

ОДНОМЕРНОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ НЕФТИ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ
СОРБИРУЮЩИХСЯ АГЕНТОВ С УЧЕТОМ МЕЖСЛОЙНЫХ
ПЕРЕТОКОВ

Г. Г. ВАХИТОВ, Р. М. КАЦ, В. Г. ОГАНДЖАНЫЦ,
А. М. ПОЛИЩУК, Е. М. СУРКОВА

(Москва)

Экспериментальные и теоретические исследования процесса вытеснения нефти водными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ), полимеров, мицеллярными растворами и их комбинациями показывают, что сорбционные явления могут оказывать существенное влияние на характеристики заводнения [1, 2]. В некоторых случаях они могут привести к заметному отставанию фронта растворенного вещества от несущей жидкости и появлению второго скачка насыщенности вытесняющей жидкости [1, 3].

В работе [4] предлагается математическая модель вытеснения нефти из слоистого пласта с изолированными пропластками водными растворами ПАВ и полимеров с учетом явлений сорбции.

В данной работе изучается вытеснение нефти из пласта водными растворами сорбирующихся агентов с учетом межслойных перетоков жидкостей.

1. Рассмотрим вытеснение углеводородной жидкости раствором сорбирующегося вещества в неоднородном пласте простейшей геометрии, представленном двумя однородными слоями разной проницаемости. Гравитационные силы и капиллярный скачок давления между фазами не учитываются.

Система уравнений, выражающих закон сохранения массы и закон Дарси для каждой фазы, имеет вид

$$(1.1) \quad m_i h_i \partial s_i / \partial t + \partial Q_{wi} / \partial x + q_{wi} = 0$$

$$(1.2) \quad m_i h_i \frac{\partial (1-s_i)}{\partial t} + \frac{\partial Q_{oi}}{\partial x} + q_{oi} = 0$$

$$(1.3) \quad \frac{\partial [h_i (m_i c_i s_i + a_i)]}{\partial t} + \frac{\partial (c_i Q_{wi})}{\partial x} + q_{pi} = 0$$

$$(1.4) \quad q_{w1} = -q_{w2}, \quad q_{o1} = -q_{o2}; \quad q_{p1} = -q_{p2}, \quad q = q_{w1} + q_{o1}$$

$$(1.5) \quad q_{w1} = F(s_j, a_j, c_j) q,$$

$$F(s_j, a_j, c_j) = f_{wj}(s_j, a_j) \left[f_{wj}(s_j, a_j) + \frac{\mu_w}{\mu_o} f_{oj}(s_j, a_j) \right]^{-1}$$

$$(1.6) \quad q_{p1} = c_j q_{w1}$$

$$(1.7) \quad Q_{oi} = -K_i h_i \mu_o^{-1} f_{oi}(s_i, a_i) \partial p / \partial x$$

$$(1.8) \quad Q_{wi} = -K_i h_i \mu_w^{-1} (c_i) f_{wi}(s_i, a_i) \partial p / \partial x$$

$$(1.9) \quad a_i = a_i(c_i, s_i)$$

Здесь $j=1$ при $q \geq 0$, $j=2$ при $q < 0$;

$i=1, 2$ — индекс пропластка; t, x — время и координата; s_i, m_i, h_i, K_i — водонасыщенность, пористость, мощность и проницаемость i -го пропластка; Q_{wi}, Q_{oi} — расходы водного раствора агента и нефти; c_i, a_i — концентрация добавок агента и количество сорбированного в данной точке вещества; q_{oi}, q_{wi}, q_{pi} — перетоки нефти, водного раствора и растворенного вещества в единицу времени на единицу длины; f_{wi}, f_{oi} — относительные проницаемости для водного раствора агента и нефти; μ_o, μ_w — вязкость нефти и водного раствора агента; p, w — давление и скорость фильтрации.

Поскольку в реальных условиях мощность пласта мала по сравнению с его протяженностью, можно принять, что в гидродинамически связанных пропластках давления равны ($p_1=p_2=p$). Кроме того, предполагается, что доля водного раствора q_{wi} в перетоке q определяется долей этого раствора в том пропластке, откуда происходит переток. Аналогичный подход предлагается в работах [5, 6].

Это допущение представляется естественным, так как учитывает характеристические направления, вдоль которых происходит перенос, и, как показывает приводимое ниже сравнение с решением соответствующей двумерной задачи, дает хорошие результаты.

