

**О РОЛИ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ  
ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ**

**В. М. ЕНТОВ, А. М. ПОЛИЩУК**

(Москва)

Водные растворы полимеров привлекают внимание как эффективный агент для вытеснения нефти из пористой среды, однако принципы выбора технологической схемы процесса не вполне ясны, поскольку для описания движения полимеров используются с незначительными изменениями обычные теории движения вязких жидкостей. В то же время анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что при движении полимерных растворов весьма существенно взаимодействие растворенного полимера со стенками пор. Полимерное вещество способно накапливаться в пористой среде, изменяя ее фильтрационные характеристики, причем обедненный полимером раствор также меняет свои свойства. Вне зависимости от его детальной природы этот обмен полимерным веществом далее называется сорбцией.

Сорбционные явления приводят к ряду интересных особенностей движения полимерных растворов в пористых средах, в частности, к изменению расхода при постоянном перепаде давления и изменению гидравлической проводимости заполненной полимерным раствором пористой среды после «отдыха» [1-5]. Непосредственно связаны с сорбцией и другие качественные особенности фильтрации полимерных растворов, отмечаемые в литературе [3-16].

По-видимому, их можно объяснить, приняв, что часть полимера практически необратимо адсорбируется скелетом пористой среды (и именно эта часть определяет повышенное сопротивление последующему движению воды), а часть полимера удерживается обратимо, причем распределение этой «рыхло-удержанной» части полимера внутри порового пространства определяется не только термодинамическим состоянием (температурой и средним количеством полимера в единице объема среды), но и интенсивностью фильтрационного движения. Возможный механизм такого явления описан ниже (п.2). Эти же явления могут оказывать решающее влияние и на процесс вытеснения нефти полимерным раствором; учет и анализ их составляет основное содержание предлагаемой работы.

1. Система уравнений движения двух несмешивающихся жидкостей, одной из которых является раствор полимера, может быть записана обычным образом как комбинация уравнений сохранения, закона фильтрации и уравнения кинетики сорбционно-десорбционного процесса. С учетом известных экспериментальных фактов запишем эту систему в виде

$$(1.1) \quad m \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{u}_1 = 0, \quad \operatorname{div} (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) = 0$$

$$(1.2) \quad m \frac{\partial cs}{\partial t} + \operatorname{div} c \mathbf{u}_1 + q = 0$$

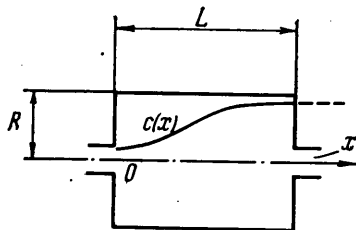
$$(1.3) \quad \frac{\partial a}{\partial t} = q$$

$$(1.4) \quad \mathbf{u}_i = - \frac{k}{\mu_i(c)} f_i(s, a) \operatorname{grad} p$$

$$(1.5) \quad q = \varphi^\pm(a, c, s, \mathbf{u}_1)$$

Здесь  $\mathbf{u}_i$  — скорости фильтрации фаз;  $f_i$  — соответствующие относительные фазовые проницаемости;  $\mu_i$  — вязкости фаз;  $m$  — пористость;  $k$  — про-

ницаемость пористой среды;  $s$  — насыщенность порового пространства первой фазой, под которой далее везде понимается полимерный раствор;  $p$  — давление;  $c$  — концентрация полимерного вещества в растворе;  $a$  — количество сорбированного полимерного вещества;  $\Phi^\pm$  — интенсивность сорбционного процесса (т. е. количество полимерного вещества, сорбируемого в единицу времени в единице объема среды). Здесь не учитывается капиллярный скачок давления между фазами, а также нелинейность закона фильтрации для полимерного раствора — оба эти фактора не существенны для последующего рассмотрения и их легко учесть по мере уточнения исходных данных; не учитывается также возможность растворения полимера во второй фазе. Основным в системе является «разделение» эффектов. Предполагается, что растворенный полимер влияет на вязкость раствора  $\mu_1 = \mu_1(c)$ , тогда как сорбированный полимер изменяет проницаемость среды, т. е. в качестве дополнительного аргумента относительных фазовых проницаемостей взято  $a$ .



