

УДК 532.546

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИЦЕЛЛЯРНО-ПОЛИМЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫЙ НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ

Н. С. Хабеев, Н. А. Иногамов*

Университет Королевства Бахрейн, 32038 Манама, Бахрейн

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 117234 Москва

E-mail: nail@sci.uob.bh

Исследована динамика вытеснения нефти из слоисто-неоднородного по мощности пласта, состоящего из двух гидродинамически сообщающихся пропластков с различной абсолютной проницаемостью. Приведены результаты численных расчетов. Изучено влияние основных определяющих факторов на динамику вытеснения нефти.

Ключевые слова: мицеллярно-полимерное воздействие, фильтрация, слоисто-неоднородный пласт, численное моделирование.

Одним из перспективных методов повышения нефтеотдачи пластов является мицеллярно-полимерное заводнение [1]. За счет малого поверхностного натяжения на границе мицеллярного раствора с пластовыми жидкостями в движение приводится практически вся нефть. Большая вязкость мицеллярного раствора и нагнетаемой вслед за ним оторочки буферной жидкости (водного раствора полимера) по сравнению с вязкостью нефти позволяет увеличить площадь охвата пласта вытеснением.

Как известно, реальные нефтеносные пласты характеризуются неоднородностью, причем одним из основных видов неоднородности пористой среды является изменение проницаемости по разрезу монолитных пластов [1]. Рассмотрим профильную задачу [2] в двумерной области. Математическая модель мицеллярно-полимерного заводнения приведена в работе [3]. В [4] эта модель обобщена на случай слоисто-неоднородных пластов, а в [5] — на случай площадного заводнения в системе скважин.

В настоящей работе приведены результаты численного исследования процесса мицеллярно-полимерного заводнения на основе моделей [3–5] для случая слоисто-неоднородного пласта.

1. Исследование вытеснения нефти из слоисто-неоднородного пласта при заданном объемном расходе нагнетаемой жидкости. Рассмотрим различные режимы заводнения в порядке возрастания их сложности.

Сначала исследуем процесс вытеснения нефти водой в неоднородном по мощности нефтяном резервуаре, состоящем из двух пропластков с различной абсолютной проницаемостью (рис. 1). Будем решать задачу с заданным объемным расходом нагнетаемой жидкости $Q(t)$. Пусть область фильтрации представляет собой квадрат ($l_y = l_x$). Выберем параметры пористой среды и гидродинамические параметры фильтрующихся жидкостей (нефти и воды): $(s_\alpha^0)^* = 0$, $k_\alpha = (s_\alpha^0)^2$, $\mu_\alpha = \text{const}$, $s_{10}^0 = 1$. Положим также $Q(t) = 1$, $l_x = l_y = 1$, $k^{(1)} = 1$. На рис. 2 показаны изолинии нефтенасыщенности в момент закачки объема воды, равного $0,2V_{\text{пор}}$, для однородного ($k^{(2)} = k^{(1)} = 1$) и неоднородного ($k^{(2)} = 6$) пластов.

В отличие от однородного пласта динамика вытеснения в неоднородном по мощности пласте имеет следующие особенности: в высокопроницаемом слое жидкости движется

