

УДК 532.546

© 2004 г. В. М. КОНЮХОВ, А. Н. ЧЕКАЛИН

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ДВУХФАЗНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ В НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

На основе численного решения уравнений двухфазной многокомпонентной фильтрации исследуются особенности гидродинамических процессов в слоисто-неоднородных нефтяных коллекторах. Дан анализ структур двухфазных потоков, обусловленных строением пластов и гидродинамическим взаимодействием фаз, в задачах вытеснения нефти водой при обычном заводнении и при создании подвижных оторочек загустителя.

*Ключевые слова:* двухфазная многокомпонентная фильтрация, слоисто-неоднородный нефтяной пласт, оторочка загустителя.

Нефтяные пласты имеют сложное геологическое строение и, как правило, образованы слоями с существенно различными физическими свойствами. Кроме того, сами слои нередко содержат высоко- или низкопроницаемые включения. Процесс двухфазной фильтрации в таких пластах сопровождается массообменом между слоями и осложняется наличием включения. При этом, как известно, разработка слоисто-неоднородных пластов с использованием обычного заводнения характеризуется низкой нефтеотдачей из-за неравномерной выработки слоев. Для увеличения их нефтеотдачи в нефтепромысловой практике используются различного рода добавки к закачиваемой воде, способствующие увеличению ее вытесняющей способности и охвату пласта заводнением за счет снижения скорости фильтрации воды в высокопроницаемых слоях. Методы создания высоковязких оторочек можно разделить на два типа в зависимости от того, закачивается ли загуститель в готовом виде, или же он образуется в процессе фильтрации за счет химической реакции между последовательно закачиваемыми в коллектор химическими реагентами, растворенными в водной фазе. Примеры этих методов – полимерное заводнение и формирование внутри пласта оторочек гидрогеля. Исследование вытеснения нефти водой из коллекторов сложного строения с использованием различных рабочих агентов весьма нетривиально и имеет большое практическое значение.

Теория фильтрации готовых смесей не требует описания самого процесса их образования. Для характеристики состава достаточно знать концентрацию загустителя воды. Математическому моделированию процесса вытеснения нефти оторочками первого типа посвящено немало работ (например, [1–4]). Более сложен для изучения второй метод воздействия на пласт. Здесь можно выделить два способа изменения направления потоков жидкости за счет снижения скорости фильтрации воды в высокопроницаемых слоях: 1) создание в них непроницаемых барьеров и 2) формирование подвижных высоковязких оторочек загустителя. В этой области уже накоплен достаточно большой промысловый опыт [5–8]. Анализ влияния непроницаемых барьеров (расположение которых считается заданным в окрестности скважины) на гидродинамику потоков проводится в [9] в рамках модели двухфазной фильтрации. В работах [10, 11] дан численный анализ формирования в призабойной зоне высоковязких барьеров в слоисто-неоднородном пласте за счет взаимодействия двух компонентов в сор-

бироваанном состоянии и без учета химической реакции их в процессе фильтрации. Однако неподвижные барьеры, вообще говоря, малоэффективны при наличии гидродинамической связи между слоями пласта, так как в этом случае такие барьеры легко обтекаются потоком. Вследствие этого их влияние на процесс фильтрации ограничивается лишь некоторой близлежащей окрестностью барьеров. Поэтому в слоисто-неоднородных пластах целесообразно создавать подвижные оторочки загустителей.

Математическая модель, описывающая процесс двухфазной фильтрации с одновременным образованием таких оторочек за счет химически реагирующих компонентов и включающая в себя два блока уравнений: гидродинамический и физико-химический, приведена в [12]. Сравнение методов обычного, полимерного и гидрогелевого заводнения в вертикальном разрезе слоистых коллекторов дано в статьях [13–15].

В работах, связанных с решением задач двухфазной многокомпонентной фильтрации, основное внимание уделялось анализу влияния методов воздействия на основные интегральные характеристики разработки пластов и вопросам повышения эффективности их разработки. Цель данной статьи – исследование возникновения и развития структур в двухфазном фильтрационном потоке в пластах сложного строения и их влияния на распределение фаз и компонентов в пласте.

