от θ , а именно, линейные. Для более реальных зависимостей этот вопрос требует отдельного рассмотрения. Особенности влияния тепла через вязкости фаз и капиллярное

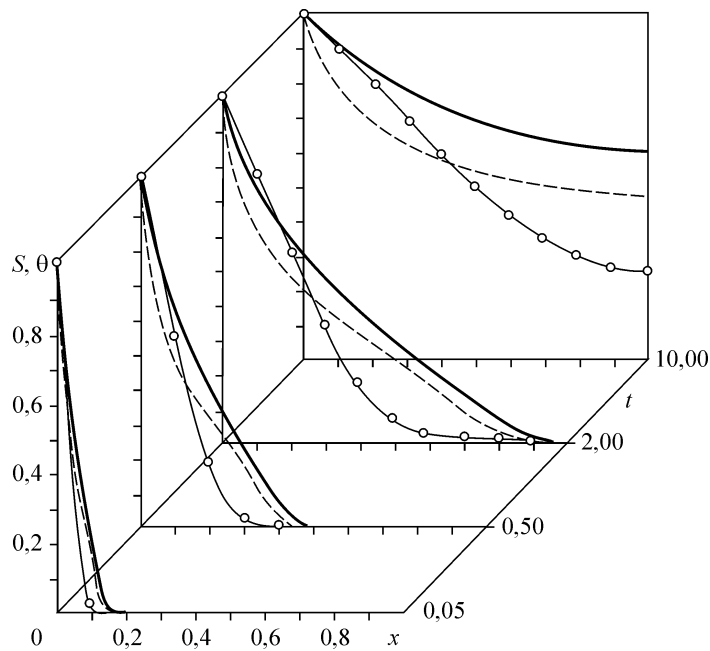


Рис. 5. Пропитка пласта горячей водой, $G = 0$.

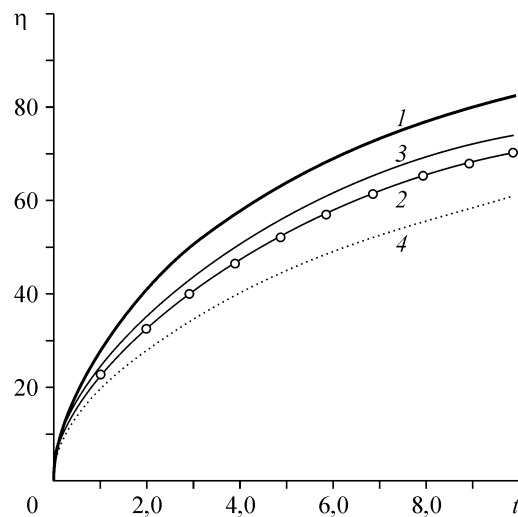


Рис. 6. Обводненности к рис. 1, 4, 5.

Подача горячей воды: жирная линия — при $\mu = \mu(\theta)$ и $\gamma = \gamma(\theta)$ (к рис. 1), тонкая с кружками — при $\gamma = \gamma(\theta)$ (к рис. 4), тонкая — при $\mu = \mu(\theta)$ (к рис. 5), пунктир — изотермический вариант.

давление на профиль водонасыщенности для задачи пропитки ($\nu \neq 0$) в автомодельных переменных изучались в [6].

4. ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ ПРОТИВОТОЧНАЯ ПРОПИТКА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА (ЗАДАЧА 2)

Подача горячей воды с нижнего края пласта, $G < 0$

На рис. 7 приведены графики термопропитки с $G = -0,55$. Как видно из рисунка, процесс вытеснения нефти из пласта можно разделить на две стадии: первая — относительно медленная термопропитка, вторая (после прорыва воды к правому