Фиг. 1

Любая конкретизация кинетического соотношения (1.5) требует привлечения конкретных моделей или экспериментальных данных.

2. Попытаемся дать модель, объясняющую нестационарные явления (и в первую очередь «отдых» после прекращения фильтрации) сорбционно-диффузионными процессами внутри элементарной фильтрационной ячейки (фиг. 1), под которой понимается отрезок порового канала, состоящий из расширенной части, заканчивающейся сужением; предполагается, что типичный поровый канал представляет собой цепочку элементарных фильтрационных ячеек. Расширенную часть порового канала будем считать сравнительно протяженной и будем описывать ее как одномерный континуум, вдоль которого может происходить диффузия и вынужденный перенос растворенного полимерного вещества, сопровождающийся адсорбцией.

Считая, что скорость адсорбции определяется исключительно темпом подвода (отвода) вещества, имеем

$$(2.1) \quad \frac{\partial c(x, t)}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - q, \quad 0 \leq x \leq L$$

$$(2.2) \quad \partial a / \partial t = 1/2 q R$$

$$(2.3) \quad q = b(c - \gamma(a))$$

Здесь при «микроскопическом» описании сохранены «макроскопические» обозначения.

Гидродинамическим сопротивлением расширенной части фильтрационной ячейки пренебрежем. Суженную часть фильтрационной ячейки будем моделировать сосредоточенным гидродинамическим и диффузионным сопротивлением, полагая

$$(2.4) \quad \Delta p = \xi(c_L) u, \quad c_L = c(L), \quad \xi'(c_L) > 0$$

$$(2.5) \quad S = \alpha(c_L - c_0) + \beta c_L u, \quad c_0 = c(0), \quad A = \varphi(c_L)$$

Здесь  $\Delta p$  — перепад давления на сужении,  $S$  — поток полимерного вещества через сужение; в соотношении (2.5) учтено, что концентрация полимера в начале следующей за рассматриваемой ячейки равна  $c_0$ . Вели-

чина  $A$  обозначает адсорбированное в сужении количество полимера. Для стационарного процесса, считая  $u = \text{const}$ , имеем

$$(2.6) \quad c = c_0' + c_1 \exp(ux/D) \\ c_0' = S_0/u, \quad c_1 = S_0(1-\beta)/[\alpha(\lambda-1) + \beta u \lambda], \quad \lambda = \exp(uL/D)$$

Здесь  $S_0$  — заданный (внешними условиями) полный поток полимерного вещества.

По известной концентрации  $c(x)$  легко определить  $\zeta(c_L)$  и  $\Delta p$ , а также полное количество полимерного вещества в ячейке

$$(2.7) \quad Q = \int_0^L [\pi R^2 c(x) + a(c(x)) 2\pi R] dx + A(c(L))$$

Допустим теперь, что после достижения стационарного состояния (2.6) движение прекращается. Тогда по истечении времени  $\sim L^2/D$  установится однородное распределение полимерного вещества в ячейке с концентрацией  $c_2$ , определяемой из условия

$$(2.8) \quad c_2 \pi R^2 L + a(c_2) 2\pi R L + A(c_2) = Q, \quad c_0 < c_2 < c_L$$

Вместе с соотношением (2.4), неравенства (2.8) показывают, что сопротивление движению  $\zeta(c_L)$  после отдыха будет меньше, чем в установившемся режиме.

Пусть далее после отдыха повторно начинается движение с прежней скоростью  $u$ . Тогда, очевидно, за время  $\tau_2$  система вернется к исходному распределению, в частности гидравлическое сопротивление ячейки снова возрастет. Продолжительность процесса восстановления зависит от величины параметра  $uL/D$  и относительного количества адсорбированного избыточного вещества. Если это количество сравнительно велико, то продолжительность переходного процесса будет определяться временем десорбции, т. е. будет иметь порядок  $R^2/D$ , где  $R$  — характерный поперечный размер ячейки ( $\sim L$ ); в противном случае при  $uL/D \gg 1$  новый режим будет устанавливаться за время  $\sim L/u$ .

