

УДК 532.546

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИЦЕЛЛЯРНО-ПОЛИМЕРНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ОБВОДНЕННЫХ ПЛАСТОВ

НИГМАТУЛИН Р. И., ФЕДОРОВ К. М., ХАБЕЕВ Н. С.

В настоящее время считается перспективным мицеллярно-полимерный метод увеличения нефтеотдачи пластов [1]. Метод заключается в нагнетании в нефтяной пласт, ранее подвергавшийся обычному заводнению, относительно небольшого объема — оторочки мицеллярного раствора (5–10% порового объема), которая продвигается по пласту оторочкой высоковязкой буферной жидкости (водного раствора полимера). Система оторочек в свою очередь продвигается от нагнетательных к эксплуатационным скважинам водой, применяемой при обычном заводнении. Вытеснение нефти, оставшейся после заводнения в пласте, достигается за счет уменьшения коэффициента поверхностного натяжения на границах мицеллярного раствора с нефтью и водой до величины $\sigma \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ дин/см, что приводит к уменьшению количества неподвижной нефти, а также контролю подвижности жидкостей, которое достигается варьированием концентрации компонент мицеллярного раствора и буферной жидкости. Основными компонентами мицеллярных растворов являются: углеводородная жидкость (нефть или ее фракции), вода, ПАВ. Соотношение основных компонент, а также добавление солей и спиртов в водную компоненту существенно влияют на взаимодействие раствора с пластовой нефтью и водой [2]. Далее рассматривается мицеллярный раствор, растворяющий нефть, но не смешиваемый с водой, соотношение компонент в нем характерно для растворов, применяемых для увеличения нефтеотдачи пластов.

1. В [3] предложена математическая модель процесса мицеллярно-полимерного заводнения пластов в рамках изотермической фильтрации многофазной многокомпонентной несжимаемой жидкости. Модель учитывает неравновесные эффекты при многофазной фильтрации, связанные с наличием времен релаксации, необходимых для перестройки структуры потока при изменении величины гидродинамических сил, и сорбции компонент; недоступность части порового пространства для фильтрации многокомпонентных систем; вовлечение заземленной части нефти в движение; снижение подвижности воды под действием активных компонент.

С учетом данных о механизме процесса [1–4] ниже приведены участвующие в движении жидкие фазы и компоненты, которые могут в них содержаться. Так как α_i — объемная доля порового пространства, занятая i -й фазой, то приведенная плотность i -й фазы определяется соотношением

$$\rho_i = \rho_i^{\circ} m \alpha_i \quad (1.1)$$

где m — пористость среды, ρ_i° — истинная плотность i -й фазы. Так как истинные плотности компонент, участвующих в процессе, близки друг к другу, то истинные плотности фаз практически постоянны.

При фильтрации многокомпонентных систем наиболее стесненная часть порового пространства часто является недоступной для некоторых компонент из-за относительно больших размеров молекулярных агрегатов. Например, для полимера из буферной жидкости [5], мицеллы из мицеллярного раствора [4]. Недоступный поровый объем занят «связанной водой». Поэтому под пористостью и объемными концентрациями фаз в

дальнейшем понимаются их динамические значения, определяемые соотношениями

$$m = m^{\circ} (1 - S_{wr}^{\circ}), \quad S_p = \frac{S_p^{\circ}}{1 - S_{wr}^{\circ}}, \quad S_w = \frac{S_w^{\circ} - S_{wr}^{\circ}}{1 - S_{wr}^{\circ}}, \quad S_{pr} = \frac{S_{pr}^{\circ}}{1 - S_{wr}^{\circ}} \quad (1.2)$$

$$S_p = \alpha_1 + \alpha_2, \quad S_w = \alpha_3 + \alpha_4$$

Здесь S_p, S_w — общая динамическая насыщенность пористой среды углеводородной жидкостью и водой соответственно, S_{pr} — остаточная нефтенасыщенность среды, S_{wr}° — насыщенность пористой среды связанной водой. Верхний индекс нуль обозначает истинные значения величин.

Далее с целью упрощения предполагается, что концентрации компонент в подвижных и неподвижных фазах равны. В таблице в связи с этим приведены концентрации компонент для углеводородной жидкости и воды в целом.