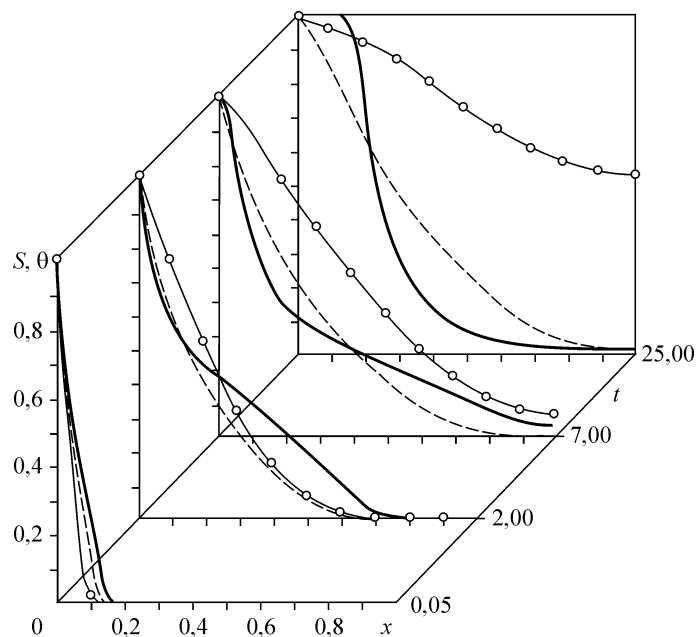
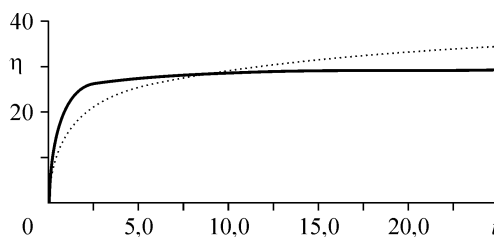


Рис. 7. Пропитка горячей водой с нижнего края пласта при $G = -0,55$.

Рис. 8. Обводненности к рис. 7.

концу) — стабилизация решения $s(x, t)$ и его выход на некоторый стационарный профиль $s_G(x)$. Минимум водонасыщенности в точке $x = 1$ объясняется использованием

краевого условия $(ap_x - Ga)|_{x=1} = 0$, которое в изотермическом случае приводит к следующему выражению: $s_x = G/(-j_s)$. Так как $j_s < 0$, $G < 0$, то в точке $x = 1$ значения производной s_x становятся отрицательными и это приводит к формированию минимума водонасыщенности. На рис. 8 видно, что при термопродитке с нижнего края пласта горячей водой график обводненности выходит на константу. При $G \leq G_0$ ($G_0 \approx -0,81$) фронт пропитки останавливается, не достигнув $x = 1$, что связано с наличием разной направленности гравитационного $-Ga$ и капиллярного потоков ap_x и тем, что гравитационный поток в данном случае оказывается больше капиллярного.



Подача горячей воды с верхнего края пласта, $G > 0$

На рис. 9 приведены графики при $G = 3$, особенностью решений $s(x, t)$ в этом варианте является формирование профилей, характерных для МЛ модели [7] (при $G \geq 2,5$), что связано с преобладанием гравитационного просачивания воды в пласт, которое играет роль конвективного члена. Температурный фронт значительно отстает от фронта водонасыщенности. После достижения фронтом водонасыщенности $s(x, t)$ правого конца (нижнего края) происходит накопление воды в нижней части пласта и всплытие нефти. Это объясняется наличием условия

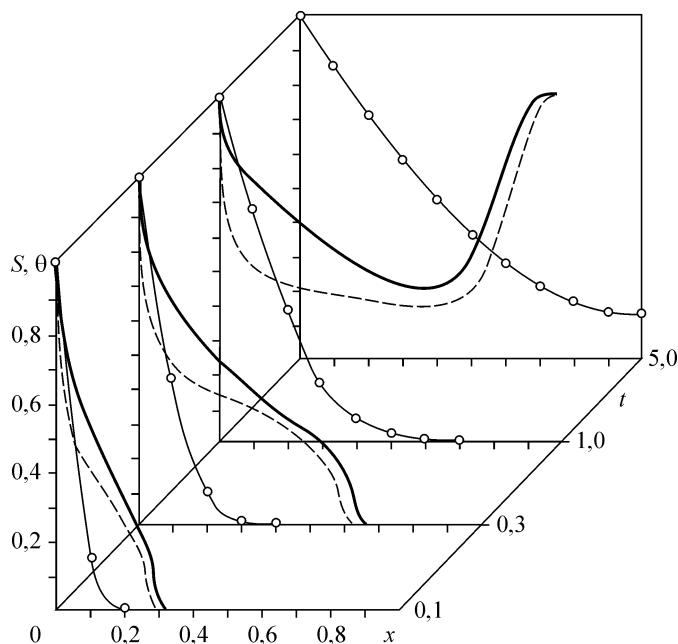


Рис. 9. Пропитка горячей водой с верхнего края пласта при $G = 3$.

