

О МИЦЕЛЛЯРНО-ПОЛИМЕРНОМ ЗАВОДНЕНИИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОБРАТИМОЙ СОРБЦИИ

Н. А. ТОКАРЕВА, О. Э. ЦЫНКОВА

(Москва)

Процесс вытеснения нефти из пластов с помощью углеводородных или водных мицеллярных растворов (МР) является в настоящее время объектом большого числа исследований [1-5]. МР представляют собой однородные системы углеводородно-водных агрегатов — мицелл, стабильность которых обеспечивается присутствием сильных нефтерастворимых поверхностно-активных веществ (ПАВ) и растворителей нефти. Поверхностное натяжение на границе МР с нефтью исчезающе мало, вязкость МР обычно превышает вязкость нефти.

В принципе МР является идеальным вытесняющим агентом, небольшой объем которого (оторочка), продвигаемый загустителем — водным раствором полимера (так называемый полимерный буфер, вслед за которым нагнетается вода) может обеспечить почти полное вытеснение нефти из однородного пласта при любой начальной нефтенасыщенности. Однако по мере продвижения по пласту мицеллярная оторочка (МО) не остается неизменной. Адсорбция ПАВ на породе пласта, взаимодействие МР с солями пластовой воды, внедрение воды в зону МО со стороны ее заднего фронта, диффузия углеводородной фазы МР в нефть снижают вытесняющую способность мицеллярных оторочек [5, 6].

В определенный момент действие диффузионно-сорбционных факторов приводит к разрушению МО — из однородной системы получается двухфазная, обычно в виде эмульсии «нефть в воде». При этом процесс вытеснения резко меняет свой характер — от близкого к поршневому, почти полного вытеснения нефти совершается переход к обычному вытеснению нефти загущенной водой.

Описание процесса мицеллярно-полимерного заводнения на базе уравнений многокомпонентной фильтрации с массообменом и сорбцией [6] затруднено неполнотой экспериментальной информации, недостаточной изученностью физико-химического механизма процесса.

В данной работе предлагается модель, построенная на основе автомоделных решений уравнений двухфазной фильтрации с учетом необратимой сорбции в зоне МО, а после ее разрушения — в зоне водного раствора полимера [7-9].

При этом в сорбционную характеристику включаются все факторы, разрушающие фильтрующийся в пласте мицеллярный раствор (разделение этих факторов на данной стадии изученности процесса представляется нецелесообразным). Учет адсорбции полимера отвечает современным представлениям о ее характере.

Следует отметить, что в целом рассматриваемая задача не является автомоделной, но она позволяет осуществить стыковку двух областей существования решения, в каждой из которых искомые функции зависят от переменной вида $(x-x_i)(t-t_i)^{-1}$ ($i=1, 2$).

Полученная картина распределения насыщенностей до и после разрушения оторочки мицеллярного раствора согласуется с экспериментальными наблюдениями. Модель отражает основные эффекты, характерные для реального протекания рассматриваемого процесса.

1. Пласт предполагается однородным, начальное распределение насыщенностей — равномерным, жидкость — несжимаемой, движение — одномерным с плоской симметрией. Капиллярные и гравитационные силы из рассмотрения исключены. В каждой из характерных областей присутствуют не более чем две жидкостные фазы. В пласт закачивается оторочка МР и вслед за ней — оторочка водного раствора полимера, подвижность которого равна подвижности МР. Вся рассматриваемая область фильтра-

ции состоит из следующих характерных зон: зоны водного раствора полимера, зоны мицеллярного раствора, зоны совместного движения нефти и воды, формирующейся между мицеллярной оторочной и фронтом вытеснения, невозмущенной зоны.

Уравнения для насыщенности и концентрации записываются в форме

$$(1.1) \quad m \frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial F}{\partial x} = 0, \quad m \frac{\partial (cS + a/m)}{\partial t} + U \frac{\partial cF}{\partial x} = 0$$

Здесь S — насыщенность раствором реагента или водой, c — концентрация адсорбирующейся компоненты реагента (полимера в зоне буфера, ПАВ в зоне МО), a — количество адсорбированного реагента в единице объема пласта, $F = F(S, c)$ — функция Леверетта, U — скорость фильтрации.

