

УДК 532.546

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ ОТОРОЧКИ РАСТВОРА ПОЛИМЕРА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

ЗАЙДЕЛЬ Я. М., ЛЕВИ Б. И.

В работе рассмотрено численное решение задачи о неустойчивом движении оторочки раствора полимера в пористой среде. Исследуется влияние различных факторов на характер моделируемых течений.

Известно, что эффективность полимерного заводнения нефтяных пластов связана с выравниванием подвижностей вытесняемой (нефть) и вытесняющей (вода) фаз. Это достигается увеличением вязкости воды при добавке в нее полимера и действием фактора остаточного сопротивления. Технологически закачка раствора полимера осуществляется в виде оторочек, продвигаемых по пласту водой. Поскольку вязкость воды меньше вязкости полимерного раствора, при определенных условиях движение задней границы оторочки становится неустойчивым. Возникающие возмущения, разрастаясь, могут привести к разрыву оторочки на отдельные части. Это явление наблюдалось в лабораторных опытах по вытеснению полимерной оторочки водой [1], с ним непосредственно связывается рекомендуемая для применения на практике нижняя граница объема используемой оторочки [2]. Теоретическое исследование данного вопроса практически не проводилось. Известная к настоящему времени работа [3], хотя и посвящена численному исследованию и обоснованию выбора технологии закачки раствора реагента, но основана на модели, в которой распад оторочки учитывается косвенно увеличением относительной фазовой проницаемости для воды. Отсутствие непосредственного математического моделирования этого процесса связано со сложностью расчета процессов неустойчивого вытеснения. К решению таких задач с помощью численных методов приступили сравнительно недавно [4, 5]. Моделирование же неустойчивого движения оторочек растворов химических реагентов значительно сложнее ввиду того, что точность решения соответствующих краевых задач по известным разностным схемам оказывается весьма низкой. В настоящей работе на основе предложенного численного метода проведены расчеты неустойчивого движения полимерной оторочки. Решение двумерной задачи для неоднородной пористой среды позволило численно смоделировать распад оторочки и показало эффективность закачки полимера в виде «программированной» оторочки [1, 2].

1. Плоское фильтрационное движение полимерного раствора в водонасыщенной пористой среде при определенных упрощающих предположениях описывается уравнениями [6, 7]

$$(1.1) \quad m \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial a}{\partial t} + \nabla(Vc) - \nabla(D\nabla c) = 0$$

$$(1.2) \quad \nabla V = 0, \quad V = -kR\mu^{-1}\nabla p, \quad a = \Gamma c$$

Здесь  $m$  — пористость,  $c$  — концентрация реагента в воде,  $a$  — величина адсорбции,  $V$  — скорость фильтрации,  $k$  — абсолютная проницаемость,  $D$  — коэффициент дисперсии,  $R^{-1}$  — фактор остаточного сопротивления,  $\mu$  — вязкость раствора,  $p$  — давление,  $\Gamma$  — коэффициент Генри.

Рассматривалось решение этих уравнений при следующих начальных и граничных условиях:

$$c|_{t=0}=0, \quad c|_{x=0}=c_*(t), \quad p|_{x=0}-p|_{x=L_x}=\Delta p \quad (\Delta p > 0)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0$$

Поставленная краевая задача описывает движение полимерного раствора в прямоугольной области с двумя непроницаемыми границами ( $y=0, L_y$ ). Через две другие границы производится закачка полимерного раствора ( $x=0$ ) переменной концентрации  $c_*(t)$  и отбор ( $x=L_x$ ).

Поскольку при  $D=0$  уравнения (1.1) — (1.2) описывают продвижение границы раздела двух жидкостей, представляющей собой контактный разрыв, его решение при больших значениях числа Пекле ( $Pe=|V|L/D$ ) весьма затруднительно. Применяемый численный алгоритм должен быть достаточно универсальным, т. е. позволять рассчитывать оба предельных случая течения: перенос вещества при наличии разрывов в решении и диффузию.

Для численного интегрирования уравнения (1.1) — (1.2) использовался конечно-разностный метод, основанный на расщеплении исходной задачи по физическим процессам [8]. На каждом временном шаге, зная распределение концентрации по пласту, из (1.2) находим поле давления. Уравнение для давления аппроксимируется на стандартном пятиточечном шаблоне со вторым порядком точности. Затем производится расчет изменения концентрации только за счет переноса. Для этого применялась явная разностная схема типа предиктор-корректор, являющаяся схемой второго порядка точности по  $x, y, t$  во всей расчетной области, кроме узлов, прилегающих к непроницаемой границе. После этого находится изменение концентрации под действием диффузии по явной разностной схеме при больших значениях  $Pe$  и по неявной — при малых.