Фазы	Объемное содержание фаз в единице объема пор	Концентрация компонент
Углеводородная неподвижная	α_1	c_{p1} — нефть
Углеводородная подвижная	α_2	c_{p2} — вода c_{p3} — ПАВ
Водная неподвижная	α_3	c_{w2} — вода
Водная подвижная	α_4	c_{w4} — соль c_{w5} — полимер

Разделение на подвижные и неподвижные части позволяет более детально описывать движение в пористой среде жидкости, истинные скорости частиц которой лежат в диапазоне от нуля до v_{max} , в отличие от более простого описания равновесной фильтрации, где всей жидкости приписывается одна усредненная скорость. Выделение подвижных и неподвижных фаз при описании совместной фильтрации воды и нефти предлагалось ранее в [6, 7].

Уравнения сохранения масс несжимаемых фаз и компонент, участвующих в процессе мицеллярно-полимерного заводнения, при отсутствии деформаций пласта имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} &= -J_{12}, & \frac{\partial \alpha_3}{\partial t} &= -J_{34} \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \nabla \alpha_2 v_2 &= J_{12} - J_{24}, & \frac{\partial \alpha_4}{\partial t} + \nabla \alpha_4 v_4 &= J_{34} + J_{24} \\ \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) c_{p1}}{\partial t} + \nabla \alpha_2 c_{p1} (v_2 + w_2) &= 0, & \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) c_{p2}}{\partial t} + \nabla \alpha_2 c_{p2} (v_2 + w_2) &= -J_{24} \\ \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) c_{p3}}{\partial t} + \nabla \alpha_2 c_{p3} (v_2 + w_2) &= -J_{03}, & \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) c_{w2}}{\partial t} + \nabla \alpha_4 c_{w2} (v_4 + w_4) &= J_{24} \\ \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) c_{w4}}{\partial t} + \nabla \alpha_4 c_{w4} (v_4 + w_4) &= -J_{04}, & \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) c_{w5}}{\partial t} + \nabla \alpha_4 c_{w5} (v_4 + w_4) &= -J_{05} \\ & & \frac{\partial a_5}{\partial t} &= J_{05} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь J_{ji} — скорость фазовых переходов из j -й ($j \neq 0$) в i -ю фазу, J_{0k} — скорость сорбции k -й компоненты; v_i, w_i — массовая скорость i -й фазы и

скорость относительного движения компонент в i -й фазе; a_5 — концентрация адсорбированного полимера.

2. Безынерционное движение подвижных фаз и компонент в пористой среде описывается законами Дарси и конвективной диффузии [8]

$$v_i = -\frac{k\alpha_i}{m\mu_i} \nabla p, \quad w_2 c_{ph} = -D_2 \nabla c_{ph}, \quad w_4 c_{wl} = -D_4 \nabla c_{wl}$$

$$(i=2, 4; k=1, 2, 3; l=2, 4, 5) \quad (2.1)$$

где k — абсолютная проницаемость пористой среды; μ_i , D_i — вязкость и коэффициент конвективной диффузии i -й фазы. Здесь принимается, что фазовая проницаемость i -й подвижной фазы равна ее объемной концентрации, а коэффициент конвективной диффузии определяется структурой порового пространства и свойствами несущей жидкости (смачивающая, несмачивающая и т. п.).

Для скорости фазовых переходов принимаются линейные кинетики, определяемые временами релаксации t_{ji} и равновесными концентрациями фаз α_{ie} и адсорбированных компонент a_{he}

$$J_{21} = -J_{12} = \frac{\alpha_2 - \alpha_{2e}}{t_{12}}, \quad J_{43} = -J_{34} = \frac{\alpha_4 - \alpha_{4e}}{t_{34}}, \quad J_{0h} = \frac{a_h - a_{he}}{t_{0h}} \quad k=3, 4, 5 \quad (2.2)$$

Скорость фазового перехода J_{24} определяет выделение воды из мицеллярного раствора, обусловленное обеднением раствора ПАВ из-за их адсорбции, и может быть задана в виде (c_{p3*} — критическая концентрация мицеллообразования)

$$J_{24} = \begin{cases} 0, & c_{p3} > c_{p3*} \\ c_{p2}/t_{24}, & c_{p3} \leq c_{p3*} \end{cases} \quad (2.3)$$

