

УДК 532.546

© 2004 г. Н. А. ИНОГАМОВ, Н. С. ХАБЕЕВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИЦЕЛЛЯРНО-ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ В СИСТЕМЕ СКВАЖИН

Предлагается математическая модель нестационарной двумерной фильтрации двухфазной многокомпонентной несжимаемой жидкости при мицеллярно-полимерном заводнении нефтеносных пластов. Процесс вытеснения нефти исследуется численно с использованием неявной схемы первого порядка точности против потока с интегрированием по нелинейности на равномерной сетке с допущением о плоскорadiaльном движении в окрестности скважин. При пятиточечной схеме нагнетания оторочек анализируется влияние неоднородной проницаемости пористой среды на эффективность рассмотренного метода повышения нефтеотдачи.

*Ключевые слова:* нестационарная двумерная двухфазная фильтрация, неоднородность проницаемости, мицеллярно-полимерное заводнение, эффективность вытеснения нефти.

На основе математической модели, развитой в [1, 2], численно исследуется нестационарный характер фильтрации в двумерной неоднородной по проницаемости области при пятиточечной системе разработки нефтяного месторождения. Задача решается как при заданном расходе нагнетаемых агентов, так и при известном перепаде давления между линией нагнетания и отбора. Устанавливается зависимость эффективности метода от объема закачанной жидкости, степени и формы макронеоднородности, объема оторочки мицеллярного раствора.

1. Мицеллярно-полимерное заводнение исследуем при следующих предположениях: фильтрующиеся жидкости несжимаемы, скелет пористой среды не деформируется, пористость – кусочно-постоянная функция пространственных координат, течение равновесно, изотермично, диффузионным переносом вещества пренебрегается, действие силы тяжести не учитывается, давление в жидких фазах считается одинаковым. В потоке могут присутствовать две подвижные фазы – углеводородная ( $i = 1$ , там, где это возможно, этот индекс опускается;  $S_1 = S$ ) и водная ( $i = 2$ ) и четыре компонента – нефть, вода, ПАВ и полимер ( $k = 1-4$  соответственно), где  $i$  и  $k$  – нижние индексы при фазовых параметрах. Движение считается плоским двумерным и подчиняется обобщенному закону Дарси. Используется мицеллярный раствор, неограниченно растворяющий нефть, но не воду. Тогда математическую модель процесса можно представить в виде

$$m^0 \frac{\partial}{\partial t} (S_i C_{ik} + a_k) + u \nabla F_i C_{ik}^0 = 0, \quad i = 1, \quad k = 1, 2, 3; \quad i = 2, \quad k = 4$$

$$\sum_{i=1,2} S_i^0 = 1, \quad \sum_{k=1}^3 C_{1k}^0 = 1; \quad \sum_{k=2,4} C_{2k}^0 = 1$$

$$u_i = -\Lambda_i \nabla p, \quad i = 1, 2, \quad u = \sum_{i=1,2} u_i, \quad \nabla \Lambda \nabla p = 0 \quad (1)$$

$$\Lambda = \sum_{i=1,2} \Lambda_i, \quad \Lambda_i = k\lambda_i, \quad \lambda_i = \frac{k_i}{\mu_i}, \quad F_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}, \quad \lambda = \sum_{i=1,2} \lambda_i$$

$$k_i = k_1(S_1^0, C_{13})$$

где  $\lambda$  – подвижность,  $\Lambda$  – проводимость.