Здесь также принято допущение, что растворенное вещество либо движется со скоростью раствора, либо неподвижно удерживается пористой средой.

Система уравнений (1.1) — (1.9) может быть обобщена на пласт, состоящий из произвольного количества слоев.

2. Перейдем к обсуждению функций, входящих в систему (1.1) — (1.9), которые нужно определять экспериментально.

В общем случае эффективная вязкость раствора может зависеть как от концентрации растворенного вещества, так и от скорости фильтрации. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты изучения движения полимерных растворов [7–11]. Однако эти данные о реологически сложном поведении полимерных растворов получены при не реализуемых обычно скоростях фильтрации. Поэтому при расчете процесса вытеснения нефти для условий, близких к пластовым, как и в [1, 4, 12], принимаем, что вязкость раствора зависит только от концентрации агента. Эта зависимость может быть определена из сравнительно простых вискозиметрических исследований.

Как известно [11], основной особенностью фильтрации полимерных растворов в пористой среде является снижение подвижности полимерного раствора K/μ , не пропорциональное увеличению вязкости. Для количественной характеристики этого явления в работе [11] введен «фактор сопротивления» R

$$(2.1) \quad R = \frac{(K/\mu)_w}{(K/\mu)_p}$$

Здесь индекс w относится к воде, а p — к полимерному раствору. Следуя работе [1], принимаем, что влияние полимерных добавок можно подразделить на два эффекта: сорбированный полимер изменяет проницаемость пористой среды, в то время как полимер, находящийся в растворе, изменяет его вязкость. Тогда

$$K_p = K_p(a), \quad f_{wi} = f_{wi}(s_i, a_i)$$

Экспериментальные данные, позволяющие достаточно точно оценить влияние добавок полимеров на фазовые проницаемости, отсутствуют.

В данной работе предполагается, что сорбированное вещество не влияет на фазовые проницаемости для нефти, а фазовая проницаемость для полимерного раствора изменяется пропорционально некоторому коэффициенту

ту $\lambda_i(a_i)$

$$\lambda_i(a_i) = K_p / K_w$$

Этот коэффициент характеризует влияние сорбирующихся добавок на сопротивление пористой среды фильтрации полимерного раствора.

Тогда

$$f_{oi} = f_{oi}(s_i), \quad f_{wi} = \lambda_i(a_i) f_w(s_i)$$

Экспериментально функцию $\lambda_i(a_i)$ можно с учетом (2.1) определить через фактор сопротивления

$$\lambda_i(a_i) = \mu_w(c_i) / \mu_w(0) R_i$$

Известные экспериментальные данные [13] показывают, что влияние ПАВ на фазовые проницаемости также может оказаться существенным. Это влияние можно оценить по методике, изложенной в [4].

Поскольку предлагаемая модель предназначена в основном для гидродинамических расчетов процессов заводнения реальных нефтяных пластов, протекающих довольно медленно, то временем установления сорбционного равновесия пренебрегаем. Подтверждением такого предположения могут служить данные работы [14], показывающие, что размер зоны изменения концентрации полимера при фильтрации полимерного раствора через пористую среду значительно меньше размеров пласта. Аналогичный подход применен в [1, 3, 4], где принято $a = a(c, s)$.

Обычно для оценки количества сорбируемого вещества используются изотермы адсорбции, полученные в статических условиях. Однако эта методика обладает следующими недостатками.

Во-первых, в этом случае в процессе адсорбции участвует вся поверхность песка, тогда как при фильтрации часть пор занята связанной водой и остаточной нефтью.

Во-вторых, при фильтрации некоторых водных растворов агентов (например, полимеров) часть растворенного вещества может оставаться в поровом пространстве не только вследствие адсорбции, но и из-за механического улавливания отдельных молекул или их агрегатов. Эту часть сорбированного вещества нельзя оценить статическим методом определения адсорбции.

Вследствие этого наибольший интерес представляет определение величины сорбции непосредственно из экспериментов, предназначенных для изучения механизма вытеснения нефти водным раствором исследуемого вещества. Для этого можно воспользоваться следующей методикой.

Пусть в линейном однородном образце пористой среды происходит вытеснение углеводородной жидкости водой с сорбирующимися добавками.

Примем, так же как в [4], зависимость a от s линейной ($a(c, s) = a_*(c)ms$).