В используемой схеме расчета переноса значение концентрации на границе между ячейками находится путем квадратичной экстраполяции или интерполяции по значениям в соседних узлах [9]. Она сконструирована таким образом, чтобы, сохранив второй порядок аппроксимации, свести к минимуму влияние узлов, находящихся по разные стороны от «скачков» концентрации и тем самым уменьшить осцилляции численного решения без введения каких-либо операторов сглаживания. Точность разностной схемы проверялась сопоставлением с известными аналитическими решениями одномерных и двумерных задач [10]. Во всех рассмотренных случаях она показала существенно лучшие результаты по сравнению с общепринятыми схемами «уголок» и Лакса — Вендроффа, особенно при расчете продвижения оторочек небольшого объема [9].

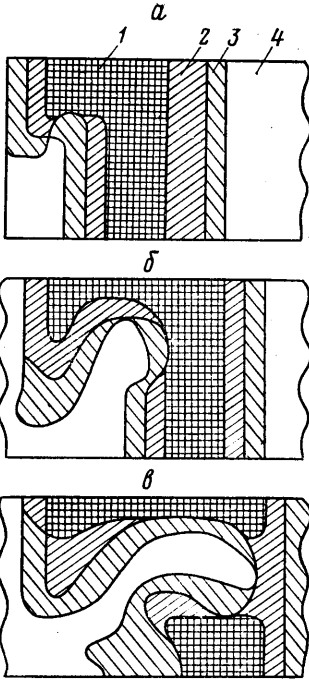
2. Двумерное моделирование процесса продвижения оторочки полимера в пористой среде производилось при следующих исходных данных:  $m=0,2$ ;  $\Gamma=0,1$ ;  $D=10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с;  $\Delta p=10$  МПа;  $L_x=200$  м;  $L_y=20$  м;  $\mu=(1+\alpha c)$  мПа·с;  $R=1-\beta a_{\max}$  ( $a_{\max}$  — максимальное количество адсорбированного реагента в данной точке). Значение коэффициента  $\alpha$  варьировалось в пределах от 1 до 10,  $\beta$  — от 0 до 5.

Используемые данные соответствуют случаю частичного учета необратимости сорбции полимера, т. е. влиянию ее только на фактор остаточного сопротивления. Такой прием применяется в данном случае потому, что полный учет необратимости сорбции (задание различных коэффициентов

Генри в зоне адсорбции и десорбции полимера) приводит к сближению границ оторочки независимо от того, наблюдается вязкостная неустойчивость или нет.

Расчетная область разбивалась равномерной прямоугольной разностной сеткой. По оси  $x$  бралось 48 узлов, а по оси  $y$  — 19.

В первой серии расчетов пористая среда принималась однородной. Возмущение задней границы оторочки задавалось искусственно: в десяти

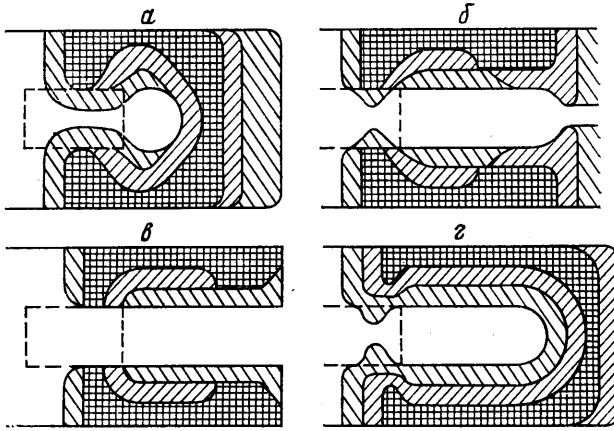


Фиг. 1

ячейках на входе закачка реагента прекращалась несколько раньше, чем в остальных. На фиг. 1 последовательно показаны различные стадии развития заданного возмущения задней границы оторочки при  $\tau_0=0,2$ ;  $\alpha=4$ ;  $\beta=5$  ( $a, b, c$  соответствуют значениям параметра  $\tau=0,3$ ;  $0,5$ ;  $0,7$ ; при этом в областях 1, 2, 3, 4 концентрация изменяется в пределах  $0,8 \leq c \leq 1$ ;  $0,4 \leq c \leq 0,8$ ;  $0,1 \leq c \leq 0,4$ ;  $c < 0,1$ ).