Относительные фазовые проницаемости при заводнении  $k_{iw}$  и вытеснении мицеллярным раствором  $k_{iM}$  исходного (закачиваемого) состава выберем согласно [3]

$$k_{iw}(S_{iw}) = k_{iw}^* S_{iw}^{N_i}, \quad S_{iw} = \frac{S_i^0 - S_{iw}^{0*}}{1 - S_{1w}^{0*} - S_2^{0*}} \quad (2)$$

$$k_{iM}(S_{iM}) = k_{iM}^* S_{iM}^{N_i}, \quad S_{iM} = \frac{S_i^0 - S_{iM}^{0*}}{1 - S_{1M}^{0*} - S_2^{0*}}$$

где  $k_i^*$  – значение относительной фазовой проницаемости для фильтрации  $i$ -фазы при остаточной насыщенности другой фазой,  $S_i^{0*}$  – остаточное значение истинной насыщенности, при котором данная фаза находится в связанном (неподвижном) состоянии при определенном типе заводнения (нижние индексы “ $w$ ”, “ $M$ ”), указывает на вытеснение нефти водой (мицеллярным раствором),  $S_{iw}$ ,  $S_{iM}$  – приведенные насыщенности, выделяющие часть порового объема, занимаемого движущейся жидкостью. Для песчаника Berea [4]  $k_{1w}^* = k_{1M}^* = k_{2M}^* = 1$ ,  $k_{2w}^* = 0.06$ ,  $N_1 = 1.5$ ,  $N_2 = 3.75$ .

Относительная проницаемость углеводородной фазы  $k_1(S_1^0, C_{13})$ , а также вязкости фаз считаются линейными функциями относительной (нормализованной) концентрации ПАВ  $C_{13} = C_{13}^0 / \hat{C}_{13}^0$  или полимера  $C_{24}^0 = C_{24}^0 / \hat{C}_{24}^0$ , где  $C_{13}^0$ ,  $C_{24}^0$  – концентрация ПАВ и полиакриламида в закачиваемых в пласт растворах [5] (здесь и далее “крышкой сверху” снабжаются параметры на контуре нагнетательной скважины)

$$k_1(S_1^0, C_{13}) = \begin{cases} (1 - C_{13})k_{1w}(S_{1w}) + C_{13}k_{1M}(S_{1M}), & S_{1w}^{0*} \leq S_1 \leq 1 - S_2^{0*} \\ C_{13}k_{1M}(S_{1M}), & 0 \leq S_1 \leq S_{1w}^{0*} \end{cases} \quad (3)$$

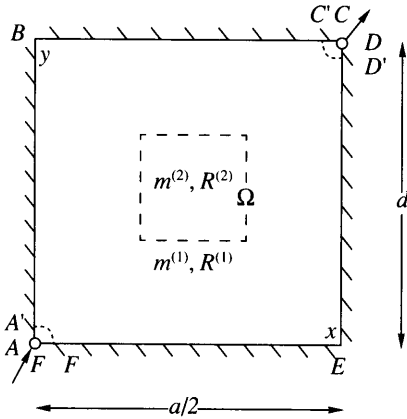
$$\mu_1 = (1 - C_{13})\mu_p + C_{13}\mu_M, \quad \mu_2 = (1 - C_{24})\mu_w + C_{24}\mu_b$$

Здесь  $\mu_p$ ,  $\mu_w$ ,  $\mu_M$ ,  $\mu_b$  – заданные вязкости нефти, воды, мицеллярного и полимерного растворов.

В присутствии ПАВ считается  $S_1^{0*} = 0$ , ( $C_{13} \neq 0$ ) и  $k_2(S_1^0, C_{13} \neq 0) = k_{2M}(S_{1M})$  [5]. Наличие ПАВ снижает поверхностное натяжение между водой и нефтью, поэтому относительные фазовые проницаемости зависят от концентрации ПАВ.

В настоящее время известны и другие математические модели, описывающие механизм и динамику вытеснения пластовой нефти микроэмульсиями на основе ПАВ, например, привлекающие полуэмпирическую зависимость остаточной нефтенасыщенности от капиллярного числа [6, 7]. Использование именно данной модели объясняется тем, что она хорошо и всесторонне апробирована на одномерных течениях для рассматриваемых режимов воздействия на пластовую систему.