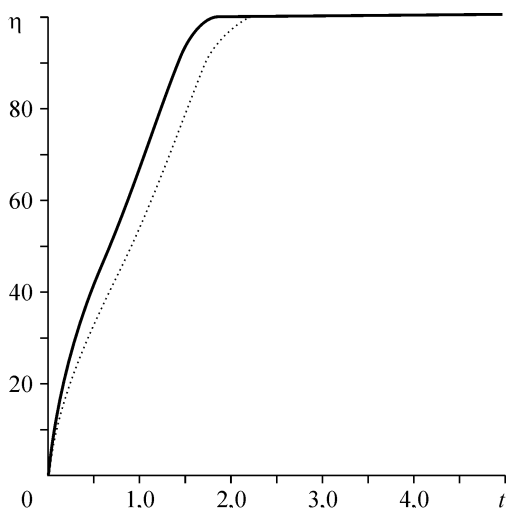


Рис. 10. Обводненности к рис. 9.

$(ap_x - Ga)|_{x=1} = 0$, при котором производная s_x в окрестности $x = 1$ становится положительной. В конечном итоге происходит полное вытеснение нефти водой (см. рис. 9) при $t = 5$. На рис. 10 приведены соответствующие рис. 9 обводненности. Рисунок иллюстрирует повышение температуры, которое ускоряет полное вытеснение нефти.

Подача холодной воды с нижнего края пласта, $G < 0$

Рассмотрим вариант $\mu = \mu(\theta)$, $\gamma \equiv \gamma_{\min} = 1$, пренебрегая изменением поверхностного натяжения. За счет понижения температуры вязкость нефти увеличивается, что уменьшает ее подвижность. По сравнению с изотермическим случаем, имеется заниженная водонасыщенность (рис. 11) и нефтеотдача (рис. 12). Однако следует отметить, что если в этой ситуации уменьшить капиллярные силы, то можно получить интересный результат (тонкая линия, см. рис. 12, $\gamma \equiv \gamma_{\min} = 0,2$), при котором впитывание холодной воды с нижнего края пласта менее эффективно, чем впитывание воды с температурой пласта.

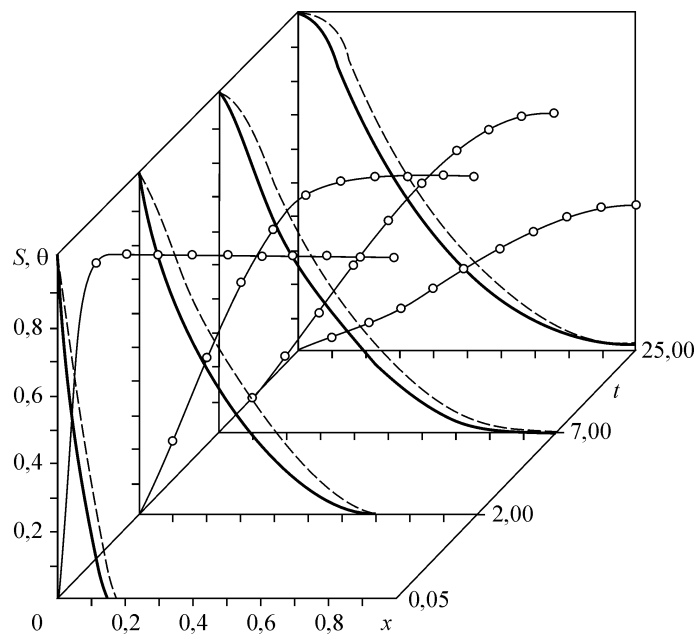


Рис. 11. Подача холодной воды с нижнего края пласта при $G = -0,55$.

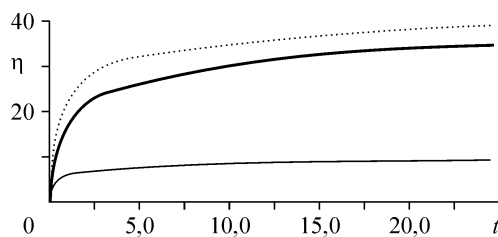


Рис. 12. Обводненности к рис. 11.

Подача холодной воды с верхнего края пласта, $G > 0$, $\gamma \equiv \gamma_{\min} = 0,2$

На рис. 13 профиль насыщенности $s(x, t)$ лежит ниже изотермического. До подхода воды к нижнему краю (правый конец) пласта имеются ярко выраженные зоны больших градиентов у входа и во фронтовой части профиля водонасыщенности. В то же время в центральной части профиля, при $G > 1$, формируется выполаживание. Это, вероятно, объясняется тем, что гравитационное оседание начинает преобладать над капиллярным впитыванием, которое действует более мягко. После достижения фронтом воды нижнего края пласта начинает работать эффект всплытия нефти и формируется фронт водонасыщенности, идущий вверх. В итоге процесс завершается полным вытеснением, как и в изотермическом случае, но существенно позднее.