Рассмотрим балансовое соотношение для растворенного вещества в момент времени t , когда $c_- = c$ (c_- — концентрация раствора на выходе из образца, c — на входе в образец), а процесс вытеснения нефти практически прекращается, т. е. насыщенность на выходе из образца $s \approx s^{**}$ (s^{**} — максимальная средняя водонасыщенность образца пористой среды в данном эксперименте)

$$cQ(t) = \int_{Q_-(0)}^{Q_-(t)} c_-(Q_-) dQ_- + \int_0^L [mcs^{**} + a(c, s^{**})] \sigma dx$$

Здесь $Q(t)$ — объем закачанной в образец жидкости; $Q_-(t)$ — объем вышедшей из образца жидкости; σ , L , m — площадь поперечного сечения,

длина и пористость образца соответственно. Тогда с учетом (2.2) из (2.3) найдем $a_*(c)$

$$a_*(c) = \left\{ c[Q(t) - m\sigma Ls^{**}] - \int_{Q_-(0)}^{Q_-(t)} c_-(Q_-) dQ_- \right\} / m\sigma Ls^{**}$$

3. Для удобства решения системы (1.1)–(1.9) конечно-разностным методом введем суммарную скорость фильтрации w и исключим из системы градиенты давления. Для этого сложим уравнения (1.1) и (1.2) для $i=1$ и 2

$$(3.1) \quad \partial(Q_{w1} + Q_{o1}) / \partial x + q = 0$$

$$(3.2) \quad \partial(Q_{w2} + Q_{o2}) / \partial x - q = 0$$

откуда

$$(3.3) \quad w = Q_{w1} + Q_{w2} + Q_{o1} + Q_{o2} = w(t)$$

Из (1.7), (1.8), (3.1)–(3.3) получим

$$Q_{wi} = f_{wi} \pi_i w(t) / \mu_w(c_i) \Phi = D_{wi} w(t)$$

$$Q_{oi} = f_{oi} \pi_i w(t) / \mu_o \Phi = D_{oi} w(t)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{w}{K_i h_i \Phi}, \quad q = -w \pi_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi_1}{\Phi} \right) = w \pi_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi_2}{\Phi} \right)$$

$$\pi_i = \frac{K_i h_i}{K_i h_i}, \quad \Phi_i = \frac{f_{wi}}{\mu_w(c_i)} + \frac{f_{oi}}{\mu_o}, \quad \Phi = \pi_1 \Phi_1 + \pi_2 \Phi_2$$

Здесь D_{wi} , D_{oi} — доли водного раствора и нефти в общем потоке w .

Таким образом, задача сводится к отысканию функций $s_i(x, t)$, $c_i(x, t)$, $p(x, t)$ и $w(t)$, удовлетворяющих системе уравнений

$$(3.4) \quad m_i h_i \frac{\partial s_i}{\partial t} + w \frac{\partial D_{wi}}{\partial x} - w \pi_i F(s_j, c_j, a_j) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi_i}{\Phi} \right) = 0$$

$$(3.5) \quad \frac{\partial [h_i (m_i c_i s_i + a_i)]}{\partial t} + w \frac{\partial (c_i D_{wi})}{\partial x} - w \pi_i c_j F_j \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi_i}{\Phi} \right) = 0$$

$$(3.6) \quad a_i = a_i(s_i, c_i)$$

$$(3.7) \quad \partial p / \partial x = -w(t) / K_i h_i \Phi$$

начальным и граничным условиям

$$(3.8) \quad s_i(0, x) = s_{i0}(x), \quad c_i(0, x) = c_{i0}(x)$$

$$(3.9) \quad s_i(t, 0) = \varphi_i(t), \quad c_i(t, 0) = \psi_i(t)$$

$$(3.10) \quad p(0, t) = p_1(t), \quad p(L, t) = p_2(t)$$

Здесь j определяется условием для j в системе уравнений (1.1)–(1.9), L — длина пласта.

Интегрируя (3.7) с учетом (3.10), получим уравнение, позволяющее определить w по известному перепаду давления и распределениям s_i и c_i :

$$(3.11) \quad w(t) = [p_1(t) - p_2(t)] \left[\int_0^L \frac{dx}{K_i h_i \Phi} \right]^{-1}$$

Распределение давления при этом имеет вид

$$(3.12) \quad p(x, t) = p_1 - w(t) \int_0^x [dx / K_1 h_1 \Phi]$$

Таким образом, исходная система (1.1)–(1.9) разделяется на две: уравнения (3.4)–(3.6) описывают распределения насыщенности s_i и концентрации c_i при известной скорости $w(t)$, а (3.11), (3.12) связывают скорость фильтрации и давление.

