

УДК 532.536

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ОТОРОЧКАМИ РАСТВОРИТЕЛЯ ИЗ ПОРИСТЫХ СРЕД С ЕДИНИЧНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

ЗАЙДЕЛЬ Я. М., ЛЕВИ Б. И.

При вытеснении нефти растворителями, обладающими высокой нефтewытесняющей способностью, нефтеотдача пласта определяется в основном охватом его воздействием реагента. Неблагоприятное соотношение подвижностей нефти и растворителя при преобладании вязкостных сил делает рассматриваемое течение гидродинамически неустойчивым [1], что приводит к существенному снижению охвата. Представляет интерес изучить важный предельный случай этого процесса, описываемый крупномасштабным приближением (т. е. при пренебрежении размерами зон диффузионного размыва). В [2] приведены результаты численного двумерного моделирования поршневого вытеснения нефти в случае непрерывного нагнетания маловязкой смешивающейся с нефтью жидкости. На практике растворитель закачивается в пласт в виде оторочек или отдельных порций, продвигаемых водой или газом [3]. Отметим, что условие устойчивости движения границы раздела нефть — растворитель в этом случае такое же, как и при непрерывном нагнетании агента [4]. Однако технология, основанная на применении оторочек растворителя, может привести к существенным особенностям течения, проявляющимся, например, в их разрыве на отдельные части. Для случая движения оторочки полимерного раствора этот эффект рассматривался в [5, 6].

Численное моделирование двумерного течения нефти, воды и растворителя сталкивается с большими трудностями, так как численная диффузия, присущая обычно используемым при решении задач фильтрации разностным схемам сквозного счета, существенно искажает характер движения оторочки. Специально разработанный алгоритм, основанный на применении метода «частиц в ячейках», позволил провести исследование процесса вытеснения нефти оторочками растворителя в макронеоднородном пласте. В качестве модели зонально-неоднородного пласта обычно рассматривается пористая среда с включениями, имеющими различную проницаемость. Простейшим ее элементом является область фильтрации с единичным включением.

1. Поскольку главной целью работы было изучение основных особенностей двумерного движения жидкостей, обладающих существенно различными подвижностями, в модель, описывающую процесс вытеснения нефти оторочками растворителя [1], был внесен ряд упрощающих предположений. Течение считалось двухфазным, трехкомпонентным. Капиллярные, гравитационные и диффузионные эффекты, а также сжимаемость жидкостей не учитывались. Содержанием растворителя в проталкивающей его жидкости (воде) по сравнению с содержанием в нефтяной фазе пренебрегалось.

При этих предположениях рассматриваемое фильтрационное движение описывается уравнениями

$$\nabla(a \nabla p) = 0, \quad m \frac{\partial s}{\partial t} = \nabla(a F \nabla p) \quad (1.1)$$

$$m \frac{\partial sc}{\partial t} = \nabla(a F c \nabla p) \quad (1.2)$$

$$a = k(k_1 \mu_1^{-1} + k_2 \mu_2^{-1}), \quad F = k_1 \mu_1^{-1} / (k_1 \mu_1^{-1} + k_2 \mu_2^{-1})$$

Здесь k — абсолютная проницаемость; k_1, k_2 — относительные фазовые проницаемости; μ_1, μ_2 — вязкости фаз, m — пористость; s — насыщенность углеводородной фазой, содержащей нефть и растворитель; c — концентрация растворителя в углеводородной фазе; t — время. Индекс 1 относится к углеводородной фазе, 2 — к водной.

Расчетная область представляла собой прямоугольник со сторонами L_x и L_y . Начальные и граничные условия задавались в следующем виде:

$$\begin{aligned} s &= s^*, \quad c = 0 \quad (t=0) \\ s &= s_*(t), \quad c = c_*(t) \quad (x=0) \\ p|_{x=0} - p|_{x=L_x} &= \Delta p > 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0 \end{aligned}$$

Здесь s^* — начальная насыщенность, Δp — заданный перепад давлений между линиями нагнетания и отбора, $s_*(t), c_*(t)$ — кусочно-постоянные функции. В период времени, соответствующий закачиванию воды, $c_* = 0, s_* = s_0$, растворителя — $c_* = 1, s_* = s^0$.

Включения имели форму прямоугольников с абсолютной проницаемостью k^* , отличной от проницаемости основной области течения k .