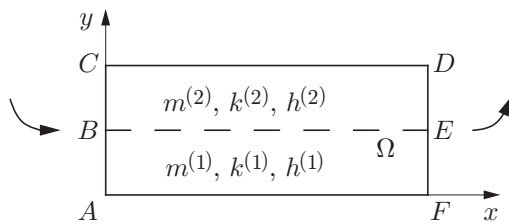


Рис. 1

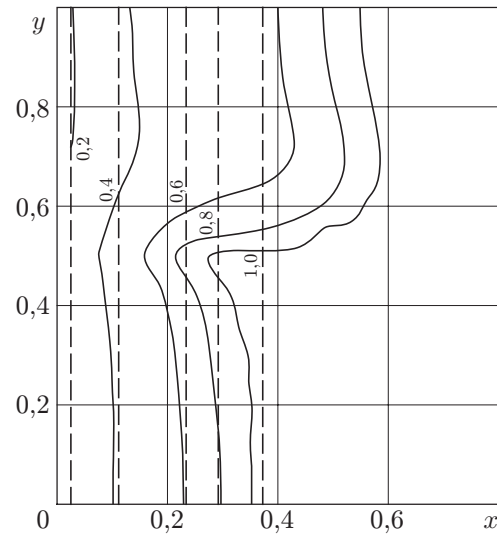


Рис. 2

Рис. 1. Схема слоисто-неоднородного коллектора, состоящего из двух пропластков

Рис. 2. Изолинии нефтенасыщенности при вытеснении нефти водой из однородного ($k^{(2)} = k^{(1)} = 1$) и неоднородного ($k^{(2)} = 6, k^{(1)} = 1$) пластов при $Q = 1$ ($p(1, y, t) = 1$), $s_{10}^0 = 1, (s_{1B}^0)^* = (s_2^0)^* = 0, \mu_n = 1,8, \mu_v = 1, t = 0,2$:

сплошные линии — неоднородный пласт; штриховые — однородный пласт

быстрее, и хотя в нижнем низкопроницаемом слое значение абсолютной проницаемости такое же, как в однородном слое, жидкости в нем движутся медленнее. По условию задачи количество жидкости, закачиваемой в каждый пропласток, как в однородном, так и в неоднородном случае одинаково. Поэтому меньшая скорость вытеснения в нижнем пропластке по сравнению со скоростью в однородном слое объясняется перетоком части жидкости из этого слоя в верхний пропласток. Следовательно, в пласте с большей проницаемостью фильтрационный поток больше. Тем не менее со временем вытеснением охватывается и вся малопроницаемая зона. При этом согласно результатам численных расчетов скорость вытеснения в нижнем пропластке с меньшей проницаемостью уменьшается. Например, определим скорость перемещения точки, в которой находится только нефть ($s^0 = 1$), при $y = 0$. Эту точку примем в качестве положения условного фронта вытеснения. Горизонтальная координата $x_{\text{ф}}$ этой точки со временем изменяется следующим образом: при $t = 0,2$ $x_{\text{ф}} = 0,35$, при $t = 0,5$ $x_{\text{ф}} = 0,57$, при $t = 1$ $x_{\text{ф}} = 0,81$. Такое медленное движение происходит вследствие того, что со временем распределение нефтенасыщенности в вертикальном сечении пласта становится все более неоднородным: в высокопроницаемом слое она меньше, относительное количество воды в верхнем слое увеличивается, а значит, вытеснение водонефтяной смеси в нем происходит быстрее. Поэтому доля закачиваемой в пласт жидкости, устремляющейся в более высокопроницаемый слой, со временем возрастает. Этот эффект, немонотонно зависящий от времени, усиливается в период с момента прорыва вытесняющей воды в верхний пропласток до момента ее прорыва в нижний пропласток.

Изолинии насыщенности фаз имеют изгиб на границе, разделяющей зоны с различной абсолютной проницаемостью. Из рис. 2 следует, что окрестность этой границы представляет собой область, в наименьшей степени охваченную вытесняющим воздействием. Это является следствием того, что в низкопроницаемом пропластке указанной области жид-

кость не только движется вперед, как в случае однородной пористой среды, но и перетекает в высокопроницаемый верхний слой. В результате скорость движения этой части потока к продуктивной скважине уменьшается, а жидкие частицы в ней имеют более длинные траектории. Указанная выше форма изолинии, расположенной в области высокопроницаемого слоя между “фронтами вытеснения”, объясняется также имеющимся перетоком снизу в этой области. Переток возникает из-за более низкого давления в этой области пропластка, имеющего большую проницаемость, в силу фильтрации в ней менее вязкой смеси. При этом важно отметить, что перетекает только нефть, так как только она имеется в этой зоне в низкопроницаемом пропластке. Протяженность такой области увеличивается до момента прорыва.