Увеличиваясь ввиду неблагоприятного соотношения подвижностей раствора полимера и воды, оно приводит к распаду оторочки на две части. Основной «язык» воды развивается от края начального возмущения. Если за фронт полимерного раствора принять линию постоянной концентрации  $c=0,5$ , то видно, что ширина образующегося «языка» составляет примерно половину ширины потока (фиг. 1). Это согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными [4].

Вторая серия расчетов была выполнена для неоднородной пористой среды. При этом рассматривались два типа неоднородности: с одним включением, расположенным симметрично относительно прямой  $y=L_y/2$  ( $0,06 \leq x/L_x \leq 0,3$ ;  $0,33 \leq y/L_y \leq 0,66$ ), обладающим проницаемостью  $1,5 \text{ мкм}^2$ , и с шестью включениями с проницаемостью  $0,7$  и  $0,3 \text{ мкм}^2$ . Расположение четырех из них показано на фиг. 4. Пунктиром обозначены границы включения с повышенной проницаемостью, штрихпунктиром — с пониженной. Проницаемость остальной части пласта была принята равной  $0,5 \text{ мкм}^2$ . На фиг. 2 показано развитие вязкостной неустойчивости на заднем фронте оторочки в пласте с единичным включением при  $\alpha=10$ ,  $\beta=0$  ( $a, b, c$  соответствуют значениям параметра  $\tau=0,3$ ;  $0,65$ ;  $0,8$ ). Концентрация закачиваемого раствора менялась скачкообразно:  $c_*(\tau)=1$  при  $\tau \leq 0,2$ ;  $c_*(\tau)=0$  при  $\tau > 0,2$ . Оба фронта оторочки (задний и передний) движутся равномерно до тех пор, пока реагент не подошел к включению с повышенной проницаемостью. Как видно из результатов расчетов, при прохождении оторочки через это включение передний фронт практически не искривляется, так как степень загущения полимером воды выше степени неоднородности. Задний же фронт, достигнув включения, начинает искривляться. Внедряющаяся в оторочку вода оттесняет полимер к непроницаемым границам области и оторочка разрывается на две части, теряя свою сплошность. Форма развивающегося «языка» воды обусловлена тем, что, выходя из включения с повышенной проницаемостью, линии тока расходятся. В последующие моменты времени полимер растекается вдоль непроницаемых границ, в результате чего существенно уменьшается охват пласта воздействием



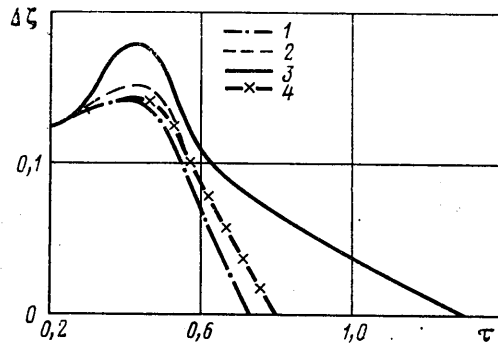
Фиг. 2

реагента. Все это полностью соответствует имеющимся качественным представлениям о характере моделируемого процесса.

Отметим, что применение общепринятой схемы «уголок» для расчета концентрации не позволяет выявить распад оторочки ввиду существенного «размазывания» численного решения.

Для предотвращения разрушения оторочки полимера в работах [1, 2] предлагается специальная технология. Вначале закачивается высококонцентрированная порция реагента, а затем концентрация постепенно снижается до нуля.