Алгоритм численного решения системы уравнений (1.1), (1.2) при заданных начальных и граничных условиях основан на раздельном последовательном вычислении полей давления, насыщенности и концентрации на каждом временном слое [7]. Первое из уравнений (1.1) аппроксимировалось конечно-разностной схемой на обычном пятиточечном шаблоне, а второе — двумерным аналогом разностной схемы, использующим принцип минимальных значений производной [8]. Уравнение (1.2) решалось в лагранжевых переменных методом «частиц в ячейках» [9, 10].

Сравнение численных решений с аналитическими [11] для случая одномерного течения показало высокую точность предлагаемого метода расчета, практически не зависящую от объема оторочки растворителя, на разностной сетке, содержащей около 20 узлов.

2. Рассмотрим результаты расчетов, выполненных на ЭВМ по описанному выше алгоритму при следующих исходных зависимостях и значениях параметров:

$$\begin{aligned} k_1(s, c) &= \left[\frac{s - s_0(c)}{s^0 - s_0(c)} \right]^{3-c}, \quad k_2(s) = \left(1 - \frac{s}{s^0} \right)^3 \\ \mu_1(c) &= \frac{\mu_{10}\mu_{11}}{\mu_{11}(1-c) + \mu_{10}c}, \quad s_0(c) = s_{00}(1-c) + s_{01}c \\ s_{00} &= 0,26, \quad s^0 = 0,8, \quad m = 0,2, \quad L_x L_y^{-1} = 2 \end{aligned}$$

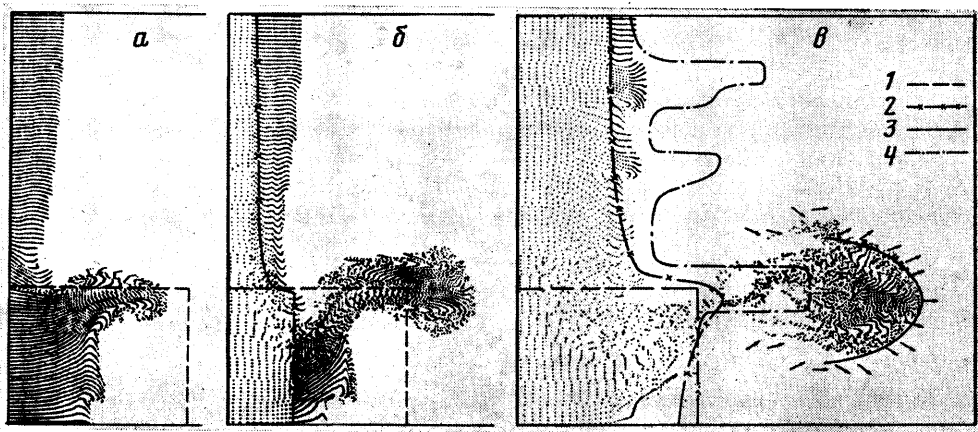
Основные безразмерные параметры $M_1 = \mu_{10}\mu_{11}^{-1}$ и $M_2 = \mu_2\mu_{11}^{-1}$, влияющие на характер возникающего течения, а также s_{01} и $k_0 = k^*/k^{-1}$ варьировались в следующих пределах:

$$3 \leq M_1 \leq 100, \quad 1,5 \leq M_2 \leq 50, \quad 0 \leq s_{01} \leq 0,2, \quad 0,1 \leq k_0 \leq 10.$$

Отметим, что с практической точки зрения изучение раздельного влияния на процесс параметров M_1 и M_2 несколько искусственное, так как только маловязкие нефти могут в типичных условиях неограниченно смешиваться с растворителями. Поэтому в большинстве расчетов осуществлялось одновременное изменение M_1 и M_2 путем варьирования вязкости растворителя μ_{11} при фиксированных $\mu_{10} = 2$ и $\mu_2 = 1$.

При численном моделировании двумерная область течения разбивалась равномерной разностной сеткой на 24×18 ячеек. Число частиц в ячейках на входе полагалось равным 90.

Контрольные расчеты некоторых вариантов проводились на сетке, содержащей 40×30 ячеек.