Анализ расчетных зависимостей относительного количества извлеченной нефти (основного показателя нефтедобычи) от времени $\eta(t)$ для области фильтрации квадратной формы при различных значениях абсолютной проницаемости $k^{(2)}$ ($k^{(1)} = 1$) показывает, что, поскольку первоначально пласт содержал только нефть, нефтеотдача происходит сразу. Функция η является линейной до момента прорыва. При $t > t_{пр}$ значение η тем больше, чем меньше отличается значение $k^{(2)}$ от значения $k^{(1)} = 1$. При этом зависимость η от k является нелинейной. Сначала различие значений нефтеотдачи неоднородного и однородного пластов возрастает, но затем уменьшается (после прорыва воды в низкопроницаемый слой). В случае $k^{(2)} = 2$ при $t = 2$ максимальная нефтедобыча составила 78 % начальных запасов. В некоторой степени это объясняется допущением модели, согласно которому характер вытеснения не зависит от скорости фильтрационного течения. На основании проведенного анализа можно утверждать, что характер вытеснения аналогичен характеру вытеснения в случае изолированных пропластков с одномерной фильтрацией при различных значениях объемного расхода закачиваемой в них воды.

Следующим исследованным режимом заводнения является вытеснение нефти водой из прямоугольной области, что более соответствует реальному строению нефтеносных пластов (начальные, граничные условия задачи и замыкающие соотношения были такие же, как в рассмотренном выше случае). Прямоугольник имел следующие размеры: $l_x = 1$, $h = 0,06$. На рис. 3 показана динамика вытеснения при $k^{(2)} = 4$ в различные моменты времени. (На рис. 3–8 штриховая линия — граница, разделяющая области с различной проницаемостью.) Движение смеси в низкопроницаемом слое близко к одномерному до момента начала истечения воды на выходе из высокопроницаемого пропластка.

Сравнение результатов проведенного численного моделирования заводнений при различных значениях $k^{(2)}$ с результатами серии расчетов фильтрации в квадратной области показывает, что в слоях с различной проницаемостью максимальное относительное расстояние между задними границами областей, поровое пространство которых заполнено только нефтью, существенно зависит не только от степени неоднородности проницаемости, но и от формы резервуара. Например, для квадратной области при $k^{(2)} = 8$, $t = 0,2$ это расстояние составляет 0,2, в то время как для прямоугольной ($h = 0,06$) оно равно 0,51. Кроме того, если для квадратной области при $k^{(2)} = 8$ и $k^{(2)} = 6$ это расстояние меняется незначительно, то в случае заводнения рассматриваемой прямоугольной области изменение более значительно. Из анализа численных решений следует также, что в случае прямоугольной области время выхода воды из высокопроницаемого пропластка более существенно зависит от степени неоднородности, чем в случае квадратной области, для которой это время практически не меняется в рассмотренном диапазоне значений $k^{(2)}$. Определялся коэффициент текущей нефтеотдачи для прямоугольной области при постоянной абсолютной проницаемости ее верхнего слоя. Если при $k^{(2)} = 2$, $t = 2$ максимальная нефтеотдача составляла 79 % начальных запасов (как и в случае квадратного пласта), то

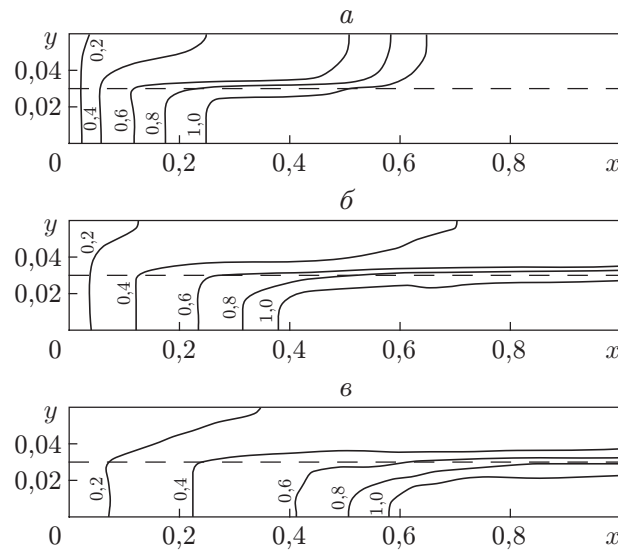


Рис. 3. Изолинии нефтенасыщенности в неоднородном пласте прямоугольной формы при заданном расходе ($Q = 1$) вытесняющей воды на входе и $k^{(2)} = 4$:
 a — $t = 0,2$; $б$ — $t = 0,5$; $в$ — $t = 1,0$