Во все время переходного процесса в ячейке текущее значение концентрации  $c(L)$  будет оставаться меньшим, а значение  $c(0)$  большим соответствующих стационарных значений. При этом поток растворенного вещества на протяжении переходного процесса меньше, нежели  $S_0$ , а концентрация полимерного вещества в растворе, выходящем из образца, меньше равновесной концентрации  $c_0$  (т. е. идет «отфильтрование» полимера).

Из баланса полимерного вещества следует, что в заключительной части переходного процесса концентрация полимера в выходящем из образца растворе должна оказаться выше, чем в исходном растворе.

Изменение концентрации полимера в выходящем из образца растворе может быть сравнительно просто обнаружено по изменению вязкости. Таким образом, в работе [4] было отмечено, что при возобновлении течения после длительной остановки концентрация полимера в выходящем растворе выше, чем в поступающем в образец. Однако более детальных сведений не приводится. Кроме того, указанный случай относится, по-видимому, к еще не стабилизированному течению.

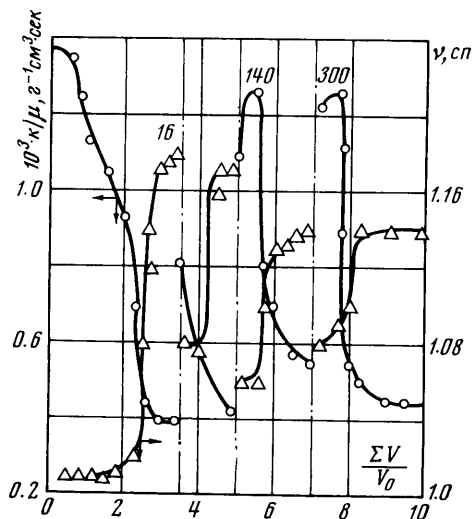
Авторами был проведен соответствующий эксперимент с водным раствором высокомолекулярного полиоксиэтилена WSR-301 концентрации 0.01% (вес). Образцом пористой среды служила стеклянная трубка диаметром 3.2 см и длиной 50 см, заполненная кварцевым песком. Проницаемость составляла 2,96 *дарси*, поровый объем 214 *см*<sup>2</sup> (пористость 0.53). Вначале образец вакуумировался и насыщался дистиллированной водой,

после чего вода замещалась раствором полимера, который длительное время прокачивался через модель при постоянном перепаде напора (1.6 м). В процессе эксперимента измерялся расход жидкости и условная вязкость выходящего раствора. Зависимость  $v(c)$  была взята из работы [17]; она может быть представлена соотношением

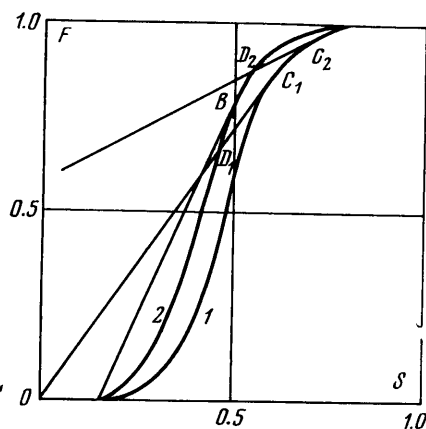
$$(2.9) \quad v/v_0 = 1 + 0.158 \cdot 10^4 c + 0.25 \cdot 10^7 c^2$$

где  $v_0$  — вязкость воды.

Результаты опытов показаны на фиг. 2 в виде зависимости эффективной подвижности раствора в модели  $(k/\mu)_{ef}$  и вязкости выходящего раство-



Фиг. 2



Фиг. 3

ра от полного объема  $V$  жидкости, прошедшей через образец, выраженного в объемах пор  $V_0$ . Вертикальными линиями на графике указаны моменты остановки движения, а цифры около них обозначают время остановки движения в часах. Приведенные данные показывают, что полимер продвигается по образцу значительно ( $\sim 2.5$  раза) медленнее, чем несущая его вода. Это, очевидно, связано с накоплением (сорбцией) полимера в поровом пространстве; условное среднее содержание полимера в расчете на единицу массы поровой воды в 2.5 раза выше концентрации полимера в подводимом растворе.