Для решения системы (3.4)–(3.11) предлагается следующая разностная схема первого порядка по x и t («явный уголок»)

$$(3.13) \quad m^{(h)} h^{(h)} \frac{s_{ij+1}^{(h)} - s_{ij}^{(h)}}{\Delta t} + w_j \frac{D_{ij}^{(wk)} - D_{i-1j}^{(wk)}}{\Delta x} - w_j \pi^{(h)} F(s_{ij}^{(l)}, c_{ij}^{(l)}, a_{ij}^{(l)}) \frac{\Phi_{ij}^{(k)} / \Phi_{ij} - \Phi_{i-1j}^{(k)} / \Phi_{i-1j}}{\Delta x} = 0$$

$$(3.14) \quad a_{ij}^{(h)} = a_1^{(h)} (c_{ij}^{(h)}) m^{(h)} s_{ij}^{(h)}$$

$$(3.15) \quad h^{(h)} \frac{m^{(h)} c_{ij+1}^{(h)} s_{ij+1}^{(h)} + a_{ij+1}^{(h)} - m^{(h)} c_{ij}^{(h)} s_{ij}^{(h)} - a_{ij}^{(h)}}{\Delta t} + w_j \frac{c_{ij}^{(h)} D_{ij}^{(wk)} - c_{i-1j}^{(h)} D_{i-1j}^{(wk)}}{\Delta x} - w_j \pi^{(h)} c_{ij}^{(l)} F_{ij}^{(l)} \frac{\Phi_{ij}^{(k)} / \Phi_{ij} - \Phi_{i-1j}^{(k)} / \Phi_{i-1j}}{\Delta x} = 0$$

$$(3.16) \quad w_j \int_0^L R(x, j\Delta t) dx = p_1(j\Delta t) - p_2(j\Delta t)$$

$$R(x, j\Delta t) = \{K_1 h_1 \Phi(s^{(1)}(x, j\Delta t), s^{(2)}(x, j\Delta t), c^{(1)}(x, j\Delta t), c^{(2)}(x, j\Delta t))\}^{-1}$$

$$i=1, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots$$

$$(3.17) \quad s_{0j}^{(h)} = \varphi^{(h)}(j\Delta t), \quad c_{0j}^{(h)} = \psi^{(h)}(j\Delta t), \quad j=1, 2, \dots$$

$$(3.18) \quad s_{i0}^{(h)} = s_0^{(h)}(i\Delta x), \quad c_{i0}^{(h)} = c_0^{(h)}(i\Delta x), \quad i=0, 1, \dots, N$$

где k – индекс пропластка, $k=1, 2$; l определяется из условия для j в системе (1.1)–(1.9) следующим образом:

$$l=1, \quad \Phi_{ij}^{(1)} / \Phi_{ij} - \Phi_{i-1j}^{(1)} / \Phi_{i-1j} \leq 0; \quad l=2, \quad \Phi_{ij}^{(2)} / \Phi_{ij} - \Phi_{i-1j}^{(2)} / \Phi_{i-1j} \leq 0$$

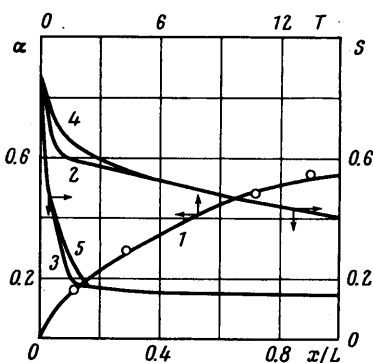
Интеграл в уравнении (3.16) подсчитывается по одной из формул численного интегрирования с заданной точностью ε .