для других, бóльших значений $k^{(2)}$ она существенно меньше. Например, при $k^{(2)} = 8$ для квадратной области $\eta(2) = 0,75$, для прямоугольной $\eta(0,2) = 0,64$. Однако, по-видимому, при больших значениях времени влияние степени неоднородности и формы нефтеносного коллектора уменьшается.

Ниже рассматривается процесс мицеллярно-полимерного заводнения неоднородного по мощности нефтяного коллектора, представляющего собой два гидродинамически связанных пропластка с различной абсолютной проницаемостью. Геометрическая форма пропластков соответствовала строению резервуара для последнего из рассмотренных режимов вытеснения нефти водой ($l_x = 1, h = 0,06$). Решалась задача с заданным объемным расходом нагнетаемой жидкости. Так как толщина пропластков и их пористость считались одинаковыми, то предполагалось, что условия нагнетания в обоих пропластках идентичны. В проведенной серии численных расчетов использовались следующие значения гидродинамических параметров пластовой системы: значения остаточной фазовой насыщенности $(s_1^0)^* = 0,35, (s_2^0)^* = 0,173$, вязкость пластовой нефти и воды: $\mu_n = 4, \mu_v = 1$. Кривые относительных фазовых проницаемостей те же, что и в [3–5]. Адсорбцией поверхностно-активных веществ (ПАВ) из мицеллярного раствора скелетом пористой среды пренебрегалось, а адсорбция полимера считалась происходящей по закону Генри [6] при $\Gamma = 0,3$. Рассматриваемый режим заводнения являлся третичным процессом повышения нефтеотдачи: начальная концентрация нефти в пористой среде была равна остаточной насыщенности нефти при заводнении: $s_{10}^0 = (s_{1B}^0)^*$.

Результаты численного моделирования мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти в системе пропластков проанализированы в следующей последовательности: 1) характер распределения нефтенасыщенности в пласте и положение основного рабочего агента — оторочки — в зависимости от длительности процесса при фиксированном объеме оторочек и степени неоднородности пропластков; 2) влияние абсолютной проницаемости верхнего слоя $k^{(2)}$ на эффективность вытеснения при постоянном значении $k^{(1)} = 1$.

Рис. 4–7 соответствуют следующим параметрам мицеллярно-полимерного заводнения: $s_{10}^0 = (s_{1B}^0)^* = 0,35, (s_2^0)^* = 0,173, \mu_n = 4, \mu_v = 1, \mu_m = 21, \mu_{II} = 28, t_{II} = 0,5$.

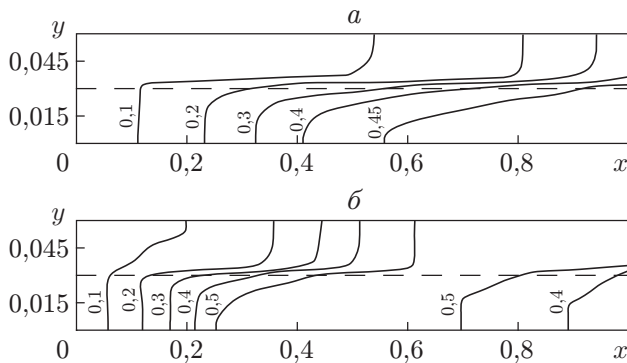


Рис. 4

Рис. 4. Изолинии насыщенности углеводородной фазой s_1^0 в неоднородном пласте ($k^{(2)} = 4$, $k^{(1)} = 1$) прямоугольной формы при заданном расходе ($Q = 1$) на входе в случае мицеллярно-полимерного заводнения ($t_M = 0,1$):