Далее величины в зоне МО обозначаются индексом M , в зоне раствора полимера — P , в зоне, свободной от реагентов — W .

Адсорбция предполагается равновесной и подчиняющейся закону Генри, десорбция — несущественной.

Имеем

$$(1.2) \quad a_M = \Gamma_M S_M c_M \quad (\Gamma_M = \text{const})$$

Предполагается, что до разрушения МО адсорбция полимера полностью подавлена присутствием МР. В связи с этим из рассмотрения исключено описанное в работе [10] внедрение обедненной полимером воды в зону МО со стороны заднего фронта.

После разрушения МО выполняется соотношение

$$(1.3) \quad a_P = \Gamma_P S_P^\circ c_P \quad (\Gamma_P = \text{const})$$

Здесь S_P° — максимальная насыщенность раствором полимера при вытеснении им нефти.

Фазовые проницаемости для нефти и МР в зоне МО предполагаются линейными функциями насыщенности. Поскольку вязкость МР превышает вязкость нефти, вытеснение при этом носит поршневой характер (график функции F_M по насыщенности — вогнутая кривая).

Обозначив максимальную насыщенность в зоне мицеллярного раствора S_M° (S_M° близко к единице) и исходную концентрацию ПАВ в мицеллярном растворе через c_M° , выпишем автоматическое решение задачи о вытеснении нефти МР, справедливое до момента разрушения МО.

До полного внедрения МО в пласт оно имеет вид

$$(1.4) \quad \begin{aligned} S_M &= S_M^\circ, \quad c_M = c_M^\circ \quad (0 < x < u_M t) \\ S_W &= S_1 \quad (u_M t < x < u_1 t) \\ S_W &= S_0 \quad (u_1 t < x < l) \end{aligned}$$

Здесь S_0 — начальная водонасыщенность, S_1 — водонасыщенность в области постоянной нефте- и водонасыщенности (водонефтяной «вал», формирующейся перед МО). Величина S_1 определяется из условий сохранения на фронте концентрации МО, u_M — скорость фронта концентрации МО, u_1 — скорость фронта водонефтяного вала, являющегося фронтом вытеснения, l — длина пласта.

Условия на фронте концентрации МО и скорость фронта вытеснения запишутся в виде

$$(1.5) \quad u_M = \frac{U}{(m + \Gamma_M) S_M^\circ} \quad \frac{U}{m} \frac{1 - F_W(S_1)}{S_M^\circ - S_1} = \frac{U}{(m + \Gamma_M) S_M^\circ}$$

$$(1.6) \quad u_1 = \frac{U}{m} \frac{F_w(S_1) - F_w(S_0)}{S_1 - S_0}$$

После завершения нагнетания МР вместо верхней строчки в (1.4) следует написать

$$(1.7) \quad \begin{aligned} S_M &= S_M^\circ, c_M = c_M^\circ \quad (u_M^\circ(t - t_M) < x < u_M t) \\ S_P &= S_M^\circ, c_P = c_P^\circ \quad (0 < x < u_M^\circ(t - t_M)) \end{aligned}$$

$$(1.8) \quad t_M = \Delta_M m U^{-1}, u_M^\circ = U(m S_M^\circ)^{-1}$$

Здесь t_M — время полного внедрения МО в пласт, u_M° — скорость заднего фронта МО, Δ_M — исходный объем (длина) МО.

Следует подчеркнуть, что скорость u_M в отличие от u_M° не является характеристической.

Текущая протяженность зоны МО в соответствии с (1.5), (1.7), (1.8) определится равенством

$$\Delta_{Mt} = \left(\Delta_M - \frac{U \Gamma_M t}{m(m + \Gamma_M)} \right) \frac{1}{S_M^\circ}$$

В момент $t = t_{rM} = \Delta_M m(m + \Gamma_M)(U \Gamma_M)^{-1}$ величина Δ_{Mt} обращается в нуль, т. е. в принятых предположениях МО полностью разрушается.