Фиг. 1

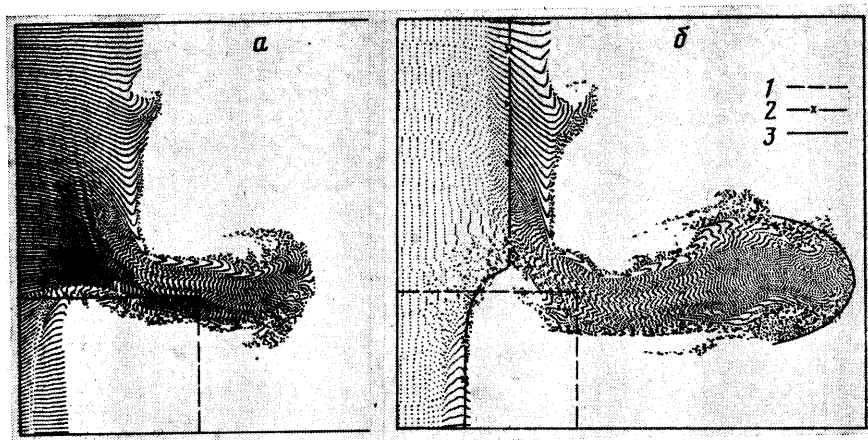
На фиг. 1 точками показано положение частиц растворителя на различные моменты времени $a-v$ — $\tau=0,1; 0,15$ и $0,25$ при $M_1=20, M_2=10, s_{01}=0,15, s^*=0,8, k_0=2, \tau_0=0,1$ (τ — количество отобранной жидкости в долях объема пор пласта, τ_0 — объем оторочки в тех же единицах; здесь и далее: 1 — граница включения, 2 — фронт воды, нагнетаемой после растворителя).

Видно, что с момента внедрения растворителя во включение начинается формирование «языка» из угловой точки границы раздела нефть — растворитель, скорость в которой максимальна [2]. «Язык» движется вдоль границы включения до начала выхода из него. В следующей стадии процесса «язык» растворителя, пройдя через включение, входит в однородную подобласть.

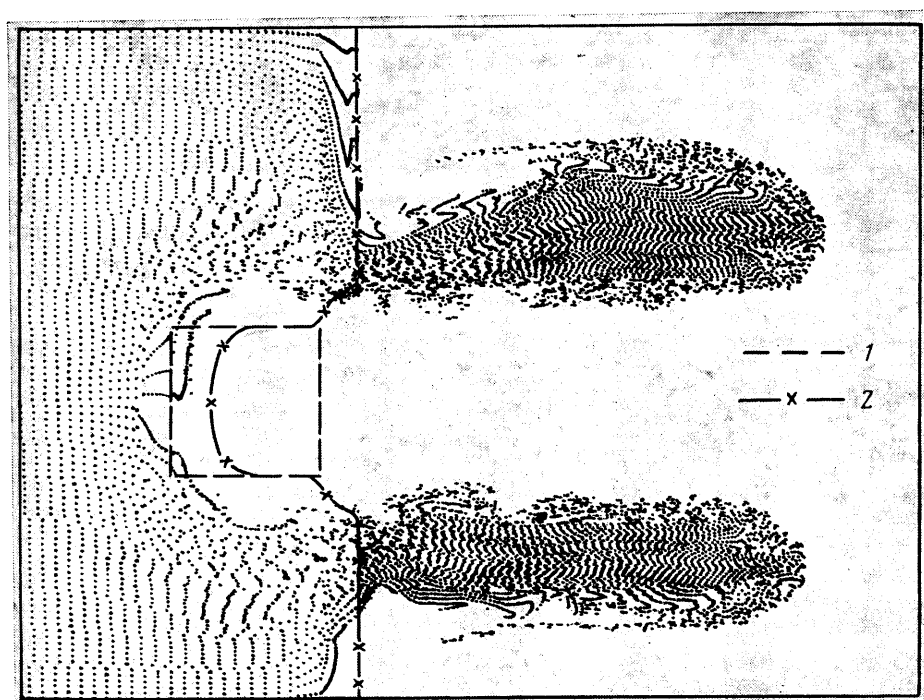
При этом происходит расширение его головной части. Максимальная ширина «языка» и его скорость становятся практически стационарными. В этот период движения форма его головной части хорошо согласуется с соответствующими результатами, полученными на основе известного аналитического решения [12] (кривая 3 на фиг. 1, v), несмотря на то, что в рассматриваемом случае «язык» движется несимметрично относительно границ $y=0$ и $y=L_y$. При его симметричном положении и большом объеме оторочки точность согласования выше.