a — $t = 0,4$; b — $t = 0,8$

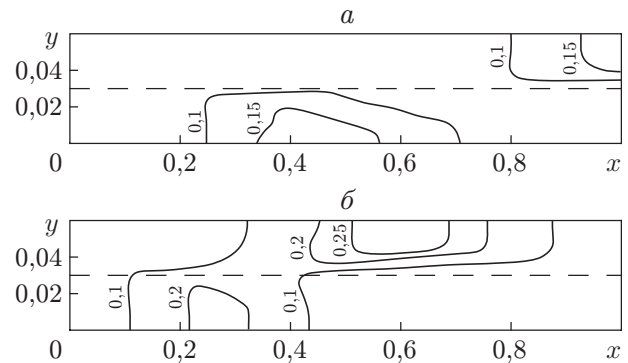


Рис. 5

Рис. 5. Изолинии концентрации ПАВ в углеводородной фазе $s_{1,3}^0$ ($t_M = 0,1$):

a — $t = 0,4$; b — $t = 0,8$

На рис. 4 представлены изолинии насыщенности углеводородной фазой в моменты времени $t = 0,4; 0,8$ для пласта с $k^{(2)} = 4$ при объеме оторочки $t_M = 0,1$. На рис. 4, a видно, что образуется водонефтяной вал. Как и в рассмотренных выше случаях вытеснения нефти водой, наблюдается одномерное течение в каждом пропластке с разными объемными расходами в них. На рис. 5 показано положение оторочки мицеллярного раствора, определяемое изолиниями концентраций ПАВ $s_{1,3}^0$. Видно, что объем части оторочки, движущейся в верхнем высокопроницаемом слое, больше и концентрация в нем ПАВ выше, чем в нижнем слое. С течением времени различие в местонахождении частей оторочки в пропластках увеличивается. Размер зоны, занятой ими, также увеличивается, а размер области, в которой находится высококонцентрированный раствор, уменьшается. Последние две особенности режима мицеллярно-полимерного заводнения имеют место и при одномерном движении.

На рис. 6 показаны изолинии насыщенности углеводородной жидкости и концентрации ПАВ для объема закачанной оторочки мицеллярного раствора $t_M = 0,02$. Сравнение положений изолиний насыщенности углеводородной жидкости и оторочки мицеллярного раствора для этих двух вариантов вытеснения остаточной нефти разными объемами мицеллярного раствора (см. рис. 4–6) показывает, что количество вытесненной нефти, первоначально содержащейся в пласте, в рассматриваемых случаях различно. Как в высокопроницаемом, так и в низкопроницаемом слое количество вытесненной нефти больше в случае режима заводнения с большим объемом оторочки мицеллярного раствора.

На рис. 7 представлены изолинии насыщенности углеводородной фазой и концентрации ПАВ в неоднородном пласте ($k^{(2)} = 10$) для оторочки объемом $t_M = 0,1$ при $t = 0,4$. По сравнению со случаем $k^{(2)} = 4$ различие в местоположении частей оторочки в пропластках увеличилось. Изменение положения, занимаемого частями оторочки мицеллярного раствора в пропластках с различной абсолютной проницаемостью, в рассматриваемом случае ($k^{(2)} = 10$) по сравнению с их положением на рис. 4 ($k^{(2)} = 4$) различное: в более высокопроницаемом слое в исследуемый момент времени $t = 0,4$ оторочка ушла вперед на меньшее расстояние, чем отстала в нижнем пропластке. К тому же в верхнем пропластке при $k^{(2)} = 10$ находится более концентрированный раствор, чем при $k^{(2)} = 4$, а в нижнем — менее концентрированный. Так, для изолиний, приведенных на рис. 7, b и рис. 6, b , мак-