Для контроля точности численного решения воспользуемся следующим балансовым соотношением и его конечно-разностной аппроксимацией:

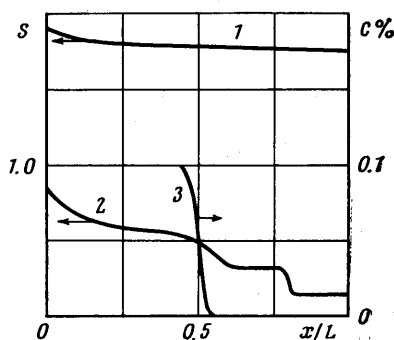
$$\begin{aligned} \eta(t) &= \int_0^L [m_1 h_1 (s^{(1)} - s_0^{(1)}) + m_2 h_2 (s^{(2)} - s_0^{(2)})] dx = \\ &= \int_0^t [Q_{01}(L, \tau) + Q_{02}(L, \tau)] d\tau \\ \eta_i &= \Delta x \left\{ \sum_{i=1}^N [m_1 h_1 (s_{ij}^{(1)} - s_0^{(1)}(i\Delta x)) + m_2 h_2 (s_{ij}^{(2)} - s_0^{(2)}(i\Delta x))] \right\} = \\ &= \Delta t \sum_{k=1}^j [Q_{01}(L, k\Delta t) + Q_{02}(L, k\Delta t)] \end{aligned}$$

где η — объем вытесненной из пласта нефти.

4. Для оценки точности допущений о выравнивании давлений и о перетоке, позволяющих свести двумерную задачу к квазиодномерной, было



Фиг. 1



Фиг. 2

проведено сравнение результатов расчетов процесса вытеснения нефти водой из двухслойного пласта в двумерной и предлагаемой квазиодномерной постановках¹. Расчеты проводились на БЭСМ-6 при следующих условиях:

$$\mu_w = 1 \text{ снз}, \mu_o = 10 \text{ снз}, \Delta p = 50 \text{ атм}, K_1 = 1 \text{ дарси}, K_2 = 0.1 \text{ дарси}$$

$$h_2/h_1 = 4, L = 500 \text{ м}, s_i(x, 0) = 0.15$$

$$f_w(s) = 1.2(s - 0.15)^2, f_o(s) = 2(0.9 - s)^{2.5}$$

Результаты этих расчетов представлены на фиг. 1. Зависимость нефтеотдачи α от времени T (в годах) представлена кривой 1. Точками на этой кривой обозначены значения α , полученные при расчете в двумерной постановке. Кривые 2, 3 иллюстрируют распределение насыщенных s_1 и s_2 вдоль пласта, полученное при решении задачи в квазиодномерной постановке, а кривые 4 и 5 — распределение осредненных по мощности насыщенных s_1 и s_2 , полученное при расчете двумерной задачи.

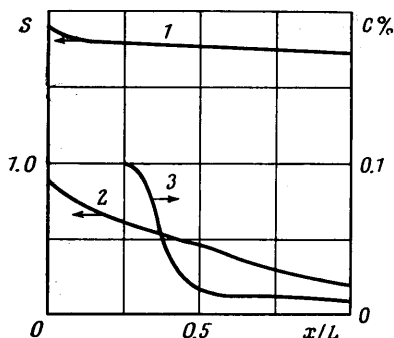
¹ Решение задачи в двумерной постановке было выполнено А. В. Королевым, которому авторы благодарны.

Сравнение этих кривых показывает, что двумерность потока оказывает некоторое влияние лишь на распределение насыщенностей вблизи нагнетательной галереи, причем влияние это невелико.

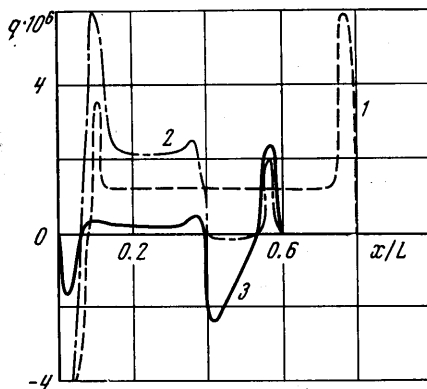
5. Для изучения влияния полимеров на вытеснение нефти из двухслойного пласта были проведены расчеты процесса вытеснения нефти раствором полиоксиэтилена WSR-301. По результатам специально проведенных экспериментов по фильтрации раствора WSR-301 фактор сопротивления и количество сорбированного вещества аппроксимировались зависимостями

$$a = ma_*(c) = m8.7 \cdot 10^{-4} c^{0.3}, \quad R = 7.25 c^{0.2} + 1$$

Уравнение (3.15) разрешимо явным образом относительно c_{ij+1} при условии, что $a_*(c)$ — линейная функция. Поэтому при произвольной зависимости $a_*(c)$ можно или решать уравнение (3.15) методом последовательных приближений или аппроксимировать $a_*(c)$ кусочно-линейной функцией. Устойчивость решения достигалась выбором шагов по x и t с



Фиг. 3



Фиг. 4

помощью численного эксперимента. Относительная погрешность в балансе не превышала 0.2%.