При вычислениях на более мелкой разностной сетке, содержащей 40×30 ячеек, отмечалось увеличение числа небольших «язычков», вызванных коротковолновыми возмущениями. В начальный период течения они не оказывают влияния на характер движения основной части оторочки растворителя. Однако в дальнейшем эти возмущения могут привести к постепенному искажению формы образовавшегося «языка», расщеплению его на более узкие «язычки»,двигающиеся параллельно друг другу. Эти эффекты связаны с крупномасштабным приближением рассматриваемого процесса. Специально проведенные расчеты показали, что если в модели учесть диффузию, то мелкомасштабные возмущения сглаживаются и расщепление основного «языка» не происходит. При этом форма его головной части, ширина и скорость также близки к асимптотическим, несмотря на некоторый «размыв» границы раздела нефть — растворитель.

В заключительной стадии течения, при приближении растворителя к линии отбора, форма «языка» несколько искажается. После прекращения закачивания в пласт растворителя наблюдается снижение давления впереди фронта проталкивающей оторочки воды, так как ее подвижность меньше, чем у растворителя. Оно происходит неравномерно: в охваченных воздействием растворителя зонах, представляющих собой каналы повышенной проводимости, давление снижается больше, чем в окружающих их областях, заполненных менее подвижной нефтью. В результате возникают значительные поперечные составляющие градиента давления и рас-