**1. Математическая модель двухфазной двухкомпонентной фильтрации.** Уравнения двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей в рамках крупномасштабного приближения без учета силы тяжести и сжимаемости пористой среды и жидкостей запишем в виде [1]

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad \operatorname{div}(f\mathbf{V}) + m \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = -\sigma \nabla P \quad (1.1)$$

$$\sigma = kK^*, \quad K^* = \frac{K_1^*}{\mu_1} + \frac{K_2^*}{\mu_2}, \quad f = \frac{K_1^*}{\mu_1 K^*}$$

Здесь  $\mathbf{V}$  – суммарная скорость фильтрации,  $S$  – водонасыщенность;  $P$  – давление,  $\sigma$  – гидропроводность пласта,  $k$  – абсолютная проницаемость;  $m$  – динамическая пористость,  $\mu_i$ ,  $\mathbf{V}_i$ ,  $K_i^*$  – вязкость, скорость и относительная фазовая проницаемость  $i$ -й фазы (нижние индексы “1” и “2” относятся к воде и нефти соответственно);  $f$  – доля воды в потоке (функция Баклея – Леверетта). При моделировании фильтрационного процесса использовались кубические зависимости относительных фазовых проницаемостей от насыщенности  $S$ :

$$K_1^* = \left( \frac{S - S_*}{S_*} \right)^3, \quad S_* \leq S \leq 1; \quad K_1^* = 0, \quad 0 \leq S \leq S_*;$$

$$K_2^* = \left( \frac{S^* - S}{S^* - S_*} \right)^3, \quad 0 \leq S \leq S^*; \quad K_2^* = 0, \quad S^* \leq S \leq 1 \quad (1.2)$$

где  $S_*$  и  $S^*$  – связанная и предельная водонасыщенности.

На границах слоев (границах разрыва абсолютной проницаемости  $k$ ) должны выполняться обычные условия сопряжения:

$$[P] = 0, \quad [V] = 0, \quad [fV] = 0 \quad (1.3)$$

Здесь квадратные скобки обозначают величину скачка. Из двух последних соотношений (1.3) следует, что  $[f] = 0$ . Поэтому функция  $S$  будет непрерывной, если фазовые проницаемости всех слоев одинаковы.

**2. Математическая модель двухфазной трехкомпонентной фильтрации (полимерное заводнение).** Моделирование вытеснения нефти водой с использованием полимерных оторочек может быть выполнено в рамках теории фильтрации готовых смесей, в которой для характеристики состава смеси достаточно знать концентрацию  $C$  загустителя воды, его влияние на вязкость раствора и сорбционные свойства полимера в пластовых условиях. В этом случае двухфазная трехкомпонентная фильтрация (вода – нефть – полимер) описывается системой (1.1), дополненной уравнением сохранения количества примеси [2, 3]:

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left( CS + \frac{a}{m} \right) + \operatorname{div}(Cf\mathbf{V}) = 0 \quad (2.1)$$

Уравнение (2.1) записано в предположении о том, что адсорбция  $a = a(S, C)$  равновесная и необратимая. Вязкость полимерного раствора при его фильтрации в пористой среде зависит от концентрации  $C$ , абсолютной проницаемости коллектора и количества сорбированного загустителя и определяется по экспериментальным данным [3]:

$$\mu_1 = \mu_1^0 (1 + \alpha_\mu C) \left[ 1 + (A - kB) \frac{a(S, C)}{a(S^*, C_{\max})} \right] \quad (2.2)$$

Здесь  $C_{\max}$  – максимальное значение концентрации загустителя,  $\mu_1^0$  – вязкость воды без загустителя (при  $C = 0$ ),  $A$ ,  $B$  и  $\alpha_\mu$  – эмпирические коэффициенты, которые должны быть определены во всем диапазоне значений абсолютной проницаемости рассматриваемого пласта. В расчетах использовалась изотерма сорбции Генри:  $a(S, C) = \Gamma SC$ ,  $C \in [0, C_{\max}]$ ,  $S \in [S_*, S^*]$ ,  $\Gamma$  – коэффициент Генри, зависящий от абсолютной проницаемости и определяемый экспериментально. Условия сопряжения (1.3) дополняются соотношением  $[C] = 0$ .