Адсорбцией ПАВ из мицеллярного раствора выбранного типа скелетом пористой среды пренебрегается [5], адсорбция полимера полагается происходящей по закону Генри  $a_4 = \Gamma S_2^0 C_{24}$ , далее  $\Gamma = 0.3$  [8].



Фиг. 1. Схема расчетной области фильтрации: А – нагнетательная скважина, С – продуктивная скважина

Рассмотрим течение при пятиточечной схеме расположения скважин, разбуривающих пласт. В силу симметрии достаточно изучить процесс в области, изображенной на фиг. 1, где  $a, d$  – расстояния между скважинами в галереях и между галереями. Различные потоки сопрягались с использованием баланса масс. Прямолинейные отрезки границы области фильтрации непроницаемы (в силу чего на них  $\partial p / \partial n = 0$ ) на нагнетательной скважине (четверть дуги окружности  $AF$  скважины радиуса  $r_c$ ) задается режим закачки вытесняющих агентов

$$Q(M, t) = Q(t) = 2\pi r_c H \Lambda \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=r_c}$$

$$\text{или } p(M, t) = \bar{p}(t)$$

$$S_1^0(M, t) = \bar{S}_1^0(t) = \begin{cases} 1 - S_2^*, & 0 \leq t \leq t_M; \\ 0, & t \geq t_M \end{cases}; \quad C_{13}(M, t) = \bar{C}_{13}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_M \\ 0, & t \geq t_M \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{24}(M, T) = \bar{C}_{24}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_M \\ 1, & t_M \leq t < t_M + t_b; \\ 0, & t \geq t_M + t_b \end{cases}; \quad M \in AF$$

На продуктивной скважине известно давление  $p(M, t) = \bar{p} = \text{const}$ ,  $M \in CD$  (“черта сверху” указывает на значение на выходе из пласта). Начальные условия задачи имеют вид

$$t = 0:$$

$$S_1^0(M) = S_{10}^0 = \text{const}, \quad M \in \Omega \quad (5)$$

$$C_{ik}(M) = C_{ik0} = \begin{cases} 1, & i = k = 1, 2 \\ 0, & i = 1, k = 2, 3, i = 2, k = 4 \end{cases}$$

где  $\Omega$  – двумерная область фильтрации.

Для удобства дальнейших исследований введем безразмерные переменные, полученные от соответствующих размерных путем их обезразмеривания на следующие характерные величины задачи (со “звездочкой”), выбранные таким образом, что модель относительно безразмерных величин имеет прежний вид

$$x_* = y_* = r_* = \frac{a}{2}, \quad p_* = p, \quad k_* = k^1$$

$$\mu_* = \mu_w, \quad \Lambda_* = \frac{k^1}{\mu_w}, \quad \lambda_* = \mu_w^{-1} \quad (6)$$

$$t_* = \frac{m^0 x_*^2 \mu_w}{k^{(1)} \bar{p}}, \quad u_* = \frac{k^{(1)} \bar{p}}{\mu_w x_*}, \quad Q_* = \frac{k^{(1)} \bar{p} \bar{x}_*}{\mu_w}$$

Здесь и далее верхний индекс (1), (2) указывает на “основную” часть области фильтрации и на подобласть, абсолютная проницаемость которой может отличаться от значения в основной области,  $a$  – расстояние между галереями скважин. Поэтому при прежних обозначениях используемые в дальнейшем величины носят безразмерный характер.

Обезразмеренное таким образом время имеет смысл безразмерного объема прокачанной жидкости  $\tau$  относительно подвижного порового объема  $V'_{p1} = (1 - S_1^{0*} - S_2^{0*})m^0 V_{p1}$ , функциями которого в подземной гидромеханике принято выражать искомые величины. Для рассматриваемых здесь двумерных задач при заданных расходе или перепаде давления соответственно имеем

$$\tau = \frac{t_* Q_*}{x_*} \int_0^t \frac{Q(t) dt}{V'_{p1}}, \quad \tau = \frac{\Lambda_* p_* t_*}{x_*^2} \int_0^t \frac{Q(t) dt}{V'_{p1}} \quad (7)$$

Значения безразмерных параметров  $a/2$ ,  $\mu_w$ ,  $k^{(1)}$  далее не приводятся, так как в силу (6) они равны единице.