Разрушение происходит в точке

$$(1.9) \quad x_{rM} = \Delta_M (S_M^\circ \Gamma_M)^{-1}$$

2. Если $x_{rM} < l$, то для $t > t_{rM}$, $x > x_{rM}$ главным вытесняющим агентом становится полимер. В этой области строится решение, описывающее вытеснение нефти раствором полимера.

Начальное (при $t = t_{rM}$) распределение насыщенностей в рассматриваемой области представляется ступенькой насыщенностей $S_w = S_1$ и $S_w = S_0$ с границей $x_1 = u_1 t_{rM}$.

Автомодельное решение системы (1.1) в зоне вытеснения нефти раствором полимера может быть представлено в виде

$$(2.1) \quad x - x_{rM} = \frac{U}{m} \frac{\partial F_p}{\partial S}(t - t_{rM}), \quad c_p = c_p^\circ \quad (S_p^* < S_p < S_p^\circ)$$

Фронт концентрации полимера движется с характеристической скоростью

$$(2.2) \quad u_p = \frac{U}{m} \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p^*}$$

Насыщенность на фронте концентрации изменяется скачком от S_p^* до S_2 , где величины S_p^* и S_2 находятся из условий сохранения насыщенности и концентрации, представленных в форме

$$(2.3) \quad \frac{F_p(S_p^*, c_p^\circ) - F_w(S_2)}{S_p^* - S_2} = \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p^*}$$

$$\frac{F_p(S_p^*, c_p^\circ)}{S_p^* + S_p^\circ \Gamma_p m^{-1}} = \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p^*}$$

Переход от S_2 к «начальному» значению насыщенности может происходить как непрерывно, так и скачком в зависимости от взаимного расположения точек S_2 и S_1 на кривой $F_w(S)$.

На фиг. 1 представлены типичные зависимости функций Лаврета F_w, F_p, F_M от насыщенности и показано графическое определение величин S_1, S_2, S_p^* в соответствии с (1.5) и (2.3).

Здесь S_1 и S_2 находятся на выпуклой части кривой $F_w(S)$ и переход от S_2 к S_1 осуществляется непрерывно.

Имеем

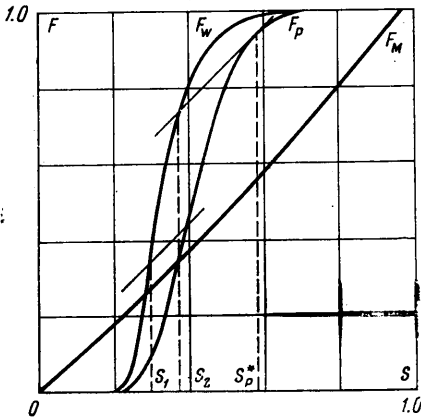
$$\begin{aligned}
 S &= S_2, \quad \frac{U}{m} \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p} (t-t_{rM}) < x-x_{rM} < \\
 &< \frac{U}{m} \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{S_2} (t-t_{rM}) \\
 (2.4) \quad x-x_{rM} &= \frac{U}{m} \frac{dF_w}{dS} (t-t_{rM}) \quad (S_2 > S > S_1) \\
 S &= S_1, \quad x_{rM} + \frac{U}{m} \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{S_1} (t-t_{rM}) < x < u_1 t \\
 S &= S_0, \quad u_1 t < x < l
 \end{aligned}$$

При скачкообразном изменении насыщенности от S_2 до S_1 вместо (2.4) следует написать

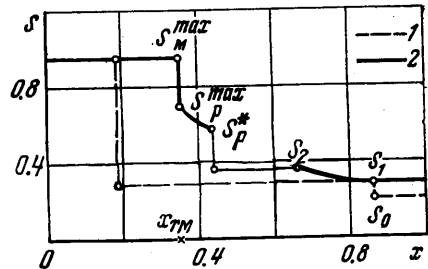
$$\begin{aligned}
 S &= S_2, \quad u_p(t-t_{rM}) < x-x_{rM} < u_2(t-t_{rM}) \\
 (2.5) \quad S &= S_1, \quad x_{rM} + u_2(t-t_{rM}) < x < u_1 t \\
 S &= S_0, \quad u_1 t < x < l
 \end{aligned}$$

$$(2.6) \quad u_2 = \frac{U}{m} \frac{F_w(S_2) - F_w(S_1)}{S_2 - S_1}$$

На фиг. 2 показано трехступенчатое распределение насыщенностей вытесняющей фазы по длине пласта, отвечающее моменту времени до разрушения МО и построенное в соответствии с (2.4) (кривая 1).