Равновесные концентрации подвижных фаз α_{2e} , α_{4e} определяются из условия перехода в равновесном случае системы уравнений (1.3) к классическим теориям [9]. Эти концентрации равны фазовым проницаемостям для углеводородной жидкости и воды, определяемым из серии экспериментов по стационарной двухфазной фильтрации. В соответствии с последними экспериментальными данными [4, 10] имеем

$$\alpha_{4e} = \alpha_{4e}(S_w, a_5) = (S_w)^{N_1}/R(a_5) \quad (2.4)$$

$$\alpha_{2e} = \alpha_{2e}(S_p, c_{p3}), \quad \alpha_{2e}(S_p, c_{p3}^0) = (S_p)^{N_2}$$

$$\alpha_{2e}(S_p, 0) = \begin{cases} 0, & S_p < S_{pr} \\ \left(\frac{S_p - S_{pr}}{1 - S_{pr}} \right)^{N^*}, & S_p \geq S_{pr} \end{cases}$$

Здесь c_{p3}^0 — начальная концентрация ПАВ в мицеллярном растворе; R — остаточный фактор сопротивления, обусловленный засорением пористой среды адсорбированным полимером [5], N_1 , N_2 — константы, характеризующие пористую среду. Таким образом, влияние ПАВ (c_{p3}) сводится к вовлечению практически всей углеводородной жидкости в движение, а адсорбированный полимер (a_5) снижает долю подвижной воды. Зависимость величины равновесной концентрации подвижной углеводородной жидкости α_{2e} от концентрации ПАВ (c_{p3}) далее аппроксимируется в виде линейной.

Равновесные концентрации адсорбированных компонент определяются изотермами равновесной сорбции [5, 11]

$$a_{3e} = a_{3e}(S_p, c_{p3}), \quad a_{4e} = a_{4e}(S_w, c_{w4}), \quad a_{5e} = a_{5e}(S_w, c_{w5}). \quad (2.5)$$

Вязкость воды определяется в основном концентрацией в ней полимера [5], вязкость углеводородной жидкости (мицеллярного раствора и нефти) — содержанием в ней воды, солей и спиртов [1]. На практике стремятся к тому, чтобы в пласте концентрация солей в жидкостях было одинакова; спирт является неадсорбируемой добавкой, т. е. его концентрация также постоянна. Поэтому в представленных ниже результатах численных расчетов вязкость углеводородной жидкости была обусловлена только содержанием в ней воды. Таким образом, имеем

$$\mu_2 = \mu_2(c_{p2}), \quad \mu_4 = \mu_4(c_{w5}) \quad (2.6)$$

причем в отсутствие инверсии мицеллярного раствора его вязкость монотонно зависит от концентрации дисперсной компоненты — воды, поэтому

$$\mu_2(0) = \mu_p, \quad \mu_2(c_{p2}^0) = \mu_m; \quad \mu_4(0) = \mu_w, \quad \mu_4(c_{w5}^0) = \mu_b \quad (2.7)$$