Приближенное решение ищется конечно-разностным методом. При этом основные трудности связаны с вычислением с требуемой точностью приближенного решения в окрестности разрыва точного решения [9], сильной зависимостью разностного решения от ориентации сетки [10], несоответствием разностного давления точному вблизи скважины при аппроксимации скважины конечного радиуса узлом разностной сетки с произвольным шагом пространственной сетки [11, 12].

Гиперболические уравнения переноса аппроксимируются по явной схеме первого порядка точности против потока [13] с минимизацией численной дисперсии согласно [14] по диагональной схеме, которая при благоприятном соотношении подвижностей, характерном для мицеллярно-полимерного заводнения, минимизирует ориентационный эффект.

Эллиптическое уравнение для давления решается методом установления с прогонкой по переменным направлениям [15]. Выбор величины оптимального итерационного шага производится аналогично решению задачи Дирихле, но с усреднением коэффициента  $\Lambda_{ij}^k$ .

2. Для учета особенности в распределении давления у скважин в их окрестности выделяются области, движение в которых полагается плоско-радиальным (фиг. 1). Здесь  $A$  – нагнетательная,  $C$  – продуктивная скважина, причем  $AA^1 = FF^1 = CC^1 = DD^1 = \Delta x = \Delta y$ , где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – шаги разностной сетки. После замены переменных  $\xi = \ln(r/r_c)/\ln(\Delta x/r_c)$  законы сохранения аппроксимируются по неявной схеме первого по-

рядка точности против потока с интегрированием по нелинейности на равномерной сетке [16]. В точках  $A^1, F^1, C^1, D^1$  одномерное и двумерное решение “сшивается”, а соответствие потоков устанавливается по тестовым расчетам. Сравнением с известным аналитическим видом распределения насыщенности при заданном темпе нагнетания определена также специальная аппроксимация граничного условия (4) на нагнетательной скважине для пятиточечной задачи

$$Q = \frac{\pi \Lambda_0^k (P_1^0 - P_0^n)}{2 \ln(\Delta x/r_c) \Delta \xi}$$

Подобный алгоритм, но без итерирования по нелинейности в окрестности скважин, предложен в [17, 18] при моделировании вытеснения нефти водой. Проведенные тестовые расчеты указывают на высокую точность определения давления и фазовой насыщенности в окрестности скважин данным методом.

Для тестирования программы расчета двумерной задачи мицеллярно-полимерного заводнения решались вначале модельные задачи для эллиптического уравнения, в ходе которых получены хорошие итерационные приближения аналитических известных решений задач Дирихле и Неймана. Рассматривался также процесс вытеснения нефти водой, и результат моделирования сравнивался с решениями, полученными ранее другими авторами. Отмечено хорошее согласование.

Рассчитывались некоторые варианты площадного мицеллярно-полимерного заводнения. Значения остаточной насыщенности фаз при заводнении брались следующими:  $S_1^{0*} = 0.35$ ,  $S_2^{0*} = 0.173$ .