Фиг. 1



Фиг. 2

Там же представлено распределение насыщенностей, описанное соотношениями (2.1)–(2.4), выполняющимися после разрушения мицеллярной оторочки (кривая 2). Оно содержит полностью промытую зону $S_M = S_M^0$, неподвижный скачок насыщенности от S_M^0 до S_p^* , непрерывное распределение насыщенностей от S_p^* до S_p^* в зоне раствора полимера, скачок от S_p^* до S_2 на фронте концентрации полимера, непрерывное изменение

насыщенностей от S_2 до S_1 , область $S_1 = \text{const}$, скачок от S_1 до S_0 , область $S_0 = \text{const}$.

Нетрудно видеть, что передний фронт области, в которой насыщенность изменяется от S_2 до S_1 , имеет скорость, более высокую, чем скорость фронта вытеснения u_1 .

$$(2.7) \quad \frac{U}{m} \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{s_1} > u_1$$

$$(2.8) \quad u_2 > u_1$$

Здесь (2.7) — случай непрерывного изменения, (2.8) — скачок.

Этот фронт может догнать фронт вытеснения до выхода последнего из пласта.

В случае (2.8) фронт второй области постоянной нефтенасыщенности догонит фронт первой области в момент t_c , определяемый из равенства

$$(2.9) \quad u_1 t_c = x_{rM} + u_2 (t_c - t_{rM})$$

С учетом выражений для t_{rM} , x_{rM} и (2.9) координата точки, в которой оба фронта сливаются, и новая скорость фронта вытеснения могут быть записаны в форме

$$(2.10) \quad x_c = \frac{\Delta_M (\Gamma_M + m)}{U \Gamma_M} \frac{u_1 (u_2 - u_M)}{(u_2 - u_1)}$$

$$(2.11) \quad u_3 = \frac{U}{m} \frac{F_w(S_2) - F_w(S_0)}{S_2 - S_0}$$

В случае непрерывного изменения насыщенности между S_2 и S_1 картина получается несколько более сложной.

Введем в рассмотрение насыщенность S_3 согласно равенству

$$(2.12) \quad \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{s_3} = \frac{F_w(S_3) - F_w(S_0)}{S_3 - S_0}$$

Если $S_2 > S_3$, то существует интервал времени (t_1, t_3) , в течение которого насыщенность за фронтом вытеснения увеличивается от S_1 до S_3 , а скорость фронта вытеснения — от u_3 до u_4 , где

$$(2.13) \quad u_4 = \frac{U}{m} \frac{F_w(S_3) - F_w(S_0)}{S_3 - S_0}$$

Далее скорость фронта остается постоянной, и за фронтом сохраняется зона непрерывного изменения насыщенностей от S_3 до S_2 , переходящая в область $S_2 = \text{const}$.

Левая граница интервала (t_1, t_3) определяется моментом совпадения движущегося со скоростью u_1 фронта вытеснения с характеристической точкой насыщенности S_1 .

Величина t_1 находится аналогично t_c — в равенстве (2.9) вместо скорости u_2 нужно взять $(U/m) (dF_w/dS)_{s_1}$.

Имеем

$$(2.14) \quad t_1 = \left[x_{rM} - t_{rM} U m^{-1} \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{s_1} \right] \left[u_1 - U m^{-1} \left(\frac{dF_w}{dS} \right)_{s_1} \right]^{-1}$$

Выпишем далее уравнение для зависимости насыщенности от времени непосредственно за фронтом вытеснения

$$(2.15) \quad \frac{U}{m} \int_{t_1}^t \frac{F_w(S) - F_w(S_0)}{S - S_0} dt' + u_1 t_1 = \frac{U}{m} \frac{dF_w}{dS} (t - t_1)$$

Здесь значение t_3 — правая граница переходного интервала — определяется из (2.15) и (2.12).