На фиг. 2, 3 представлено распределение насыщенностей и концентраций без учета (фиг. 2) и с учетом (фиг. 3) межслойных перетоков.

Кривые 1 и 2 характеризуют распределение s_1 и s_2 , а кривые 3 — распределение c_2 в момент времени, когда фронт вытеснения в малопроницаемом пропластке еще не достиг эксплуатационной галереи, а в высокопроницаемом пропластке процесс вытеснения почти закончен (c_1 во всем пласте равна входной концентрации, а градиент s_1 мал).

Сравнение графиков на фиг. 2 и 3 показывает, что перетоки оказывают существенное влияние на распределение жидкостей в пласте. Вследствие перетока из высокопроницаемого пропластка в малопроницаемом слое полимер оказался в зоне, куда фронт полимера в этом пропластке еще не дошел. Следует отметить, что наличие перетоков мало повлияло в этом случае на суммарную нефтеотдачу пласта.

На фиг. 4 приведен пример распределения перетоков по длине пласта в момент времени, когда фронт вытеснения еще не подошел к выходному концу (q — переток жидкости между соседними узлами сетки за один шаг по времени в поровых объемах). Переток воды при вытеснении нефти водой дается кривой 1, перетоки полимерного раствора и нефти при полимерном заводнении — кривыми 2 и 3.

Таким образом, перетоки в основном локализованы в зонах резкого изменения насыщенностей: на входном участке, в окрестности фронтов вытеснения и скачков концентрации; при этом присутствие полимера существенно повлияло не только на величину, но и на направление перетока.

Поступила 28 VI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Енто В. М., Полищук А. М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3.
2. Швецов И. А., Кукин В. В., Горбатова А. Н., Меркулов В. П., Дудин Ю. Д. Исследование методов, повышающих эффективность заводнения нефтяных пластов. В сб. «Вопросы разведки месторождений, техники и технологии в нефтедобывающей промышленности». Куйбышев, 1968. (Тр. Куйбышевск. НИИ нефт. пром-сти, № 40.)
3. Курбанов А. К. К вопросу о вытеснении нефти водными растворами ПАВ. Науч.-техн. сб. Всесоюз. нефтегаз. НИИ по добыче нефти, 1965, вып. 26.
4. Леви Б. И. О вытеснении арланской нефти водным раствором поверхностно-активных веществ и полимеров. Нефтепромысловое дело. Реферат. науч.-техн. сб. № 3. М., Всесоюз. НИИ организ., упр. и эконо. нефтегаз. пром-сти, 1974.
5. Баренблатт Г. И. О движении газожидкостных смесей в трещиновато-пористых породах. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1964, № 3.
6. Боксерман А. А., Шалимов Б. В. О циклическом воздействии на пласты с двойной пористостью при вытеснении нефти водой. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 2.
7. Соляков Ю. В., Швецов И. А., Кукин В. В., Меркулов В. П., Масленников В. А., Уркаев К. Г. Механизм фильтрации водных растворов полимеров в пористой среде. В сб. «Геология и разработка нефтяных месторождений». Тр. Гипростокнефть, 1974, вып. 23.
8. Dauben D. L., Menzie D. E. Flow of polimer solutions through porous media. J. Petrol. Technol., 1967, vol. 19, No. 8.
9. Marshall R. J., Meizner A. B. Flow of viscoelastic fluids through porous media. Industr. and Engng Chem. Fundament., 1967, vol. 6, No. 3.
10. Jennings R. R., Rogers J. H., West T. J. Factors influencing mobility control by polymer solutions. J. Petrol. Technol., 1971, vol. 23, No. 3.
11. Pye D. J. Improved secondary recovery by control of water mobility. J. Petrol. Technol., 1964, vol. 16, No. 8.
12. Claridge E. L., Bondor P. L. A graphical method for calculating linear displacement with mass transfer and contineously changing mobilities. Soc. Petrol. Engng J., 1974, vol. 14, No. 6.
13. Тумасян А. Б., Пантелеев В. Г. Влияние поверхностно-активных веществ на фазовые проницаемости пористой среды для нефти и воды. Нефт. хоз-во, 1973, № 10.
14. Оганджанянц В. Г., Полищук А. М. Об отставании фронта полимера от несущей жидкости при фильтрации раствора полимера через пористую среду. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 4.