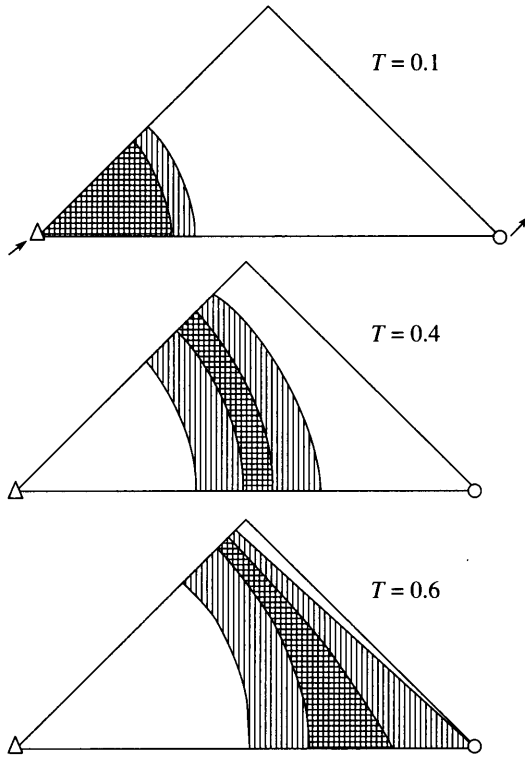
Для пятиточечной системы рассчитывалось заводнение с объемами закачиваемых оторочек мицеллярного раствора и полиакриламида, равными  $\tau_M = 0.1$ ,  $\tau_b = 0.5$ .

Положения оторочки мицеллярного раствора при ее продвижении по пласту и зоны различной концентрации ПАВ показаны на фиг. 2. При этом изображено положение оторочки в минимальном участке симметрии 1/8 части от площади пятиточечного элемента.

Из фиг. 2 ясно видно влияние геометрии области на картину продвижения оторочки мицеллярного раствора. Со временем оторочка размазывается, область, занимаемая раствором, способным еще эффективно воздействовать на нефть, утоньшается. К моменту подхода оторочки мицеллярного раствора к продуктивной скважине имеются области, неохваченные вытеснением.

Для мицеллярно-полимерного заводнения при пятиточечной схеме расстановки скважин установлены текущие двумерные распределения давления, насыщенности, концентраций ПАВ и полимера. По ним можно сделать выводы: давление на нагнетательной скважине резко меняется при изменении вязкости закачиваемой жидкости, скорость фильтрации смеси существенно различается по области фильтрации – максимальна у нагнетательной скважины и минимальна по линии, равноудаленной от скважин, особенно вблизи точек  $B$  и  $E$  (фиг. 1). В начальный период воздействия движение вытесняющей жидкости близко к радиальному. Затем образуется “язык”, прорывающийся к продуктивной скважине. Время прорыва меньше, чем при фронтальном вытеснении (одномерный случай). Остающаяся при этом в пласте нефть распределена неравномерно – хорошо “отмывается” область при нагнетательной скважине и вдоль линии “нагнетательная–продуктивная скважины”. Оторочка мицеллярно-полимерного раствора распределена также неравномерно – наибольшая ее часть движется по кратчайшей линии тока, наименьшая – по самой длинной.

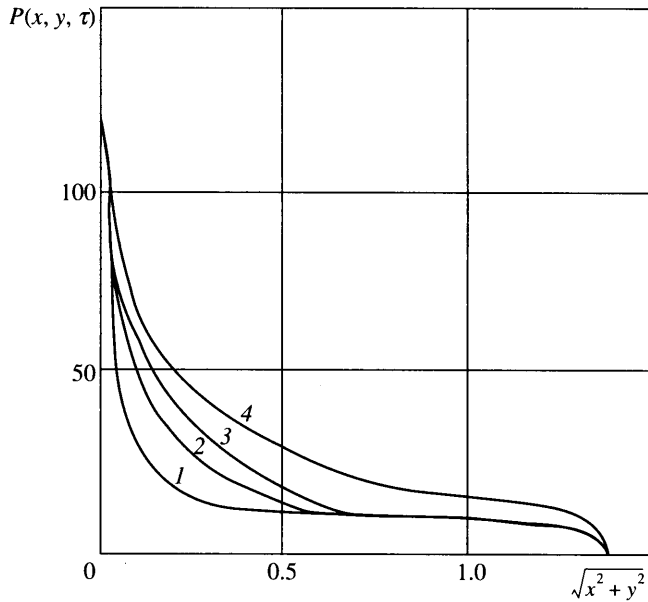
На фиг. 3 изображено распределение давления вдоль линии, соединяющей нагнетательную и эксплуатационную скважины, для заводнения со следующими данными:  $Q = 1$ ,