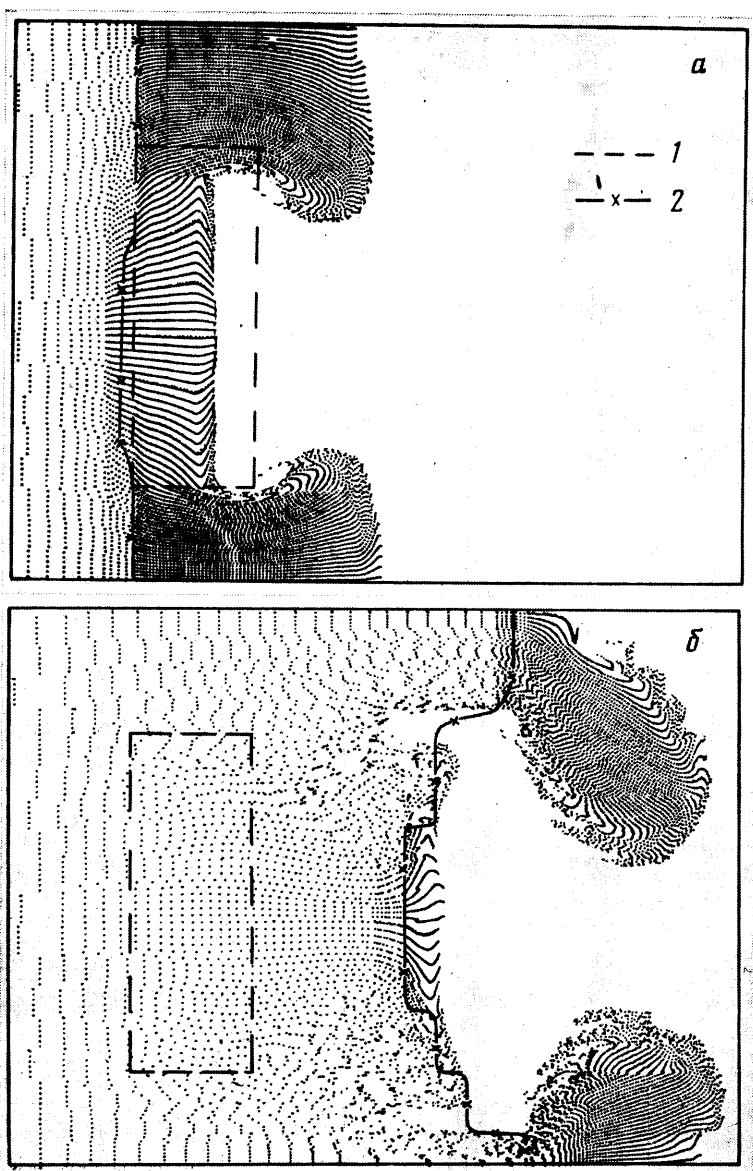


Фиг. 2



Фиг. 3

творитель,двигающийся в виде «языка», замещается нефтью, которая затем уже вытесняется водой. Направления вектора скорости в окрестности «языка» и текущее положение фронта заканчиваемой воды показаны на фиг. 1, в. Отметим, что сжатие «языков» маловязкого растворителя при переходе на закачивание воды отмечалось в лабораторных экспериментах на плоских моделях [13]. Тот факт, что повторное насыщение нефтью отдельных участков пласта, охваченных ранее воздействием растворителя, связано с более высоким значением вязкости воды по сравнению с вязкостью растворителя, подтверждается специально проведенным расчетом с $M_2=1$ и теми же значениями остальных исходных параметров. В этом



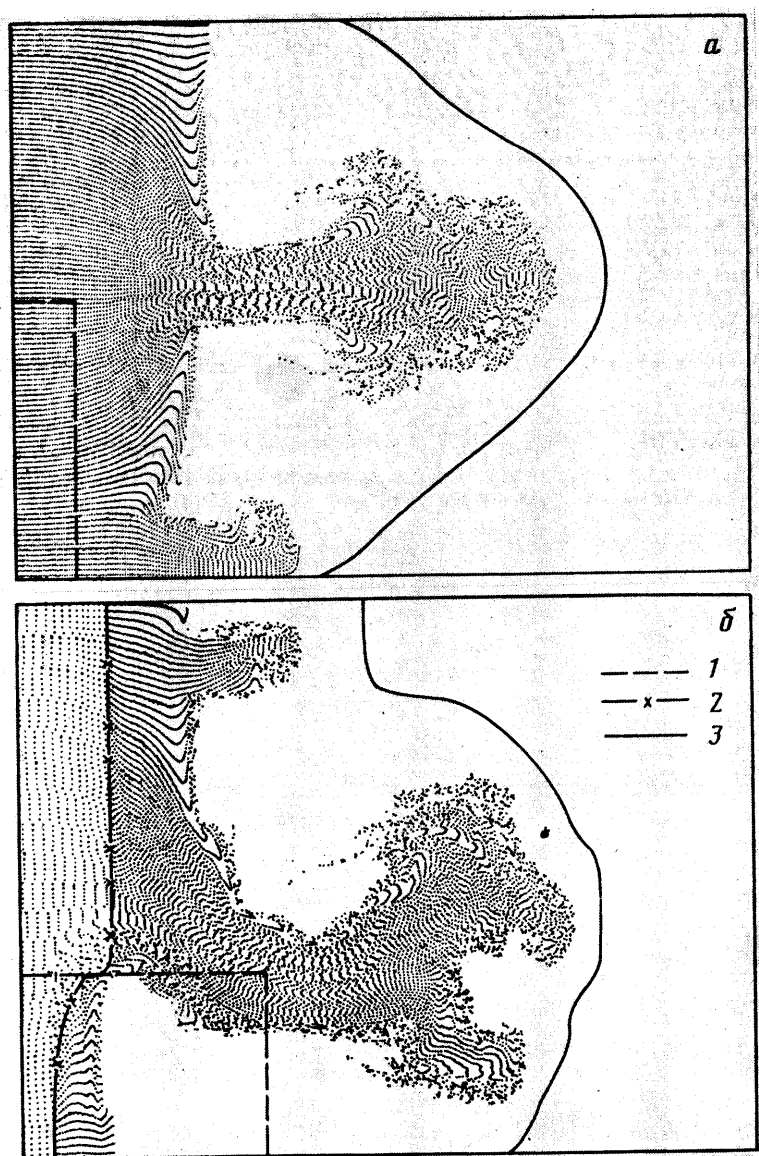
Фиг. 4

случае уменьшение ширины «языка» за счет притока к нему нефти было незначительным.

При вытеснении нефти растворителем из пласта с включением, имеющим пониженную проницаемость, наблюдается такая же картина течения. Отличие заключается лишь в том, что «язык» развивается во внешней по отношению к включению области течения (фиг. 2, *a* и *b* — $\tau=0,2$ и $0,3$; $k_0=0,5$, $\tau_0=0,2$; кривая 3 — асимптотическая форма одиночного «языка»). Остальные исходные данные те же, что и в рассмотренном выше примере с повышенной проницаемостью включения.