Такое повышение концентрации полимера, если бы он весь находился в растворе, могло бы привести к увеличению вязкости до  $\sim 1,6$  *снз*. При такой вязкости и неизменной проницаемости среды эффективная подвижность снизилась бы до  $1.85 \cdot 10^3$  *см³ сек/г*; на самом деле подвижность снизилась значительно сильнее (до  $\sim 0.4 \cdot 10^3$ ). Таким образом, в условиях опыта было обнаружено более чем четырехкратное снижение эффективной проницаемости среды. Более того, даже после отдыха (300 час) подвижность остается значительно ниже расчетной. Второй важный факт, установленный в опыте, состоит в том, что повышение подвижности полимера после отдыха сопровождается одновременным снижением вязкости выходящего из образца полимерного раствора, что согласуется с изложенными выше представлениями. В рамках этих представлений эксперимент показывает, что в процессе отдыха значительная часть полимера адсорбируется на стенках поровых каналов в их расширенной части, в то время как

в процессе движения полимерное вещество большей частью скапливается в виде «пробок» в сужениях поровых каналов. Переход из одного состояния в другое определяется диффузионными процессами.

Характерное для полимерных растворов упруговязкое поведение не играет в предложенной схеме сколько-нибудь существенной роли. Часто наблюдаемая «псевдодилатантность» течения при малых скоростях фильтрации объясняется просто сдвигом равновесного распределения полимера в фильтрационной ячейке с изменением скорости; «мгновенная» же зависимость перепада давления от скорости фильтрации линейна.

3. Вне зависимости от того, каков конкретный механизм удержания полимерного вещества — адсорбция, «засорение» среды вязкоупругими ассоциатами согласно [3], или описанный выше адсорбционно-диффузионный механизм, — оно должно оказывать решающее влияние на процесс вытеснения нефти полимерным раствором. Основным является то обстоятельство, что вода, первоначально содержащая полимерное вещество, неизбежно должна уйти вперед, и основное место в процессе вытеснения нефти займет вытеснение чистой водой; на долю полимера останется «доотмыв» нефти, не вытесненной водой. (Четкая постановка вопроса именно таким образом содержится, по-видимому, лишь в недавней работе [18]; однако предложенная в [18] схема расчета не вполне верна.)

Чтобы детальнее разобраться в ходе вытеснения, рассмотрим автономную задачу одномерного вытеснения нефти из пласта, первоначально заполненного нефтью (возможно с некоторым количеством погребенной воды) раствором полимера (аналог классической задачи Баклея — Леверетта) [19, 20]. Интересуясь в основном длительным процессом вытеснения, будем пренебрегать временем установления сорбционного равновесия; скорость закачки раствора в пласт будем считать постоянной, движение — происходящим вдоль оси  $x$ . При этом имеем задачу

$$(3.1) \quad m \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0, \quad u_1 + u_2 = 0$$

$$(3.2) \quad \frac{\partial (mcs + a)}{\partial t} + \frac{\partial (cu_1)}{\partial x} = 0, \quad a = a(c, s)$$

$$(3.3) \quad u_i = -[k/\mu_i(c)] f_i(s, a) \partial p / \partial x$$

$$(3.4) \quad s(0, x) = s_0, \quad c(0, x) = 0, \quad c(t, 0) = c_0, \quad s(t, 0) = s^*$$

допускающую автономное решение вида

$$(3.5) \quad c = c(\eta), \quad u_1 = u(\eta), \quad s = s(\eta), \quad \eta = x/t$$

$$(3.6) \quad \eta \frac{d}{d\eta} [mc(\eta)s(\eta) + a(c, s)] = \frac{d}{d\eta} [c(\eta)u(\eta)]$$

$$(3.7) \quad \eta m \frac{ds}{d\eta} = \frac{du(\eta)}{d\eta}$$

$$(3.8) \quad u(\eta) = F(s, c)U, \quad F_s' \geq 0, \quad F_c' \leq 0, \quad a(0, s) = 0, \quad a_c' \geq 0$$

$$(3.9) \quad s(0) = s^*, \quad c(0) = c_0, \quad s(\infty) = s_0, \quad c(\infty) = 0$$