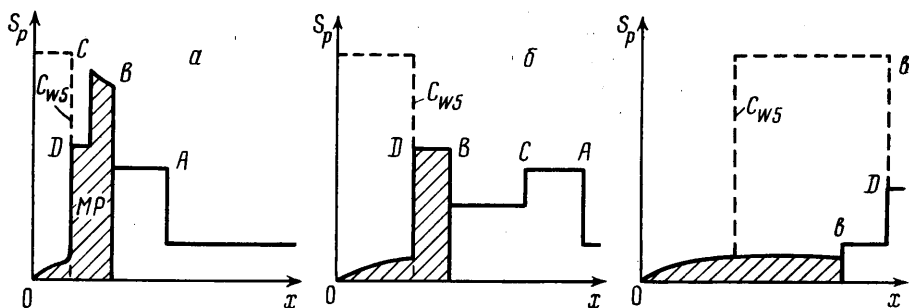
Здесь c_{p2}^0 , μ_m — начальная концентрация воды и вязкость мицеллярного раствора; c_{w5}^0 , μ_b — начальная концентрация полимера и вязкость буферной жидкости. В расчетах эти зависимости аппроксимировались линейным образом.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением плоского одномерного случая. Для удобства численных расчетов приведем систему уравнений (1.3) с учетом (2.1) — (2.3) к безразмерному виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} &= -j_{12}, & \frac{\partial \alpha_3}{\partial \tau} &= -j_{34} \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} + \frac{\partial F_p}{\partial X} &= j_{12} - j_{24}, & \frac{\partial \alpha_4}{\partial \tau} + \frac{\partial F_w}{\partial X} &= j_{34} + j_{24} \\ \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) C_{p1}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_p C_{p1}}{\partial X} &= \frac{\partial}{\partial X} d_2 \alpha_2 \frac{\partial C_{p1}}{\partial X} \\ \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) C_{p2}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_p C_{p2}}{\partial X} &= -j_{24} + \frac{\partial}{\partial X} d_2 \alpha_2 \frac{\partial C_{p2}}{\partial X} \\ \frac{\partial (\alpha_1 + \alpha_2) C_{p3}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_p C_{p3}}{\partial X} &= -j_{03} + \frac{\partial}{\partial X} d_2 \alpha_2 \frac{\partial C_{p3}}{\partial X} \\ \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) C_{w2}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_w C_{w2}}{\partial X} &= j_{24} + \frac{\partial}{\partial X} d_4 \alpha_4 \frac{\partial C_{w2}}{\partial X} \\ \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) C_{w4}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_w C_{w4}}{\partial X} &= -j_{04} + \frac{\partial}{\partial X} d_4 \alpha_4 \frac{\partial C_{w4}}{\partial X} \\ \frac{\partial (\alpha_3 + \alpha_4) C_{w5}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_w C_{w5}}{\partial X} &= -j_{05} + \frac{\partial}{\partial X} d_4 \alpha_4 \frac{\partial C_{w5}}{\partial X} \\ \frac{\partial \alpha_5}{\partial \tau} &= j_{05}, & F_p &= \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \alpha_4 \mu_2 / \mu_4}, & F_w &= 1 - F_p \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$d_i = \frac{D_i m}{l^2}, \quad j_{ji} = \frac{J_{ji} l m}{Q}, \quad C_{ik} = \frac{c_{ik}}{c_{ik}^0}, \quad \tau = \frac{Q t}{l m}, \quad X = \frac{x}{l}$$

Здесь F_p , F_w — обобщенные функции Баклея — Леверетта для углеводородной жидкости и воды соответственно; d_i , j_{ji} , τ , X — коэффициент конвективной диффузии, скорость фазовых переходов, временная и пространственная переменные, обезразмеренные с учетом характерных параметров: длины пласта l и скорости закачки жидкости Q (m^3/m^2c).



Фиг. 1

3. Численное решение системы уравнений (2.8) проводилось по явной схеме первого порядка точности типа «уголок» с ориентацией по характеристикам. Количество ячеек выбиралось таким образом, чтобы на оторочки приходилось не менее 20 ячеек.

На фиг. 1 представлена качественная картина мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти из пористой среды, основанная на анализе численных и аналитических [3] решений. Оторочка мицеллярного раствора на переднем фронте (волна B) приводит в движение всю нефть в начале пласта, которая формируется в вал (волна A), распространяющийся на пористой среде (фиг. 1, а). Буферная жидкость продвигает оторочку мицеллярного раствора (волна D), причем часть раствора удерживается в пористой среде в виде отдельной фазы за фронтом волны D . Вода из буферной жидкости, обедненная полимером за счет его адсорбции, а также часть пластовой воды, проникающая сквозь оторочку мицеллярного раствора, формируется в вал, распространяющийся первоначально в зоне первой оторочки (волна C). Вследствие малой вязкости воды скорость волны C больше скорости волны B и в некоторый момент времени вал воды догоняет вал нефти, изменяя в дальнейшем его насыщенность в области заднего фронта (фиг. 1, б). В случае больших оторочек мицеллярного раствора этого не происходит, что было проиллюстрировано экспериментально [12] и численными расчетами [3].

Согласно изложенному механизму мицеллярно-полимерного заводнения, неполное извлечение нефти из пласта происходит по следующей причине. Удерживание мицеллярного раствора и адсорбция ПАВ из него приводят к тому, что скорость волны D больше скорости волны B . При небольшом объеме оторочки мицеллярного раствора наступает момент, когда волна D обгоняет волну B , при этом происходит вытеснение уже образовавшегося водонефтяного вала оторочкой буферной жидкости (фиг. 1, в). За фронтом волны D углеводородная жидкость останавливается, так как волна B , несущая ПАВ, отстает. В результате скорость волны B падает до нуля. Момент, когда фронты волн D и B совпадают, можно считать моментом полного разрушения оторочки мицеллярного раствора. Диффузионные и неравновесные эффекты приводят к размазыванию волновой структуры процесса и ускоряют разрушение оторочек. Рассмотренный механизм процесса качественно отражает основные особенности процесса, исследованные экспериментально [12].