**3. Математическая модель двухфазной пятикомпонентной фильтрации (гидрогелевое заводнение).** В этом случае оторочка загустителя (гидрогеля) образуется в пласте за счет химической реакции между двумя последовательно закачиваемыми химическими реагентами. Такой процесс может быть описан в рамках теории двухфазной пятикомпонентной фильтрации (вода – нефть – первый химреагент – второй химический реагент – гидрогель). Соответствующая математическая модель будет содержать два блока уравнений: первый – гидродинамический, представленный уравнениями (1.1), и второй – физико-химический, включающий в себя уравнения химической реакции между реагентами, массопереноса этих реагентов и загустителя [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial mS(C_1 + a_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(C_1 \mathbf{V}_1) &= -M_1 v_1 \delta_R \\ \frac{\partial mS(C_2 + a_2)}{\partial t} + \operatorname{div}(C_2 \mathbf{V}_1) &= -M_2 v_2 \delta_R \\ \frac{\partial mS(C + a)}{\partial t} + \operatorname{div}(C \mathbf{V}_1) &= Mv \delta_R, \quad \delta_R = \kappa_+ [C_1]^{v_1} [C_2]^{v_2} - \kappa_- [C]^v \end{aligned} \quad (3.1)$$

При описании массообмена с учетом физико-химических процессов в уравнениях (3.1) сделаны следующие предположения. Во-первых, смесь состоит из двух компонентов  $R_1$  и  $R_2$  с молекулярными массами  $M_1$ ,  $M_2$  и массовыми концентрациями  $C_1$ ,  $C_2$ , реакция между которыми  $v_1 R_1 + v_2 R_2 = vR$  определяет концентрацию  $C$  загустителя  $R$ . Во-вторых, состав смеси (водной фазы) влияет на двухфазную фильтрацию только

через зависимость вязкости водной фазы от концентрации загустителя  $\mu_1 = \mu_1(C)$ . Последнее соотношение (3.1) определяет величину  $\delta_R$  – разность чисел актов реакции в прямом и обратном направлениях за единицу времени,  $[C] = C/M$  – число молей компонента в единице объема жидкости,  $M = M_1 + M_2$  – молекулярная масса,  $a_1, a_2, a$  – массы компонентов в неподвижном (сорбированном) состоянии, связанные с подвижными концентрациями изотермами сорбции  $a_1 = a_1(S, C_1), a_2 = a_2(S, C_2), a = a(S, C)$ . Для того чтобы второй реагент мог догнать первый, необходимо, чтобы сорбция первого была либо больше второго, либо необратимой.

При использовании приближения локального химического равновесия числа актов реакции в прямом и обратном направлениях равны, так что  $\kappa_+[C_1]^{v_1}[C_2]^{v_2} = \kappa_-[C]^v$  или  $C_1^{v_1}C_2^{v_2}/C^v = \kappa$ , где  $\kappa$  – константа химической реакции.

Появление последнего соотношения приводит при  $\delta_R = 0$  в уравнениях (3.1) к переопределению модели: добавляется одно “лишнее” уравнение. Разрешение этого кажущегося противоречия состоит в следующем. Пусть  $\tau$  – время установления химического равновесия. Время пребывания компонентов в физически элементарном объеме масштаба  $l$  есть  $\bar{\tau} = ml/V_1$ . Если  $\tau \ll \bar{\tau}$ , то по сравнению с гидродинамическим изменением концентраций химическое равновесие устанавливается практически мгновенно. Это означает, что число актов реакции за время  $\bar{\tau}$  очень велико, и величина  $\delta_R$  представляет собой неопределенную разность больших чисел. В этой ситуации принято величину  $\delta_R$  считать неизвестной. Тогда “парадокс” переопределенности снимается. Физически сочетание всех уравнений (3.1) в этом случае означает, что состав смеси очень близок к равновесному, скорость реакции в обоих направлениях очень велика, разность числа пробегов реакции в обе стороны неизвестна и равна  $\delta_R$ .

Условия сопряжения (1.3) на границах разрыва абсолютной проницаемости дополняются соотношениями  $[C_1] = 0, [C_2] = 0, [C] = 0$ .

Построенная система дифференциальных уравнений относительно функций  $S, C_1, C_2$  – гиперболическая, а относительно  $P$  – эллиптическая. Поэтому предполагается, что функции  $S, C_1, C_2$  принадлежат классу однозначных, кусочно-непрерывных, ограниченных функций, а  $P$  – классу непрерывных функций с кусочно-непрерывными производными.

Для решения описанных выше задач подземной гидромеханики разработаны численные методы [12], эффективные алгоритмы и программное обеспечение, позволяющее проводить многовариантные расчеты вытеснения нефти из пластов различного строения при различных методах воздействия.