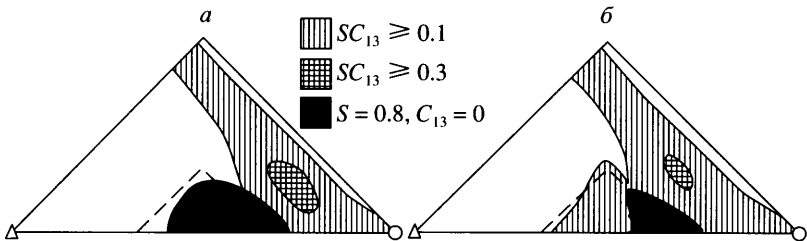
Фиг. 2. Положение оторочки мицеллярного раствора при пятиточечном заводнении (приведена 1/8 часть элемента симметрии) в различные моменты времени

$d = a/2$ ,  $S_{10}^0 = 0.827$ ,  $S_{1w}^{0*} = 0.35$ ,  $S_2^{0*} = 0.173$ ,  $\mu_p = 1.8$ ,  $\mu_M = 21$ ,  $\mu_b = 28$ , объем мицеллярной оторочки  $\tau_M = 0.1$ , полимерной –  $\tau_b = 0.5$  в разное время (результат получен при сетке  $15 \times 15$  с 10 ячейками в окрестности скважин). Основной перепад давления реализуется в окрестности скважин. Наиболее крутой вид кривые имеют у нагнетательной скважины, где фильтруется высоковязкая жидкость.

Все реальные нефтеносные пласты неоднородны по своим коллекторским свойствам, в частности, макронеоднородны по проницаемости, как по простираемости, так и по мощности. Поэтому для пятиточечной проблемы изучалось влияние значения абсолютной проницаемости “включения” – подобласти квадратной формы, расположенной в центре, со стороной  $d/3$  (фиг. 1) на эффективность мицеллярно-полимерного заводнения. В частности, определялось время безводной нефтеотдачи (для простоты рассматривался случай  $S_{10}^0 = 1 - S_2^{0*}$ ) и оказалось, что существует некоторый диапазон значений проницаемости  $k^{(2)} < k^{(1)}$ , при которых время прорыва оторочки мицеллярного раствора в продуктивную скважину  $\tau_M$  больше, чем для случая однородного пласта ( $k^{(2)} = k^{(1)}$ ) ввиду увеличения охвата пласта вытеснением. Для значений  $k_* = k^{(2)}/k^{(1)} < 0.01$  слабопроницаемая зона практически не охвачена вытеснением. Негативное влияние плохо проницаемого включения проявляется еще и в том, что образуются “теневые” области, прилегающие к границам включения со стороны продуктив-



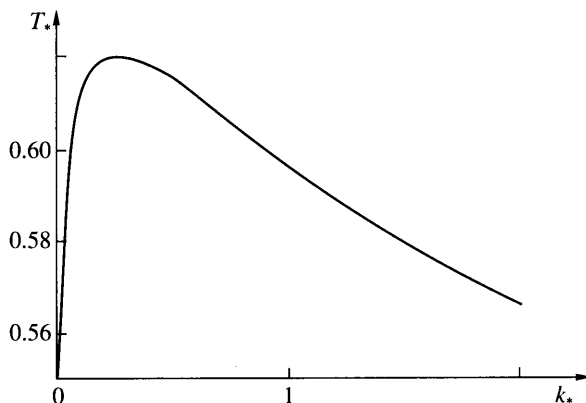
Фиг. 3. Распределение давления вдоль линии, соединяющей нагнетательную и эксплуатационную скважины



Фиг. 4. Положение оторочки мицеллярного раствора в пласте в момент ее подхода к продуктивной скважине  $T_* \approx 0.6$  при разной абсолютной проницаемости включения  $k^{(2)}$  а -  $k_* = 0.01$ ,  $T_* = 565$ , б -  $k_* = 0.05$ ,  $T_* = 0.6$

ной скважины, нефтенасыщенность которых близка к начальной после прорыва вытесняющей оторочки в эксплуатационную скважину. Размеры теневой зоны слабо зависят от величины абсолютной проницаемости  $k^{(2)}$  в интервале значений, для которых вытеснение из линзы пластовой нефти оторочкой мицеллярного раствора происходит не полностью.