Когда включение не примыкает к линии нагнетания, до момента подхода к нему растворитель практически равномерно по всей ширине охватывает пласт своим воздействием.

Если включение (например, пониженной проницаемости) не примыкает к непроницаемой границе, то при его обтекании растворителем об-



Фиг. 5

разуются два «языка». Их суммарная ширина близка к ширине одиночного (фиг. 3).

При $M_1 \geq 20$ характер течения такой же, как и в описанном выше случае. При меньших значениях параметра M_1 ($1 < M_1 < 20$) картина течения другая. Так, если растворитель движется в пористой среде с включениями, имеющим пониженную проницаемость, то в период обтекания включения не образуется «языков», близких по форме к асимптотическим (фиг. 4, а, $\tau=0,3$, $M_1=3$, $M_2=1,5$, $\tau_0=0,2$, $k_0=0,50$, $s_{01}=0,01$). Они начинают формироваться только при достаточно больших значениях τ , возрастающих с уменьшением M_1 (фиг. 4, б — $\tau=0,6$). Поэтому до прорыва растворителя в добывающую галерею они могут не успеть приобрести асимптотическую форму, соответствующую скорости и направлению движения.

При снижении M_1 и M_2 уменьшается и затекание нефти в зоны, промытые растворителем. Однако при этом возрастает внедрение воды, проталкивающей оторочку, в ее тыльную часть [11] (фиг. 4, б).

При больших значениях M_1 оторочка растворителя ($\tau_0 \leq 0,3$) разрывается на отдельные части при любом $k_0 \neq 1$. Это происходит с одной стороны из-за отсечения «языков» от остальной части оторочки за счет повторного нефтенасыщения, а с другой — за счет защемления растворителя в этой части водой. При небольших M_1 разрыв оторочки может и не произойти, если вода практически полностью вытесняет растворитель и проницаемость включения мало отличается от проницаемости основной области.

При доотмыве нефти растворителем (т. е. при нагнетании его после обычного заводнения) также происходит процесс «языкообразования» (фиг. 5, $s^*=0,26$, $M_1=20$, $M_2=10$, а и б — $\tau_0=0,3$ и $0,2$). Однако в этом случае форма «языка» растворителя оказывается более чувствительной к местоположению включения, чем при первоначальном вытеснении нефти. Так, если «язык», сформировавшийся при обтекании включения, существенно смещен относительно прямой $y=L_y/2$, то его головная часть начинает раздваиваться и наблюдается тенденция к образованию нового «языка», расположенного ближе к этой прямой (фиг. 5, б).

Такая особенность движения растворителя при доотмыве связана с формированием вокруг «языка» зоны с дополнительно отмытой нефтью, имеющей пониженную проводимость (кривая 3 на фиг. 5, а, б). За счет этого фильтрационные сопротивления зон между несимметрично расположенным «языком» и непроницаемыми границами оказывается существенно различными, что и вызывает изменение направления течения растворителя.

При двумерном течении маловязкий растворитель и дополнительно отмытая им нефть почти одновременно прорываются в добывающую галерею и отбираются совместно, так как основная часть нефтяного вала располагается вдоль боковой поверхности «языка». Этот эффект был обнаружен ранее экспериментально в опытах на плоских моделях [14].

3. Остановимся теперь на количественной оценке полученных результатов и влияния различных факторов на эффективность рассматриваемого процесса.

Движение «языка» растворителя характеризуется двумя основными параметрами: относительной шириной λ и безразмерной скоростью его продвижения U , выраженной в долях от средней истинной скорости фильтрации нефтяной фазы в данном сочетании.

Если включение имеет относительно небольшую длину и расположено вблизи линии нагнетания, основной стадией течения является та, которая имеет место после прохождения растворителем включения.