Здесь обобщенная функция Баклея — Леверетта введена обычным образом

$$(3.10) \quad F(s, c) = f_1(s, a) [f_1(s, a) + f_2(s)\mu_1(c)/\mu_2]^{-1}, \quad a = a(c, s)$$

Искомое решение системы (3.5)–(3.9) составляется из нескольких «кусков», имеющих различное представление, и скачков «ударных волн» [21]. Прежде всего это могут быть участки  $c = \text{const}$ ,  $s = \text{const}$ ; далее, это те участки, на которых однородная относительно производных система (3.6), (3.7) имеет нетривиальное решение, т. е. участки

$$(3.11) \quad \eta = (U/m) v_{1,2} \\ v_{1,2} = 1/2 [F + (s + a_{,c}/m) F_{,s} - F_{,c} a_{,s}/m \mp \\ \mp \{ [F - F_{,s} (s + a_{,c}/m)]^2 + F_{,c}^2 a_{,s}^2 m^{-2} - 2m^{-1} F_{,c} a_{,c} \times \\ \times [F + F_{,s} (s + a_{,c}/m)] \}^{1/2}] (s + a_{,c}/m)^{-1}, \quad 0 < v_1 < v_2$$

на этих участках система (C) сводится к уравнению

$$(3.12) \quad \frac{dc}{ds} = \frac{v_{1,2} a_{,s}}{mF(s, c) - v_{1,2}(c, s)(ms + a_{,c})}, \quad \eta = \frac{U}{m} v_{1,2}$$

определяющему (при заданных начальных условиях) кривую в пространстве  $c, s, \eta$ .

На скачках, сопрягающих участки различных типов, должны выполняться условия сохранения

$$(3.13) \quad \eta [mc^+ s^+ + a(c^+, s^+) - mc^- s^- - a(c^-, s^-)] = \\ = U [c^+ F(c^+, s^+) - c^- F(c^-, s^-)] \\ m\eta (s^+ - s^-) = U [F(c^+, s^+) - F(c^-, s^-)]$$

Вначале рассмотрим простейший случай  $a_{,s} = 0$ . Тогда концентрация  $c$  изменяется только на скачках, причем скачок концентрации  $c$  сопровождается скачком  $s$ . Соответствующее решение имеет вид

$$(3.14) \quad c(\eta) = c_0 \quad (0 \leq \eta \leq \eta_1), \quad c = 0 \quad (\eta_1 < \eta < \infty)$$

При этом из (3.7) и (3.8) имеем

$$(3.15) \quad \eta = (U/m) F_{,s}(s, c_0) \quad (0 \leq \eta \leq \eta_1)$$

При  $\eta > \eta_1$ ,  $c = 0$  и решение получается комбинацией частных решений вида

$$(3.16) \quad \eta = (U/m) F_{,s}(s, 0) \quad \text{либо} \quad s = \text{const}$$

Очевидно, при  $\eta > \eta_1$  решение совпадает с решением задачи о вытеснении нефти водой без добавления полимера (однако при насыщенности на «входе»  $s_1$ , меньшей предельной насыщенности  $s^*$ ), причем величина  $s_1$  подлежит определению. Такое поведение решения легко понять. Из-за отставания фронта полимера вытеснение перед фронтом идет таким образом, как будто в пласт закачивается смесь «чистой» воды и нефти в пропорции, определяемой условиями на фронте продвижения полимера. «Склеивая» решение из решений вида (3.16), получим

$$(3.17) \quad s = s_1 = \text{const} \quad (\eta_1 < \eta < \eta_2 = (U/m) F_{,s}(s_1, 0)) \\ \eta = (U/m) F_{,s}(s, 0) \quad (\eta_2 < \eta < \eta_3) \\ s = s_0 \quad (\eta > \eta_3) \\ \eta_3 = \frac{U}{m} F_{,s}(s(\eta_3), 0) = \frac{U}{m} \frac{F(s(\eta_3)) - F(s_0)}{s(\eta_3) - s_0}$$