На фиг. 4 показано положение оторочки мицеллярного раствора в пласте в момент ее подхода к продуктивной скважине  $t \approx t_M = 0.6$  при разной абсолютной проницаемости включения  $k^{(2)}$ . В обоих случаях во время продвижения оторочки происходил ее разрыв из-за обтекания с двух сторон – справа и слева – слабопроницаемого включения. Для рассмотренного случая  $k_* = 0.05$  область включения подвергается воздействию со стороны вытесняющей оторочки мицеллярного раствора, но проникшая туда ее часть движется медленно и постепенно отстает от основной массы. При этом возникает зона, занятая нефтью, во включении у прилегающей к ней части со стороны,



Фиг. 5. Зависимость времени подхода оторочки к продуктивной скважине  $T_*$  от проницаемости  $k_*$

противоположной направлению вытеснения, которая остается позади основной части мицеллярного раствора. Ее величина тем больше, чем меньше величина абсолютной проницаемости включения. Для случая  $k_* = 0.01$  включение практически не охвачено вытеснением, нефть в нем неподвижна, и оторочка мицеллярного раствора не внедряется в нее. Поэтому она меньше размазывается (видно, что область высококонцентрированного раствора здесь больше (по площади) и лучше вымывает и охватывает вытеснением зону вне включения. Так как теперь площадь, фактически охваченная заводнением, примерно на 10% меньше, то и прорыв происходит быстрее ( $T_*$  меньше).

Итак, изменение абсолютной проницаемости  $k^{(2)}$  рассматриваемого включения влияет на эффективность всего процесса двояко (пусть для определенности  $k^{(2)}$  уменьшается): с одной стороны – отрицательно нефть, находящаяся во включении, вытесняется хуже, увеличивается теневая зона, с другой – позитивно, так как включение располагается на кратчайшей линии тока “нагнетательная – эксплуатационная скважины”, и оно затрудняет ранний подход оторочки, увеличивая тем самым охват пласта вытеснением. По результатам численных исследований оказалось, что важная интегральная характеристика эффективности процесса – коэффициент безводной нефтеотдачи  $T_*$  – время подхода оторочки к продуктивной скважине, существенным образом зависит от  $k_*$ . Эта установленная зависимость показана на фиг. 5. Оказалось, что наиболее благоприятным значением  $k_* = k^{(2)}/k^{(1)}$  является 0.33, т.е. из соответствующего неоднородного пласта в определенных случаях можно извлечь больше нефти, чем из однородного. Конечно, этот результат, вообще говоря, должен зависеть от площади включения, формы и местонахождения, свойства и объемов закачанных оторочек и т.д.

Из анализируемых результатов численных расчетов текущей нефтенасыщенности в пласте вытекает следующий негативный характерный эффект, присущий мицеллярно-полимерному заводнению – остающаяся в пористой среде после заводнения нефть распределена в ней крайне неравномерно [19]. Минимальное ее количество находится в однородных зонах вблизи нагнетательных скважин и в высокопроницаемых участках пласта. Высокое содержание отмечается: 1) в призабойной зоне добывающих скважин, 2) в слабопроницаемом включении и области, к нему прилегающей со стороны, противоположной направлению вытеснения, 3) на участках перед фронтом вытесняющей жидкости после ее прорыва к продуктивной скважине.