Ограниченный класс обобщенных функций Баклея — Леверетта, в которых фазовые проницаемости представляются только линейными функциями насыщенности, неучет эффектов сорбции полимера, диффузии компонент, неравновесности процесса приводят к кусочно-автомодельным решениям [13], согласно которым вал воды в зоне оторочки мицеллярного

раствора отсутствует и поэтому задний и передний фронты оторочки не взаимодействуют друг с другом. При этом разрушение оторочки мицеллярного раствора предлагается описывать эмпирическим параметром — интенсивностью псевдоадсорбции ПАВ.

4. Процесс мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти считается эффективным в случае, когда полное разрушение оторочки мицеллярного раствора (волна D догоняет волну B) происходит на выходе из пласта, т. е. после извлечения основных запасов нефти. Таким образом, основной целью исследования является определение эффективных размеров закачиваемых оторочек и характера влияния основных параметров процесса на эти размеры.

Оценим степень влияния диффузионных и неравновесных эффектов. Время распространения диффузионных волн t_d можно оценить следующим образом:

$$t_d = l^2/D \quad (4.1)$$

Экспериментальные исследования конвективной диффузии активных компонент в воде и углеводородной жидкости при их движении по пористой среде [14] показывают, что коэффициент конвективной диффузии имеет порядок $D \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ см²/с. Подстановка этих данных в (4.1) показывает, что время распространения диффузионных волн в реальных пластах большой протяженности на несколько порядков превышает время всего процесса, которое можно оценить как $T = lm/Q$.

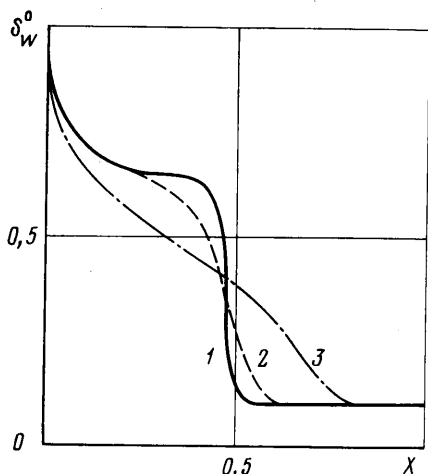
Определение характерных релаксационных времен сорбции компонент и перераспределения долей подвижных и неподвижных фаз проводится путем сравнения аналитических или численных решений, учитывающих неравновесные эффекты, с результатами экспериментов и подбора соответствующих времен, обеспечивающих совпадение расчетных и экспериментальных данных. Таким образом были оценены релаксационные времена сорбции различных ПАВ [11]. Эти результаты дают следующую оценку: $t_{03} \sim 1 - 3$ ч.

Аналогичная методика была применена для оценки релаксационных времен t_{12} , t_{34} . Решалась задача о неравновесном вытеснении нефти водой на основе системы уравнений (2.8). Равновесные концентрации подвижных фаз задавались в виде (2.6) при следующих значениях констант:

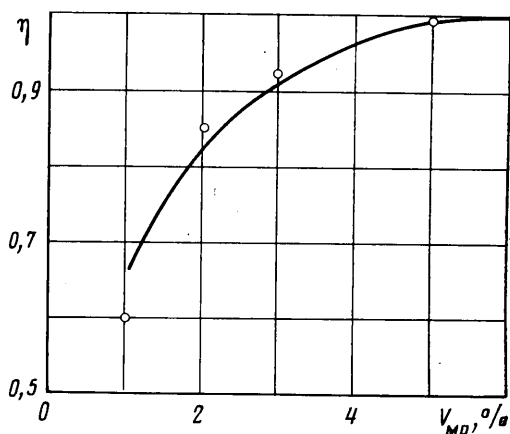
$$S_{pr}^0 = S_{wr}^0 = 0,1; \quad S_{pr} = 0,11; \quad N1 = N2 = 3 \quad (4.2)$$

Вязкости нефти μ_p и воды μ_w были равны 1 и 2 сП соответственно. В начальном состоянии $\tau = 0$ пласт был насыщен нефтью и связанной водой $\alpha_2 = 1$, $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$. На вход $X = 0$ подавалась вода при постоянной скорости закачки $\alpha_1 = S_{pr} = 0,11$; $\alpha_2 = 0$; $\alpha_3 = 0,16$; $\alpha_4 = 0,73$.