Таким образом, решение в этом случае заканчивается «обычным» скачком Баклея — Леверетта при  $\eta = \eta_3$ , причем положение этого скачка и его высота те же, что и для вытеснения незагущенной водой. Решение (3.17) определено полностью через два свободных параметра  $\eta_1$  и  $s_1$ . Для их отыскания служат условия на скачке концентрации и насыщенности при  $\eta = \eta_1$

$$(3.18) \quad \eta_1 = \frac{U}{m} F_{,s}(s^-(\eta_1), c_0) = \frac{U}{m} \frac{F(s^-, (\eta_1), c_0) - F(s_1, 0)}{s^-(\eta_1) - s_1}$$

$$(3.19) \quad F_{,s}(s^-, c_0) = c_0 F(s^-, c_0) / (c_0 s^- + a_0/m)$$

Проще всего вначале найти насыщенность за скачком  $s^-$  из уравнения (3.19), а затем найти  $\eta_1$  и  $s_1$  из (3.18). Решение вида (3.17) будет существовать лишь постольку, поскольку определяемая последним соотношением (3.17) величина  $s_3 = s(\eta_3)$  меньше  $s_1$ , определяемого из (3.18); в противном случае характер решения изменяется; при  $\eta > \eta_1$  осуществляется «классическая» ударная волна

$$(3.20) \quad s = s_1 \quad (\eta_1 < \eta < \eta_3'), \quad s = s_0 \quad (\eta > \eta_3')$$

$$(3.21) \quad \eta_3' = U[F(s_1, 0) - F(s_0, 0)] / (s_1 - s_0) m < \eta_3$$

Последнее условие служит для определения  $\eta_3'$ . Характер решения в этих двух случаях показан ниже на фиг. 4.

Процедуру построения решений в рассматриваемых случаях легко интерпретировать графически. Построим на одном чертеже (фиг. 3) кривые  $F(s, c_0)$  и  $F(s, 0)$  (кривые 1 и 2 соответственно) и проведем из точки  $s = -a_0/m$  касательную к первой из них, а из точки  $s = s_0$  — касательную к кривой  $F(s, 0)$ ; соответствующие точки касания обозначим через  $C$ ,  $B$ , а точку пересечения первой касательной с линией  $F(s, 0)$  — через  $D$ . Тогда решение имеет вид (3.17), если точка  $D$  лежит выше  $B$ , и вид (3.20), если  $D$  ниже  $B$ . При этом  $s_C = s^-$ ,  $s_D = s_1$ ,  $s_3 = s(\eta_3) = s_B$ .

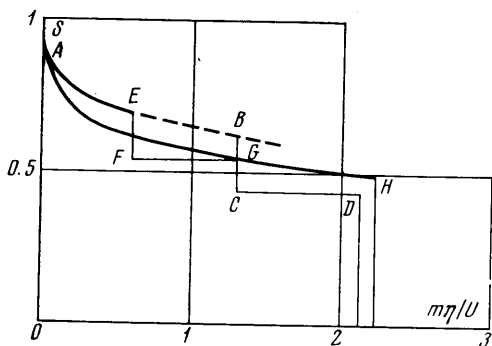
Непрерывным ветвям решения отвечают отрезки  $AC$  и (если  $D$  выше  $B$ )  $DB$ ; скачкам — переход из  $C$  в  $D$  и (если  $B$  выше  $D$ ) в  $E$ .

В общем случае  $a_{,s} \neq 0$  процедура построения решения остается принципиально той же самой. Прежде всего строится решение  $c_1(\eta)$ ,  $s_1(\eta)$  (3.12) при  $i=1$ , отвечающее начальным условиям  $c(0) = c_0$ ,  $s(0) = s^*$ . В некоторой точке  $\eta = \eta_1$ , соответствующей фронту концентрации, происходит скачок концентрации до нуля, а насыщенности до  $s_1^+$ . Неизвестные  $s_1^+$  и  $\eta_1$  находятся из системы соотношений на скачке (3.18), (3.19). (Предполагается, что  $s_1^-$  и  $c_1^-$  выражены в функции  $\eta_1$  из решения системы (3.12).) С учетом этого (3.19) определяет  $\eta_1$  и, следовательно,  $c_1^-$  и  $s_1^-$ ; после этого (3.18) определяет  $s_1^+$ . Построение решения при  $\eta > \eta_1$  производится таким же образом, как и раньше.