Можно сделать следующие выводы: в случаях подачи воды с верхнего края пласта преобладающее влияние на вытеснение нефти водой имеет гравитация, второстепенную роль играют нагрев или охлаждение, которые определяют время окончательного вытеснения нефти. При подаче воды с нижнего края пласта его прогрев может остановить вытеснение нефти, чего не происходит при холодном

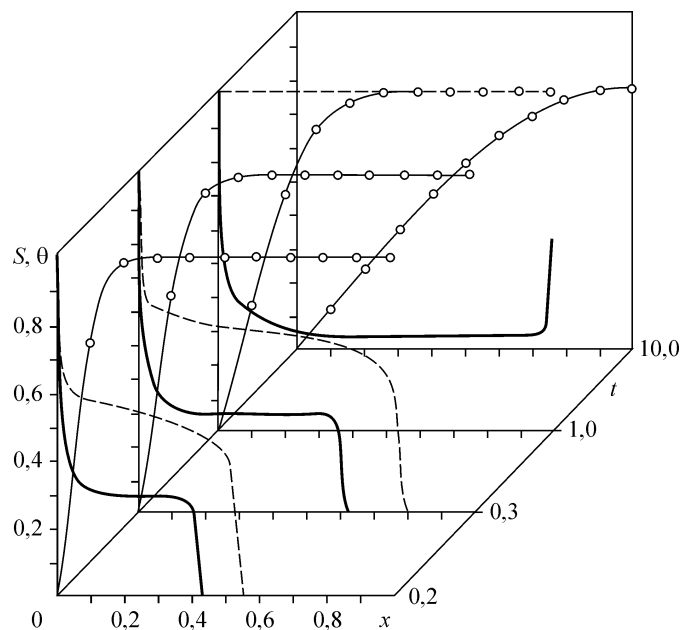


Рис. 13. Подача холодной воды с верхнего края пласта при $G = 3$.

вытеснителя, хотя данный процесс по достижении стенки (верхний край нефтяного пласта) можно считать квазистационарным из-за малой скорости фильтрации смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжик В.М. О механизме капиллярной пропитки пористой среды // Изв. АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. — 1959. — № 1. — С. 151–153.
2. Рыжик В.М. О капиллярной пропитке нефтеносного гидрофильного пласта // Изв. АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. — 1960. — № 2. — С. 149–151.
3. Рыжик В.М., Чарный И.А., Чэнь Чжун-Сян. О некоторых точных решениях уравнений нестационарной фильтрации двухфазной жидкости // Изв. АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. — 1961. — № 1. — С. 121–126.
4. Боксерман А.А., Данилов В.Л., Желтов Ю.П., Кочешков А.А. К теории фильтрации несмешивающихся жидкостей в трещиновато-пористых средах // Теория и практика добычи нефти. — М.: Недра, 1966.
5. Бочаров О.Б., Монахов В.Н. Краевые задачи неизоотермической двухфазной фильтрации в пористых средах // Динамика сплошной среды. Вып. 86. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1988, — С. 47–59.
6. Бочаров О.Б., Осокин А.Е. Численное моделирование автомодельного режима термокапиллярной пропитки // Сиб. журн. индустр. матем. — Новосибирск, 1998. — Т. 1, № 2. — С. 73–80.
7. Бочаров О.Б., Телегин И.Г. О некоторых особенностях неизоотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 459–467.
8. Кузнецов В.В. Капиллярные явления, тепломассообмен и волновые процессы при двухфазном течении в пористых системах и засыпках: Дис. ... д.ф.-м.н. / Ин-т теплофизики СО РАН. — Новосибирск, 1995.
9. Бочаров О.Б., Телегин И.Г. Сравнение модели фильтрации несмешивающихся жидкостей с фазовыми подвижностями и модели Маскета — Леверетта // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 9, № 4. — С. 597–605.
10. Бочаров О.Б., Осокин А.Е. Численное исследование автомодельных задач неизоотермической двухфазной фильтрации // Сиб. журн. индустр. математ. — Новосибирск. — 2002. — Т. 5, № 1. — С. 8–20.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2005 г.