На фиг. 2 приведено распределение истинной водонасыщенности в пористой среде в момент времени $\tau = 0,3$ при отношениях релаксационных времен ко времени всего процесса $t_{34}Q/lm = 2 \cdot 10^{-3}$; $2 \cdot 10^{-2}$; $0,2$ (кривые 1, 2, 3 соответственно). Качественное сопоставление численных решений и экспериментальных данных [15] показало, что фазовый переход J_{12} протекает практически равновесно даже в случае небольших по размерам пористых моделей пласта, т. е. $t_{12} \ll t_{34}$. В расчетах этот случай реализуется при условии $t_{12}Q/lm = 2 \cdot 10^{-3}$. Равновесному случаю вытеснения нефти водой соответствует кривая 1 на фиг. 2, это решение хорошо согласуется с классическим решением Баклея — Леверетта. Численное размазывание скачка водонасыщенности в этом случае не превышает пяти ячеек разностной схемы. При двухфазном течении в коротких образцах пористой среды начинают проявляться неравновесные эффекты, приводящие к размыванию скачка водонасыщенности и, следовательно, к более раннему



Фиг. 2



Фиг. 3

прорыву воды на выходе из пористой среды. Этому случаю соответствуют большие значения отношений релаксационных времен к характерному времени процесса (фиг. 2, кривые 2, 3).

Аналогичная картина наблюдается в лабораторных ядрах при увеличении скорости фильтрации жидкостей [15]. Сопоставление с экспериментальными результатами [15] по определению зависимости времени безводной нефтеотдачи при вытеснении нефти водой из образцов пористой среды различных размеров дает следующую оценку: $t_{34} \sim 0,5-2$ ч, $t_{12} \ll t_{34}$.

5. Таким образом, при мицеллярно-полимерном заводнении реальных пластов разрушение оторочки мицеллярного раствора будет происходить в основном за счет удерживания раствора и сорбции ПАВ в пористой среде.

Экспериментально количество удержанного мицеллярного раствора и адсорбированных ПАВ определяется двумя методами. В первом методе после проведения процесса мицеллярно-полимерного заводнения пористая среда промывается углеводородной жидкостью и водой. Масса компонент мицеллярного раствора, вытесненная на этом этапе, определяет количество удержанного раствора. Затем пористая среда промывается спиртами, которые вымывают адсорбированные на скелете пористой среды ПАВ. Второй метод определения количества адсорбированных ПАВ заключается в определении скорости отставания фронта ПАВ от фронта несорбирующихся спиртов, также содержащихся в растворе. Аналитические решения показывают, что интенсивность адсорбции определяет запаздывание прорыва к выходу из пористой среды фронта ПАВ [16]. Обе методики указывают на превалирующую роль удерживания мицеллярного раствора в разрушении его оторочки [2, 12].

Для проверки адекватности математического описания процесса и уточнения механизма удерживания мицеллярного раствора в пористой среде были численно промоделированы эксперименты по мицеллярно-полимерному вытеснению остаточной нефти из песчаников Вега при различных размерах оторочек мицеллярного раствора [12]. Расчеты проводились для системы уравнений (2.8) без учета неравновесности межфазного обмена, диффузии компонент и сорбции ПАВ из мицеллярного раствора. Фазовые проницаемости воды и углеводородной жидкости для

данной среды имеют вид (2.4) при следующих значениях констант [4]:

$$S_{wr}^{\circ}=0,2; \quad S_{pr}^{\circ}=0,33; \quad N1=3,75; \quad N2=1,5 \quad (5.1)$$

Вязкости жидкостей при начальном их составе были равны

$$\mu_p=7, \quad \mu_w=1; \quad \mu_m=25,2 \text{ сП} \quad (5.2)$$

Буферная жидкость моделировалась водным раствором полиакриламида Дау Пушер с концентрацией 0,0008, что соответствует ее подвижности в пористой среде $\lambda_b=1/\mu_b R=0,033 \text{ сП}^{-1}$.