**Заключение.** Предложена математическая модель для мицеллярно-полимерного заводнения нефтеносных пластов и алгоритм ее численного исследования. Эффектив-



ность процесса повышения нефтеотдачи проанализирована в зависимости от макронеднородности: установлен диапазон значений абсолютной проницаемости, при котором время прорыва мицеллярного раствора в продуктивную скважину больше, чем для однородного пласта, а также наиболее благоприятное значение проницаемости и включения. Показан характер движения вытесняющих жидкостей и изменения насыщенности пористой среды углеводородной фазой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Низматулин Р.И., Сургучев М.Л., Федоров Н.С., Хабеев Н.С., Шевцов В.А.* Математическое моделирование процесса мицеллярно-полимерного заводнения // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 52–56.
2. *Низматулин Р.И., Федоров К.М., Хабеев Н.С.* Математическое моделирование мицеллярно-полимерного вытеснения нефти из обводненных пластов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 6. С. 84–93.
3. *Larson R.G., Hirasaki G.J.* Analysis of the physical mechanisms of surfactant flooding // Soc. Petr. Eng. J. 1978. V. 18. № 1. P. 42–58.
4. *Talash A.W.* Experimental and calculated relative permeability data for systems containing tension additives // Improved Oil Recovery Symp. Tulsa, 1976. Paper SPE 5810. P. 177–178.
5. *Gogarty W.B., Meabon H.P., Milton H.W.* Mobility control design for miscible type waterfloods using micellar solutions // J. Petr. Technol. 1970. № 2. P. 141–147.
6. *Bang H.W., Candle B.H.* Modelling of a micellar-polymer process // Soc. Petr. Eng. J. 1984. V. 24. № 6. P. 617–627.
7. *Thomas C.P., Fleming P.D., Winter W.K.* A ternary, two-phase, mathematical model of oil recovery with surfactant systems // Soc. Petr. Eng. J. 1984. V. 24. № 6. P. 606–616.
8. *Полицук А.М., Суркова Е.М.* Эффективность вытеснения нефти из пористой среды полимерными растворами // Нефтяное хозяйство. 1979. № 4. С. 50–53.
9. *Larson R.G.* Controlling numerical dispersion by variable timed flux undating in two dimensions // Soc. Petr. Eng. J. 1982. V. 22. № 3. P. 409–419.
10. *Todd M.R., O'Dell P.M., Hirasaki G.J.* Methods for increased accuracy in numerical reservoir simulators // Soc. Petr. Eng. J. 1972. V. 12. № 6. P. 515–530.
11. *Андреев В.Б., Кряквина С.А.* Сеточные аппроксимации задачи о скважине // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1975. С. 51–59.
12. *Вахитов Г.Г.* Эффективные способы решения задач разработки неоднородных нефтеводоносных пластов методом конечных разностей. М.: Гостоптехиздат, 1963. 216 с.
13. *Роуч П.Дж.* Вычислительная гидродинамика // М.: Мир, 1980. 616 с.
14. *Lantz R.D.* Quantitative evaluation of numerical diffusion // Soc. Petr. Eng. J. 1971. V. 11. № 3. P. 315–320.
15. *Годунов С.К., Рябенький В.С.* Разностные схемы. Введение в теорию. М.: Наука, 1977. 439 с.
16. *Хабеев Н.С., Федоров К.М., Иногамов Н.А.* Численное исследование процесса мицеллярно-полимерного заводнения нефтяных пластов в различных случаях и выявление оптимальных условий // Отчет Ин-та механики МГУ. 1982. № 2598. 58 с.
17. *Таранчук В.Б., Чудов Л.А.* Численный метод решения некоторых задач плоской двухфазной фильтрации в области со скважинами // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1974. Т. 5. № 4. С. 90–102.
18. *Таранчук В.Б., Чудов Л.А.* Численное исследование нефтеотдачи в системе с шахматным расположением скважин // Тр. Всесоюз. семинара "Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости" // Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1975. С. 282–288.
19. *Сургучев М.Л.* Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985. 308 с.