При относительно небольшом значении M_1 , как уже отмечалось, «язык» растворителя в течение этой стадии не успевает приобрести асимптотическую форму, поэтому его ширина и скорость зависят от размеров включения и его проницаемости. При достаточно больших M_1 ($M_1 \geq 20$) асимптотическая ширина «языка» является очень устойчивой величиной, зависящей фактически только от объема оторочки. Так, при $\tau_0=0,1$ максимальная относительная ширина «языка» λ составляет примерно $1/3$, при $\tau_0=0,2$ $\lambda=2/5$, а при $\tau_0=0,3$ $\lambda=0,42$. Главным фактором, влияющим на его скорость, при фиксированном λ является параметр M_1 . Если $\lambda=1/3$, то при $M_1=20$ и 100 $U=2,7$ и $2,9$. Известная теоретическая оценка значений скорости одиночного «языка» [12] дает близкие результаты.

Относительная проницаемость включения и его местоположение почти не оказывают влияния на максимальную ширину «языка» и его скорость при $M_1 \geq 20$. Если включение имеет длину, близкую к длине пласта, то основной стадией течения является движение растворителя вдоль

его границы. При этом лишь часть области с повышенной проницаемостью (само включение или внешняя по отношению к нему зона) охватывается воздействием растворителя. Ширина образующего «языка» достигает только $\frac{1}{3}-\frac{2}{5}$ ширины этой зоны.

В рассмотренном выше варианте, соответствующем случаю вытеснения нефти оторочкой растворителя при $\tau_0=0,1$, $s_{01}=0,15$, $M_1=20$, $M_2=10$, $k_0=2$, прирост конечной нефтеотдачи $\Delta\eta$ при $\tau=2$ составил 0,14 ($\eta=0,74$ и 0,6 при вытеснении нефти оторочкой растворителя и водой). Важно отметить, что значение $\eta=0,74$ не согласуется с расчетным коэффициентом охвата пласта воздействием реагента, равным 0,7. Действительно, если считать в участках пласта, где прошел растворитель, вытеснение нефти полным, что соответствует принятой модели, то величина конечной нефтеотдачи должна достигать 0,85. Меньшее значение получаемой нефтеотдачи связано с затеканием нефти в тыльную часть «языка» растворителя, т. е. повторным нефтенасыщением отдельных участков пласта. На фиг. 1, в показана граница области, в которой не остается нефти после вытеснения (кривая 4). Видно, что при $\mu_{11}=0,1$ почти весь растворитель, содержащийся в «языке», замещается нефтью. Всего в этом случае отбирается около 50% растворителя, закачанного в пласт, а при $\mu_{11}=0,667$ и тех же значениях остальных параметров ($s_{01}=0,15$, $\tau_0=0,1$) — менее 4%. Расчеты показали, что на отбор растворителя помимо значений τ_0 и s_{01} влияют оба параметра M_1 и M_2 . При большой величине M_1 образующиеся «языки» значительно опережают фронт нагнетаемой воды, а при повышении M_2 растет доля растворителя, вытесняемого нефтью, что также приводит к увеличению его отбора.

Отметим, что, хотя движение оторочки растворителя является гидродинамически неустойчивым, при больших значениях количество отобранной нефти мало зависит от проницаемости и размеров включений, расположенных на одинаковом расстоянии от линии нагнетания. Так, если $k_0=10$, то конечная нефтеотдача на 4% ниже, чем при $k_0=2$ ($M_1=20$). Увеличение размеров включения по любой координате в 2 раза приводит к уменьшению $\Delta\eta$ и η только на 0,01. Это связано с быстрым выходом течения на асимптотический режим, соответствующий движению «языка» растворителя с практически постоянной шириной.

При $\tau_0=0,2$ и тех же значениях остальных параметров $\Delta\eta=0,16$, а при $\tau=0,3$ $\Delta\eta=0,18$. Относительно небольшое увеличение нефтеотдачи при трехкратном возрастании объема оторочки объясняется тем, что основная часть закачиваемого растворителя идет на образование «языка», ширина которого мало меняется с увеличением τ_0 . При увеличении μ_{11} от 0,02 до 0,667 ($\mu_{10}=2$, $\mu_2=1$) нефтеотдача возрастает на 0,12, причем наиболее существенный рост η имеет место при $0,1 \leq \mu_{11} \leq 0,667$ — от 0,74 до 0,82.