На фиг. 3 представлены результаты расчетов зависимости эффективности нефтевытеснения (η — объем вытесненной нефти в % от остаточной) от объема применяемой оторочки мицеллярного раствора (V_{mp}). Все остальные параметры, кроме размера указанной оторочки, были зафиксированы. Объем оторочки буферной жидкости был равен 40% порового объема. Таким образом, в представленных на фиг. 3 решениях разрушение оторочки мицеллярного раствора моделировалось только удерживанием, тем не менее численные решения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает вывод о превалирующей роли удерживания мицеллярного раствора в пористой среде в разрушении его оторочки. Эффективным размером оторочки мицеллярного раствора в рассматриваемом случае является размер 5% порового объема.

На фиг. 4 представлено распределение углеводородной жидкости (остаточная нефть, удержанный мицеллярный раствор) после мицеллярно-полимерного вытеснения нефти, т.е. после выхода из пористой среды оторочки буферной жидкости. Размеры оторочек мицеллярного раствора в представленных на фиг. 4 случаях порового объема недостаточны для эффективного вытеснения нефти (фиг. 4, а соответствует $V_{mp}=1\%$, а фиг. 4, б — $V_{mp}=2\%$). Коэффициент нефтевытеснения в рассматриваемых случаях представлен на фиг. 3. Анализируемые на фиг. 4 результаты расчетов иллюстрируют рассмотренную выше качественную волновую схему процесса (см. фиг. 1, в).

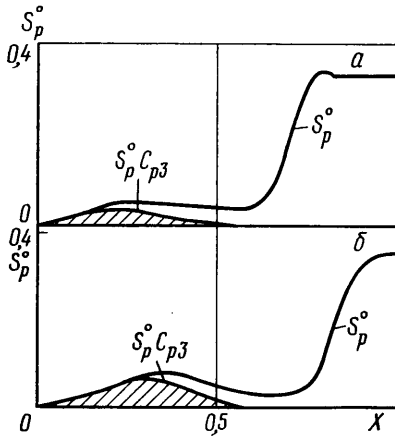
Целью данного исследования являлось, в частности, изучение волновой картины процесса и гидродинамических факторов падения его эффективности. В пласте могут существовать области с повышенным содержанием веществ (обычно различных солей), приводящих за счет химического взаимодействия к разрушению оторочки мицеллярного раствора и падению эффективности вытеснения нефти. Такие факторы также необходимо принимать во внимание при оценке эффективности процесса в реальных пластовых условиях, однако они представляют объект дополнительного исследования.

6. Анализируя причины удерживания мицеллярного раствора — основного фактора разрушения его оторочки в однородной пористой среде, можно указать и исследовать характер влияния различных параметров процесса на его эффективность. Так, выше было рассмотрено влияние размера применяемой оторочки мицеллярного раствора на коэффициент нефтевытеснения. Интенсивность удерживания раствора, т.е. величина скачка насыщенности на фронте D (фиг. 1, а), определяется размером и подвижностью оторочки буферной жидкости, следовательно, эти параметры также будут влиять на эффективность процесса.

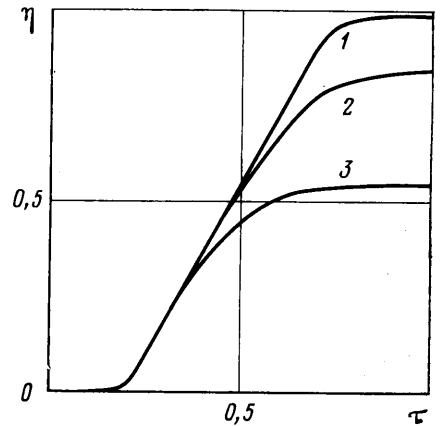
Исследование влияния размера оторочки буферной жидкости на эффективность нефтевытеснения затруднено в одномерной постановке задачи, так как в этом случае не проявляются эффекты языкообразования на заднем фронте оторочки буферной жидкости, связанные с неустойчивым вытеснением высоковязкой жидкости — раствора полимера маловязкой

водой, продвигающей систему оторочек. Количественное исследование влияния данного фактора возможно при моделировании процесса в макронеоднородных пластах.