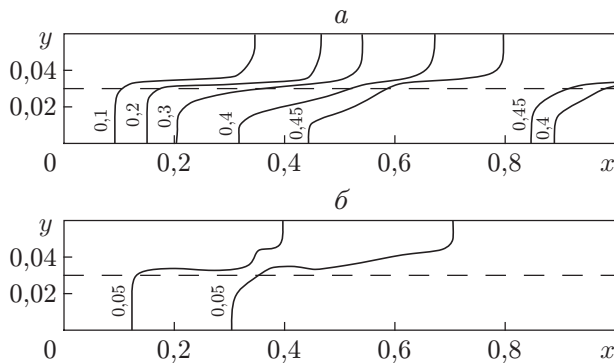


Рис. 6

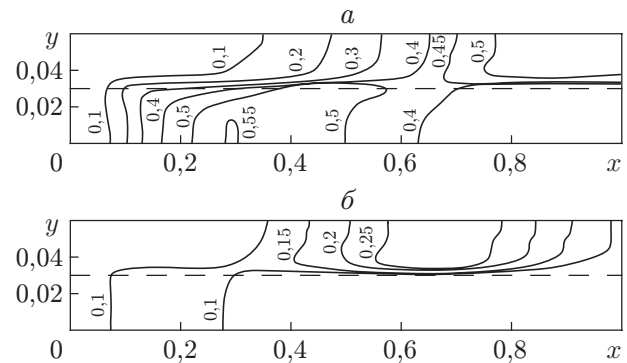


Рис. 7

Рис. 6. Изолинии насыщенности углеводородной фазой s_1^0 (а) и концентрации ПАВ $s_1^0 c_{1,3}$ (б) в случае мицеллярно-полимерного заводнения ($t_m = 0,02$) неоднородного пласта ($k^{(2)} = 4$, $k^{(1)} = 1$) при $t = 0,4$

Рис. 7. Изолинии насыщенности углеводородной фазой (а) и концентрации ПАВ (б) в случае мицеллярно-полимерного заводнения ($t_m = 0,1$) неоднородного пласта ($k^{(2)} = 10$, $k^{(1)} = 1$) при $t = 0,4$

симальное значение концентрации ПАВ составило 0,25. Однако в низкопроницаемом слое размер зоны, занимаемой раствором с концентрацией не ниже указанной, меньше, чем в высокопроницаемом, и составляет соответственно 0,15 и 0,20. Итак, хотя увеличение проницаемости приводит к увеличению скорости вытеснения и нефтеотдачи, увеличение степени неоднородности приводит к тому, что в более высокопроницаемый слой затекает большое количество мицеллярного раствора, следовательно, эффективность вытеснения из нижнего слоя снижается. При этом увеличение объема части оторочки, продвигающейся по высокопроницаемому слою, практически не приводит к увеличению нефтеотдачи из этого пропластка. В то же время объем части оторочки в низкопроницаемом слое уменьшается вследствие перетекания в другой пропласток, и, следовательно, эффективность вытеснения из пропластка с $k^{(1)} = 1$ снижается.

Анализ коэффициента текущей нефтедобычи — главного технологического показателя процесса — при различных объемах использованной мицеллярной оторочки с $k^{(2)} = 8$ показывает, что, хотя для рассматриваемых объемов вал нефти достигает выхода из пласта практически одновременно, количество нефти, гидродинамически удержанной в пористой среде, разное: чем меньше размер оторочки, тем оно больше. В случае неоднородных пластов вал нефти достигает продуктивной скважины быстрее вследствие наличия высокопроницаемого слоя, однако в этом случае из-за неоднородности вытеснения нефтеотдача существенно меньше.

На рис. 8 представлены изобары для слоисто-неоднородного пласта ($k^{(2)} = 10$) при объеме закачанной оторочки мицеллярного раствора $t_m = 0,1$ в момент времени $t = 0,4$.