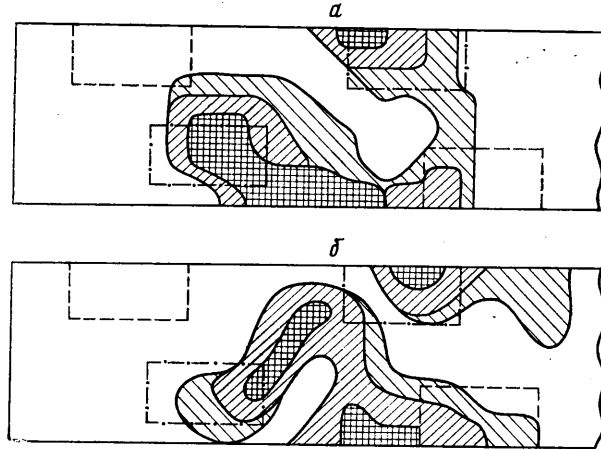
Использование предлагаемой разностной схемы позволило путем численного моделирования теоретически подтвердить целесообразность такой технологии закачки реагента. Был просчитан вариант с описанными выше исходными данными ( $\alpha=10$ ,  $\beta=0$ ). Концентрация закачиваемого раствора менялась следующим образом:  $c_*(\tau)=1$ ,  $0 \leq \tau \leq 0,1$ ,  $c_*(\tau) = 1-5(\tau-0,1)$ ,  $0,1 < \tau \leq 0,3$ ,  $c_*(\tau)=0$ ,  $\tau > 0,3$ . Общая закачка раствора реагента, как и в рассмотренном выше варианте, составила при этом 0,2 поровых объема. В данном случае возмущение, возникающее при прохождении заднего фронта оторочки полимерного раствора через область с повышенной проницаемостью, развивается более медленно. Так, например, к  $\tau=0,8$  «программированная» оторочка еще сохраняет свою «сплошность», в то время как обычная уже распалась на отдельные части (фиг. 2, г, в). Замедленное развитие неустойчивости на заднем фронте «программированной» оторочки связано непосредственным образом с уменьшением градиента вязкости в соответствующей переходной зоне. Естественно, что с уменьшением степени загущения полимерного раствора распад оторочки происходит при больших значениях  $\tau$ . На фиг. 3 показана зависимость величины  $\Delta \zeta$  от  $\tau$ , представ-



Фиг. 3

ляющей собой относительное расстояние между двумя фронтами оторочки вдоль главной линии тока ( $y=L_y/2$ ) (кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям  $\alpha=10; 5; 1$ ). Немонотонный характер этих зависимостей, особенно заметный при малых значениях  $\alpha$ , объясняется некоторым искривлением переднего фронта оторочки при его прохождении через включение с повышенной проницаемостью.

Наличие фактора остаточного сопротивления при сохранении той же самой степени загущения практически не влияет на развитие вязкостной



Фиг. 4

неустойчивости на заднем фронте полимерной оторочки (фиг. 3, кривая 4 —  $\alpha=5$ ,  $\beta=5$ ).

При более сложной неоднородности пласта происходит многократное деление оторочки на отдельные части. Вначале оторочка раствора полимера ( $\tau_0=0,2$ ;  $\alpha=10$ ;  $\beta=0$ ) разрывается на две. Ее разделение происходит «языком» воды, который развивается в направлении от одного высокопроницаемого включения к другому (фиг. 4, а). После этого в большую из образовавшихся частей оторочки внедряется вода, обтекающая снизу одно из включений с пониженной проницаемостью (фиг. 4, б). В дальнейшем образовавшиеся в результате разделения отдельные части оторочки частично смыкаются за счет изменения фильтрационных потоков и вновь распадаются.

Таким образом, на характер продвижения оторочек раствора полимера в неоднородных пористых средах существенное влияние оказывает возникающая вязкостная неустойчивость. Поэтому при численном моделировании полимерного заводнения следует использовать схемы, позволяющие рассчитывать неустойчивые течения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mungan N. Improved waterflooding through mobility control.— *Canad. J. Chem. Eng.*, 1971, v. 49, № 1, p. 32.
2. Jewett R. L., Schurz G. F. Polymer flooding — a current appraisal.— *J. Petrol. Technol.*, 1970, v. 22, № 6, p. 675.
3. Uzoigwe A. C., Scanlon F. C., Jewett R. L. Improvements in Polymer flooding the programmed slug and the polymer-conserving agent.— *J. Petrol. Technol.*, 1974, v. 24, № 1, p. 33.

4. Индельман П. В., Кац Р. М., Швидлер М. И. Численное моделирование процессов неустойчивого фильтрационного вытеснения.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 2, с. 20.
5. Ентово В. М., Таранчук В. Б. Численное моделирование процесса неустойчивого вытеснения нефти водой.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 5, с. 58.
6. Леви Б. И., Станкевич Н. А. О вытеснении нефти оторочкой водорастворимых полимеров.— Изв. вузов. Нефть и газ, 1971, № 4, с. 47.
7. Ентово В. М., Полищук А. М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 3, с. 68.
8. Коновалов А. Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1972. 128 с.
9. Зайдель Я. М., Леви Б. И. Численные схемы решения уравнений двухфазной трехкомпонентной фильтрации.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 11, № 5, с. 75—89.

Уфа

Поступила в редакцию  
27.II.1980