В случае, когда $S_3 \geq S_2$, равенства (2.14) и (2.15) остаются в силе, но предельная насыщенность за фронтом вытеснения будет равна S_2 , а предельная скорость фронта вытеснения — u_3 .

Величина t_2 , отвечающая тому моменту, когда скорость распространения насыщенности S_2 совпадает со скоростью фронта вытеснения, определится из (2.15). При $t > t_2$ фронт вытеснения является здесь фронтом области постоянной водонасыщенности S_2 , распространяющимся по невозмущенной зоне.

3. Пусть исходный объем (длина) полимерного буфера равен Δ_P . В момент $t = t_{rM} + t_P$, где $t_P = \Delta_P U m^{-1}$, вся полимерная оторочка входит в область $x > x_{rM}$.

Если для простоты предположить, что после достижения задним фронтом полимерного буфера точки x_{rM} функция распределения потоков на этом фронте не терпит разрыва и в некоторой области за фронтом сохраняет прежний вид, то положение заднего фронта в момент $t = t_{rM} + t_P + t_-$ может быть установлено из уравнения

$$(3.1) \quad \int_{x_{rM}}^{x_p^0} S dx = \frac{U}{m} t_-$$

Из равенств (3.1) следует, что насыщенность S_- на выделенном заднем фронте полимерной оторочки удовлетворяет уравнению

$$(3.2) \quad F_p = S_- \frac{\partial F_p}{\partial S} = \frac{t_P}{t_P + t_-}$$

Сравнивая (3.2), (2.2) и (2.3), нетрудно получить, что с ростом t_- величина S_- монотонно убывает, достигая значения S_p^* при некотором $t_- = t_{rP} < \infty$.

Скорость заднего фронта полимерной оторочки

$$u_p^0 = \frac{U}{m} \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_-}$$

не является характеристической. Она возрастает со временем.

Текущая протяженность зоны раствора полимера определится выражением

$$(3.3) \quad \Delta_{Pt} = \frac{U}{m} (t_P + t_-) \left[\left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p^*} - \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_-} \right]$$

При $t_- = t_{rP}$ имеем $S_- = S_p^*$, и согласно (3.3) $\Delta_{Pt} = 0$. Из (2.3) и (3.2) нетрудно получить выражения для момента разрушения полимерного буфера t_{rP} и соответствующей координаты x_{rP}

$$(3.4) \quad t_{rP} = t_{rM} + \frac{t_P m}{S_p^0 \Gamma_P} \left(\frac{\partial F_p}{\partial S} \right)_{S_p^*}^{-1}$$

$$x_{rP} = x_{rM} + \Delta_P m (S_p^0 \Gamma_P)^{-1}$$

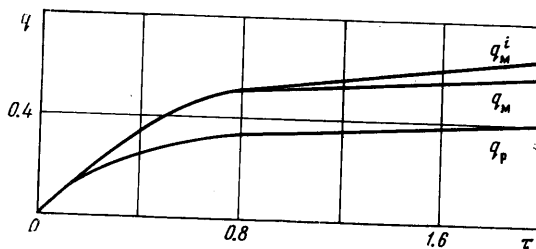
Из (3.4) и выражения для x_{rM} можно получить условие, связывающее исходные объемы мицеллярной и полимерной оторочек, а также констан-

ты Генри для МР и раствора полимера, при выполнении которого полимерный буфер разрушается до выхода из пласта

$$(3.5) \quad \frac{\Delta_P}{l} < \left(1 - \frac{\Delta_M m}{l \Gamma_M S_{M^0}}\right) \frac{\Gamma_P S_P^0}{m}.$$

Очевидно, что положительность скобки в правой части (3.5) есть условие разрушения мицеллярной оторочки внутри пласта.

4. При закачке МР в слоистый пласт распределение реагентов по слоям в соответствии с проницаемостями последних может привести к тому, что в высокопроницаемые слои попадает «избыточное», а в малопроницаемые слои [6, 11] недостаточное количество реагентов.