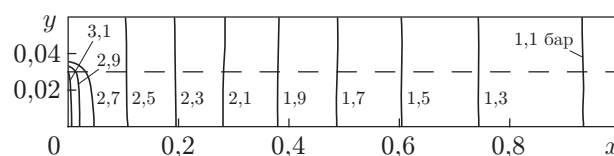


Рис. 8. Изобары в случае мицеллярно-полимерного заводнения ($t_m = 0,1$) неоднородного пласта ($k^{(2)} = 10$, $k^{(1)} = 1$) прямоугольной формы при $t = 0,4$

Почти во всей области фильтрации поле скоростей, направление которых должно быть нормально изобарам, параллельно оси x , т. е. движение близко к одномерному. Давление на входе в нижний, менее проницаемый пропласток выше, чем на входе в верхний слой. Расположение изобар вблизи линии нагнетания указывает на то, что часть жидкости, вводимой в низкопроницаемый пропласток, перетекает в верхний, высокопроницаемый слой. Отметим также, что по сравнению с квадратной областью фильтрации (вариант вытеснения нефти водой) размер области перетока в данном случае существенно меньше и движение в слоях ближе к одномерному.

2. Результаты численного моделирования мицеллярно-полимерного извлечения нефти из слоисто-неоднородного пласта при заданном перепаде давления. Изучен процесс мицеллярно-полимерного заводнения слоисто-неоднородного пласта при заданном перепаде давления между входом и выходом из пористой среды. Модель пласта, а также характеристики мицеллярно-полимерного заводнения те же, что и в [3–5]. Граничное условие на давление на отрезках AC и DF (см. рис. 1) задается в виде $p(d'\Omega, t) = p(t)$. В данной задаче в качестве независимой переменной, от которой зависит коэффициент нефтеотдачи η , выберем безразмерный объем прокачанной жидкости, отнесенный к поровому объему пласта τ .

Для режима мицеллярно-полимерного заводнения слоисто-неоднородных пластов при заданном перепаде давления изучалось влияние на эффективность процесса двух факторов: степени макронеоднородности нефтеносного коллектора по мощности и объема закачиваемой в пласт оторочки мицеллярного раствора. Численно проанализирован следующий режим мицеллярного заводнения. Пласт имел прямоугольное сечение ($l_x = 1, h = 0,01$). Два пропластка, из которых состоял пласт (см. рис. 1), имели одинаковые мощность и пористость. Первоначально поровое пространство этого пласта было насыщено водой и нефтью ($s_{10}^0 = 0,26$), вязкости которых равны соответственно $\mu_v = 1$ и $\mu_n = 6$. Кривые относительных фазовых проницаемостей при совместной фильтрации воды и нефти те же, что и в [3–5].

Закачиваемые в пласт вытесняющие жидкости имели следующие характеристики: вязкость мицеллярного раствора исходного состава составляла 9,7, вязкость полимерного раствора, выполнявшего функцию буферной жидкости, — 14 (с учетом сопротивления). Размер использованной оторочки мицеллярного раствора варьировался, а объем второй закачиваемой оторочки раствора полимера был постоянным: $V_{\text{п}} = 0,6V_{\text{пор}}$. Относительные фазовые проницаемости углеводородной фазы, содержащей ПАВ, и водной фазы вычислялись согласно [3–5] (как и ранее, использовался мицеллярный раствор, растворяющий пластовую нефть, но не воду).

Для рассматриваемых вариантов заводнения в качестве граничного условия задавался перепад давления между входом ($\hat{p} = 5$) и выходом ($\hat{p} = 1$) из пласта. Расчеты проводились на конечно-разностной сетке размером 20×10 ($\Delta x = 0,05, \Delta y = 0,001$) при $\Delta t = 0,003$, итерационный шаг $\delta = 0,065$, допустимая погрешность в условии сходимости итерационного процесса при определении давления $\varepsilon = 1/40$.

Проанализированы интегральные характеристики: эффективность заводнения слоисто-неоднородного пласта и коэффициент общей нефтеотдачи η в зависимости от безразмерного объема закачанной жидкости τ , отнесенного к поровому объему пласта $V_{\text{пор}}^0$, при различных значениях абсолютной проницаемости верхнего пропластка ($k^{(1)} = 1$) и объема закачанной оторочки мицеллярного раствора $\tau_{\text{м}}$, отнесенного к поровому объему пласта. Кривые зависимости $\eta(\tau)$ характеризуют поэтапное вытеснение нефти из пропластков. Сначала вытекают пластовые нефть и вода с обводненностью, соответствующей начальной нефтенасыщенности. Затем к выходу приближается водонефтяной вал, образовавшийся в верхнем, высокопроницаемом слое. После этого начинает поступать