С возрастанием величины s_{01} нефтеотдача снижается. Однако в характере этого снижения имеется существенное различие между случаями одно- и двумерного течений, особенно при больших значениях M_1 и M_2 . В первом изменении s_{01} от 0 до 0,1 не оказывает влияния на полученные результаты ($\eta=1$), а во втором — при $k_0=4$ приводит к снижению нефтеотдачи от 0,844 до 0,773 для $\tau_0=0,1$. Дальнейшее увеличение значения s_{01} , наоборот, существенно сказывается при одномерном течении. В этом случае нефтеотдача за счет увеличения s_{01} от 0,1 до 0,15 понижается на 0,13, а при двумерном — на 0,06. Это связано с тем, что при двумерном течении часть оторочки растворителя в виде «языка» движется быстрее, чем в одномерном потоке при тех же условиях, а часть — медленнее. Та часть оторочки, которая продвигается медленно, имеет небольшую толщину и быстро переходит в неподвижное состояние при $s_{01} \geq 0,1$. Другая, опережая фронт жидкости, проталкивающей оторочку, достигает линии отбора даже при $s_{01}=0,2$ и $\tau_0=0,1$, так как она в значительной степени вытесняется нефтью, притекающей к боковой поверхности «языка».

Полученные результаты свидетельствуют о том, что процесс языкооб-

разования при вытеснении нефти маловязким растворителем приводит к уменьшению охвата пласта воздействием реагента и раннему прорыву его в добывающие скважины. Кроме этого, при применении метода после заводнения из-за формирующихся «языков» дополнительно отмытая нефть выходит из пласта совместно с растворителем, а при использовании воды в качестве жидкости, продвигающей оторочку, наблюдается повторное нефтенасыщение отдельных участков пласта. Этот эффект, снижающий отбор нефти и увеличивающий отбор растворителя, возрастает с уменьшением отношения вязкости растворителя, возрастает с уменьшением отношения вязкости растворителя к вязкости воды. Следует подчеркнуть, что рассматриваемая задача соответствует течению в горизонтальной плоскости и полученные выше результаты не могут непосредственно переноситься на случай течения в плоскости вертикального сечения пласта, так как при этом существенную роль играют диффузионные и гравитационные эффекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаевский В. Н., Бондарев Э. А., Миркин М. И. и др. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 190 с.
2. Индельман П. В., Кац Р. М., Швидлер М. И. Численное моделирование процессов неустойчивого фильтрационного вытеснения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 2. С. 20–27.
3. Забродин П. И., Раковский Н. Л., Розенберг М. Д. Вытеснение нефти из пласта растворителями. М.: Недра, 1968. 224 с.
4. Зазовский А. Ф. Об устойчивости фронтального вытеснения жидкостей в пористой среде при наличии межфазного массообмена и фазовых переходов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 2. С. 98–103.
5. Mungan N. Improved waterflooding through mobility control // Canad. J. Chem. Eng. 1971. V. 49. № 1. P. 32–37.
6. Зайдель Я. М., Леви Б. И. Численное моделирование неустойчивого движения оторочки раствора полимера в пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 5. С. 88–93.
7. Леви Б. И. Трехмерное моделирование заводнения пластов растворами химреагентов // Проблемы нефти и газа Тюмени: Тр. ЗапСибНИГНИ. Тюмень, 1980. Вып. 48. С. 39–42.
8. Колган В. П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. 1972. Т. 3. № 6. С. 68–77.
9. Харлоу Ф. Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 316–342.
10. Зайдель Я. М., Леви Б. И. Применение метода «частиц в ячейке» для численного моделирования процесса двухфазной трехкомпонентной фильтрации // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983. Т. 14. № 5. С. 55–69.
11. Зазовский А. Ф. Вытеснение нефти оторочками двуокиси углерода при ее неограниченной смешимости с нефтью. ИИМ АН СССР. М., 1983. 27 с.— Деп. в ВИНТИ 16.01.84. № 339–84.
12. Saffman P. G., Taylor G. The penetration of fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proc. Roy. Soc. (London). Ser. A. 1958. V. 245. № 1242. P. 312–329.
13. Claridge E. L. Prediction of Recovery in Unstable Miscible Flooding // Soc. Petrol. Eng. J. 1972. V. 12. № 2. P. 143–155.
14. Doscher T. M., Gharib S. Physically scaled model studies simulatin the displacement of residula oil by miscible fluids // Soc. Petrol. Eng. J. 1983. V. 23. № 3. P. 440–446.

Уфа

Поступила в редакцию
3.VII.1986