Фиг. 3

В итоге из высокопроницаемых слоев на выходе извлекается «неизрасходованный» МР и раствор полимера, а в малопроницаемых слоях опасное выше разрушение оторочек происходит вблизи от входа в пласт. Поэтому оптимальным объемом МО может оказаться объем, минимально необходимый для полного вытеснения нефти из высокопроницаемых слоев. При этом дорогостоящий МР не будет расходоваться на неэффективное вытеснение нефти из малых областей в слоях низкой проницаемости.

Представленные на фиг. 2 распределения насыщенностей соответствуют случаю закачки МО в двуслойный пласт, пропластки которого имеют равные мощности, проницаемости $k_1=0,2$ дарси, $k_2=1$ дарси. При этом объем МО составляет 0.06 объема пор пласта, $F_w=(S-0.2)^2/[(S-0.2)^2+0,1(0.7-S)^2]$,

$$F_P=(S-0.2)^2/[(S-0.2)^2+0.5(0.7-S)^2],$$

$$F_M=S/[S+1.2(0.95-S)^2].$$

На фиг. 3 для того же пласта показана нефтотдача q_M в зависимости от количества прокачанного порового объема жидкости τ , рассчитанная в соответствии с приведенными в п. 1, 2 соотношениями. Приведена также нефтотдача q_M^i в идеальном случае отсутствия адсорбции, а также нефтотдача q_P при полимерном заводнении ($\Delta_M=0$).

Отличие q_M от q_P говорит о существенных преимуществах мицеллярного заводнения перед полимерным, отличие q_M от q_M^i показывает влияние диссипативных факторов (адсорбции) на эффективность процесса мицеллярного заводнения в слоистом пласте.

Поступила 6 III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Davis J. A., Jones S. C. Displacement mechanisms of micellar solutions. J. Petrol. Technol., 1968, vol. 20, No. 12.
2. Gogarty W. B., Tosch W. C. Miscible — type water flooding. Oil recovery with micellar solutions. J. Petrol. Technology, 1968, vol. 22, No. 12.

3. *Забродин Д. П., Коцонис А. Н., Старковский А. В., Арушанов М. П.* Применение мицеллярных растворов для увеличения нефтеотдачи пластов при заводнении. М., ВНИИОЭНГ, 1975.
 4. *Сургучев М. А., Шевцов В. А., Сурина В. В.* Применение мицеллярных растворов для увеличения нефтеотдачи пластов. М., «Недра», 1977.
 5. *Лютин Л. В., Бурдынь Т. А., Олейник П. П., Широков В. А.* О механизме вытеснения нефти углеводородными мицеллярными растворами. ВНИИОЭНГ. Сер. Нефтепромысловое дело, 1975, № 7.
 6. *Kossack C. A., Vilhartz H. L.* The sensitivity of micellar flooding to reservoir heterogeneity. Paper SPE 5808 presented at SPE-AIME. Symposium on Improved Oil Recovery Tulsa Ohla, 22-24, March 1976.
 7. *Patton J. T., Coats K. H., Colegrove G. T.* Prediction of polymer flood performance. Soc. Petrol. Engrs. J., 1971, vol. 11, No. 1.
 8. *Claridge E. L., Bondor P. L.* A Graphical method for calculation linear displacements with mass transfer and continuously changing mobilities. Soc. Petrol. Engrs J., 1974, vol. 14, No. 6.
 9. *Енто в В. М., Полищук А. М.*, О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3.
 10. *Цыпкина О. Э., Токарева Н. А.* Влияние адсорбции на процесс мицеллярного заводнения. В сб. науч. тр. «Добыча нефти», вып. 61, М., Всесоюз. нефтегаз. науч.-исслед. ин-т, 1977.
 11. *Цыпкина О. Э.* Об эффективности мицеллярного заводнения слоисто-неоднородных пластов. В сб. науч. тр. «Добыча нефти», вып. 60, М., Всесоюз. нефтегаз. науч.-исслед. ин-т, 1977.
-