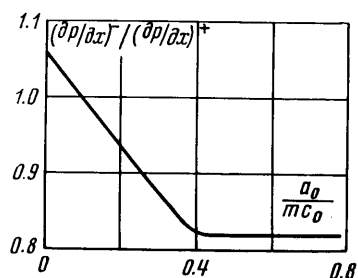
Отметим, что характерная структура решения рассмотренной автомобильной задачи определяется двумя факторами: наличием в заканчиваемой воде некоторого «активного агента» (в данном случае полимерного вещества), изменяющего соотношение подвижностей вытесняемой и вытесняющей жидкостей, и способностью этого «агента» накапливаться в пористой среде, что является причиной отставания фронта его продвижения от фронта закачки. Поэтому рассмотренная задача весьма близка к задачам вытеснения нефти горячей водой [22, 23] и задачам заводнения глинизированных пластов. Здесь роль активного агента играют растворенные в воде соли, которые могут изменять проницаемость пласта.

4. Рассмотренная задача позволяет сделать определенные выводы в отношении применения полимерных растворов при заводнении.

При вытеснении нефти из однородного пласта удержание полимера пористой средой (сорбируемость полимера) играет отрицательную роль. При достаточно большой сорбируемости значительная часть процесса вытеснения приходится на вытеснение чистой, лишенной загустителя воды. На фронте вытеснения сохраняется обычное для вытеснения водой



Фиг. 4



Фиг. 5

соотношение подвижностей фаз, а это означает, что вытеснение загущенной полимером водой не позволяет избежать вредных последствий неустойчивости границы раздела из-за большей подвижности вытесняющей фазы. В этом отношении показательны данные расчета модельного случая вытеснения (фиг. 4), приведенного для фазовых проницаемостей вида

$$(4.1) \quad f_1 = s^4, \quad f_2 = (1+s)(1-s)^3$$

при упрощающих допущениях: 1) остаточная водонасыщенность в нефтяном пласте  $s_0 = 0.15$ ; 2) присутствие полимера в пористой среде вызывает снижение относительной подвижности в 2.5 раза вне зависимости от величины сорбции полимера.

Распределение  $AH$  на фиг. 4 отвечает закачке чистой воды; распределение  $ABCD$  — закачке несорбируемого полимера, распределение  $AEFGH$  — сорбции полимера при  $a_0/mc_0 = 1$ .

Интересно отметить, что погребенная вода оказывает то же влияние, что и сорбция: впереди раствора полимера идет вал чистой воды (участок  $CD$ ). Поэтому в рассматриваемом случае соотношение подвижностей на фронте вытеснения нефти (фиг. 5) только при очень малой величине сорбции оказывается благоприятным ( $(\partial p/\partial x)^- / (\partial p/\partial x)^+ > 1$ ), хотя расчеты, проведенные без учета сорбции и влияния остаточной воды, указывают на стабилизацию течения полимерным раствором. При достаточно большой сорбции ( $a_0/mc_0 > 0.4$ ) соотношение подвижностей на фронте вытеснения оказывается таким же, как для вытеснения водой без добавки полимера.

По-иному сказывается влияние сорбируемости полимера в слоисто-неоднородных пластах. В этом случае закачиваемый полимер поступает вслед за водой в наиболее проницаемый пропласток и далеко продвигается по нему, прежде чем заметно продвинется вытеснение в менее проницаемых пропластках. Накапливаясь в более проницаемом пропластке, полимер избирательно снижает его проницаемость, способствуя тем самым более равномерному и полному вытеснению нефти из пласта в целом при меньшей обводненности. Таким образом, в этом случае сорбируемость полимера может оказаться не отрицательным, а положительным фактором.

Отметим, что приведенное рассмотрение относилось к медленному процессу вытеснения в макропласте, когда допустимо пренебрегать време-



нем установления сорбционного равновесия в каждом элементе среды. В экспериментах, проводимых обычно на сравнительно коротких образцах и при относительно больших скоростях вытеснения, ситуация зачастую обратная. Поэтому необходима определенная осторожность при перенесении результатов лабораторных экспериментов на реальные условия.