Как уже отмечалось, подвижность буферной жидкости $\lambda_b = 1/\mu_b R$ определяется ее вязкостью и адсорбцией полимера, влияющей через фактор сопротивления. На фиг. 5 представлены численные решения, отражающие влияние соотношения подвижностей буферной жидкости и мицеллярного раствора $\lambda = \mu_b R / \mu_m$ на зависимость эффективности нефтевытеснения (η) от безразмерного объема прокачанной жидкости (τ). В данном случае размеры оторочек составляли 8 и 10% порового объема для мицеллярного раствора и буферной жидкости соответственно. Параметры жид-



Фиг. 4



Фиг. 5

костей и пористой среды аналогичны приведенным выше. Как видно из фиг. 5, эффективное вытеснение нефти достигается при значениях соотношения подвижностей, близких к единице (кривая 1 соответствует $\lambda = 1,19$), что отмечалось при экспериментальных исследованиях [17]. Повышение подвижности буферной жидкости (уменьшение λ) приводит к монотонному падению эффективности нефтевытеснения (кривые 2 и 3 соответствуют $\lambda = 0,79$ и $0,4$). Отметим, что для меньших размеров оторочки мицеллярного раствора эффективное значение λ , обеспечивающее практически полное вытеснение нефти, может быть значительно больше единицы.

Метод мицеллярно-полимерного заводнения пластов позволяет за счет вариации исходной концентрации активных компонент раствора, буферной жидкости добываться оптимальных условий извлечения нефти (размеры оторочек, их вязкость и др.) в конкретных физико-геологических условиях. Предложенная математическая модель процесса позволяет детализировать его механизм, прогнозировать результаты применения метода в реальных условиях, решать некоторые оптимизационные задачи, связанные с выбором размеров и свойств применяемых оторочек химреагентов. Общая система уравнений может быть естественным образом трансформирована для учета неоднородности течения, неоднородного строения пластов, отрицательного влияния солей, содержащихся в пластовой воде, и других факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сургучев М. Л., Шевцов В. А., Сурина В. В. Применение мицеллярных растворов для увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1977. 175 с.
2. Healy R. N., Reed R. L., Stenmark D. G. Multiphase microemulsion systems.— Soc. Petr. Eng. J., 1976, v. 16, № 3, p. 147–160.
3. Нигматулин Р. И., Сургучев М. Л., Федоров К. М., Хабеев Н. С., Шевцов В. А. Математическое моделирование процесса мицеллярно-полимерного заводнения.— Докл. АН СССР, 1980, т. 255, № 1, с. 52–56.
4. Larson R. G., Hirasaki G. J. Analysis of the physical mechanisms in surfactant flooding.— Soc. Petr. Eng. J., 1978, v. 18, № 1, p. 42–58.
5. Dawson R., Lantz R. B. Inaccessible pore volume in polymer flooding.— Soc. Petr. Eng. J., 1972, v. 12, № 5, p. 448–452.
6. Бульгин В. Я. Одновременная фильтрация двух жидкостей в нефтяном пласте.— Уч. зап. Казанск. ун-та, 1965, т. 125, кн. 8, с. 3–36.
7. Баренблатт Г. И., Енгов В. М. Неравновесные эффекты при фильтрации несмешивающихся жидкостей.— В кн.: Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск, 1972, с. 33–43.
8. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
9. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
10. Вахитов Г. Г., Оганджянц В. Г., Полищук А. М. Экспериментальное исследование влияния добавок полимера в воду на относительные проницаемости пористых сред.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 4, с. 163–167.
11. Trogus F. J., Sophany T., Schechter R. C., Wade W. H. Static and Dynamic adsorption of anionic and nonionic surfactants.— Soc. Petr. Eng. J., 1977, v. 17, № 5, 337–344.
12. Davis J. A., Jones S. C. Displacement mechanisms of micellar solutions.— J. Petrol. Technol., 1968, v. 20, № 12, p. 1415–1428.
13. Токарева Н. А., Цыпкова О. Э. О мицеллярно-полимерном заводнении нефтяных пластов в условиях необратимой сорбции.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 2, с. 63–70.
14. Wyllie M., Gregory A. Formation factor of effect uncon-solidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation.— Trans. AIME, 1953, v. 198, p. 103.
15. Оганджянц В. Г. Физические основы механизма заводнения и нефтеотдачи нефтяных коллекторов: Дис. на соискание уч. ст. докт. техн. наук. М.: ВНИИнефть, 1973.
16. Енгов В. М., Полищук А. М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 3, с. 68–76.
17. Gogarty W. B., Meabon H. P., Milton H. W. Mobility control design for miscible-type water-floods using micellar solutions.— J. Petr. Tech., 1970, № 2, p. 141–147.

Москва

Поступила в редакцию
21.V.1981