нефть из вала в нижнем слое. Отметим, что при увеличении макронеоднородности улучшается вытеснение в высокопроницаемом слое (более раннее приближение вала к выходу, бóльшая нефтенасыщенность в нем). Однако в этом случае нижний пропласток практически не охватывается вытеснением. В результате конечная нефтеотдача существенно уменьшается. Так, для пластов с $k^{(2)} = 2$ и $k^{(2)} = 10$ при $\tau_m = 0,1V_{\text{пор}}$ в случае прокачки двух поровых объемов пласта ($\tau = 2V_{\text{пор}}$) она составила 99 и 71 % соответственно, что подтверждает качественный вывод, сделанный на основании результатов экспериментальных исследований [7].

Применимость упрощенного метода “жестких трубок тока” для расчета мицеллярно-полимерного заводнения изучалась в [8].

Заключение. Изучены динамика и эффективность вытеснения нефти из слоисто-неоднородного по мощности пласта, состоящего из двух гидродинамически сообщающихся пропластков с различной абсолютной проницаемостью.

Для режима заводнения при заданном темпе нагнетания исследованы послойное продвижение вытесняющей воды, текущая нефтеотдача при варьировании величины абсолютной проницаемости одного из пропластков и различной форме области фильтрации. Установлено, что степень неоднородности существенно зависит от геометрии резервуара. Так, для области фильтрации квадратной формы время безводной нефтеотдачи $t_{\text{пр}}$ (в начале процесса вода находилась в пористой среде в связанном состоянии) практически не зависит от величины $k^{(2)}$ в рассмотренном диапазоне ее значений ($k^{(2)} = 1 \div 10$), а для области фильтрации прямоугольной формы (отношение мощности h к длине пласта составляет 0,06) значение $t_{\text{пр}}$ изменяется в интервале от 0,6 до 0,32.

В случае мицеллярно-полимерного воздействия фильтрационный поток и нефтеотдача исследованы при различных значениях проницаемости одного пропластка $k^{(2)}$ (от 1 до 10) и объема оторочки раствора V_m (от $0,1V_{\text{пор}}$ до $0,02V_{\text{пор}}$). Из анализа изобар следует, что при заданном расходе межслойный переток реализуется в окрестности линии нагнетания. Причина разрыва оторочки и неравномерности вытеснения в пропластках заключается в том, что с увеличением неоднородности увеличивается объем закачанной оторочки, движущейся в высокопроницаемом слое. Аналогичное исследование, проведенное при заданном давлении, также показало, что неоднородность оказывает негативное влияние на нефтеотдачу.

Авторы выражают благодарность Р. И. Нигматулину за полезное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сургучев М. Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985.
2. Азиз Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. М.: Недра, 1982.
3. Нигматулин Р. И., Федоров К. М., Хабеев Н. С. Математическое моделирование мицеллярно-полимерного вытеснения нефти из обводненных пластов // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 6. С. 84–93.
4. Нигматулин Р. И., Федоров К. М., Хабеев Н. С. Численное исследование процесса мицеллярно-полимерного вытеснения нефти из слоисто-неоднородных пластов // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1984. № 2. С. 87–93.
5. Иногамов Н. А., Хабеев Н. С. Моделирование мицеллярно-полимерного заводнения в системе скважин // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2004. № 6. С. 124–132.

6. **Ентов В. М., Полищук А. М.** Роль адсорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористых средах // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 3. С. 68–75.
7. **Широков В. А.** Экспериментальное исследование движения в пористых средах оторочек химреагентов, применяемых для увеличения нефтеотдачи: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. М., 1979.
8. **Иногамов Н. А., Хабеев Н. С.** Применение метода “жестких трубок тока” для расчета мицеллярно-полимерного заводнения при шахматной системе расстановки скважин // Инж.-физ. журн. 2007. Т. 80, № 1. С. 15–21.

Поступила в редакцию 24/IX 2007 г.