В заключение авторы благодарят Г. И. Баренблатта, А. Х. Мирзаджанзаде, И. А. Швецова за предоставленную возможность ознакомиться с работой [3] в рукописи и за обсуждение результатов.

Поступила 5 II 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кукин В. В., Горбатова А. Н., Швецов И. А., Меркулов В. П., Перышкина Т. Н. Фильтрационные характеристики растворов полиакриламида (ПАА). В кн.: «Добыча нефти и газа». Куйбышев, 1968. (Тр. КуйбышевНИИ НП, № 38).
2. Gogarty W. B. Mobility control with polymer solutions. Soc. Petrol. Engrs J., 1967, vol. 7, No. 2.
3. Баренблатт Г. И., Мамедов Ю. Г., Мирзаджанзаде А. Х., Швецов И. А. Неравновесные эффекты при фильтрации вязкоупругих жидкостей. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
4. Desréaux L., Chauveteau G., Martin M. Comportement des solutions de polymères en milieu poreux. Rev. Inst. Franc. Petrole, 1971, t. 26, No. 6.
5. Мирзаджанзаде А. Х., Мищевич В. И., Мамедов Ю. Г. Применение высокомолекулярных полимерных добавок для изоляции поглощающих пластов. Нефть. хоз-во, 1970, № 1.
6. Pye D. J. Improved secondary recovery by control of water mobility. J. Petrol. Technol., 1964, No. 8.
7. Mungan N. Know your facts on polymer floods. Canad. Petrol., 1967, No. 6.
8. Burcik E. J. A note on the flow behavior of polyacrylamide solutions in porous media. Producers Monthly, 1965, vol. 29, No. 6.
9. Lee K. S., Claridge E. L. Areal sweep efficiency of pseudoplastic fluids in a five-spot Hele-Shaw model. Soc. Petrol. Engrs J., 1968, vol. 8, No. 1.
10. Burcik E. J., Ferrer J. The mechanism of pseudodilatant flow. Producers Monthly, 1968, vol. 32, No. 3.
11. Dauben D. L., Menzie D. E. Flow of polymer solutions through porous media. J. Petrol., technol., 1967, vol. 19, No. 8.
12. Мальшева Л. Н., Рабинович А. Б., Кравченко И. И., Дмитриева Н. Н. Адсорбция полиакриламида (ПАА) из растворов на твердой поверхности. Нефтепромышленное дело. Науч.-техн. сб. ВНИИОЭНГа, 1969, № 6.
13. Smith F. W. The behavior of partially hydrolyzed polyacrylamide solutions in porous media. J. Petrol. Technol., 1970, No. 2.
14. Mungan N. Rheology and adsorption of aqueous polymer solutions. J. Canad. Petrol. Technol., 1969, vol. 8, No. 2.
15. Urdaneta V. L., Jase F. G. La inyeccion de agua con polimeros signe siendo el metodo mas economico. Petroleo interamer., 1969, No. 7.
16. Леви Б. И., Станкевич Н. А. О вытеснении нефти оторочкой водорастворимых полимеров. Изв. вузов, Нефть и газ, 1971, № 4.
17. Белоконь В. С., Власов С. А., Калашников В. Н. О влиянии на вихри Тейлора полимерных добавок, снижающих сопротивление трения. Инж.-физ. ж., 1971, т. 21, № 5.
18. Ленчевский А. В. К расчету вытеснения нефти из пласта водой, загущенной полиакриламидом. В кн.: Теория и практика разработки нефтяных месторождений, Уфа, 1972.
19. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963.
20. Баренблатт Г. И., Енгов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., «Недра», 1972.
21. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М., «Наука», 1968.
22. Fayers F. J. Some theoretical results concerning the displacement of a viscous oil by a hot fluid in a porous medium. J. Fluid Mech., 1962, vol. 13, pt 1.
23. Боксерман А. А., Шалимов Б. В. Об одной автоматической задаче неизотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей. Науч.-техн. сб. по добыче нефти. Всес. нефтегаз. НИИ, 1971, вып. 41.