**4. Гидродинамические эффекты при двухфазной многокомпонентной фильтрации в слоисто-неоднородных пластах.** Как известно, слоистая неоднородность пласта приводит к возникновению перетоков между слоями, а неоднородность по проницаемости самих слоев влияет на направление потоков жидкостей. Однако процесс двухфазной фильтрации оказывается значительно сложнее, и некоторые его особенности не могут быть объяснены только этими факторами. С целью детального изучения этого процесса были проведены специальные вычислительные эксперименты. Анализ их результатов показал, что в полях скоростей фильтрационных потоков возникают и развиваются подвижные и неподвижные структуры, обусловленные разрывами абсолютной проницаемости и подвижными скачками искомых кусочно-непрерывных функций – водонасыщенности и концентрации загустителя. Эти структуры приводят к формированию сложной картины фильтрационного течения в пласте, качественные особенности которой слабо зависят от соотношения проницаемостей на линии разрыва и других физических параметров слоев.

В том случае, когда сорбция загустителя зависит от насыщенности, т.е.  $a = a(S, C)$ , его концентрация на переднем фронте, вообще говоря, скачка не имеет. Однако изменение концентрации от нуля до предельного значения происходит в достаточно узкой области [3], потому и в этом случае можно в определенном смысле говорить о скачке концентрации.

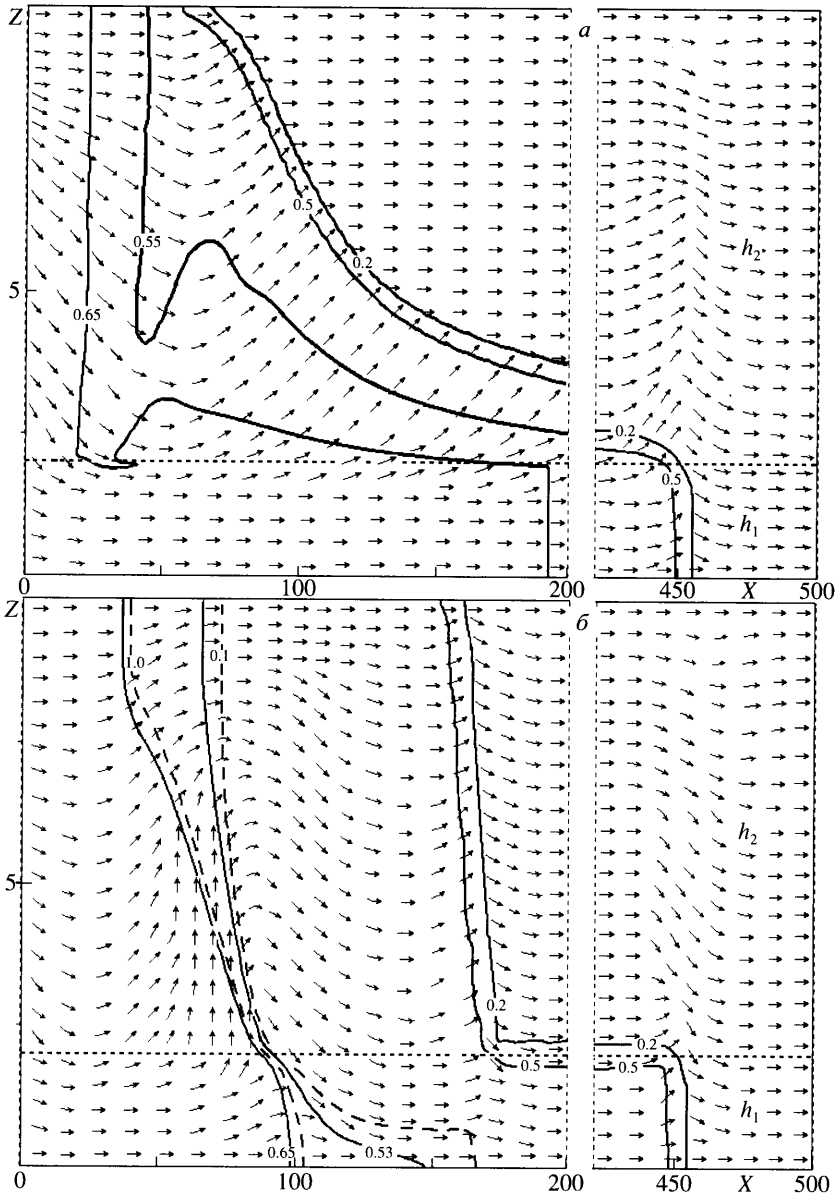
Образование структур в поле скоростей двухфазных потоков и их влияние на распределение фаз и компонентов в слоистом пласте продемонстрируем на конкретных примерах фильтрации в вертикальном разрезе слоистого прямоугольного пласта с непроницаемыми кровлей и подошвой. На правой и левой границах пласта расположены нагнетательная и добывающая галереи, работающие в режиме заданных давлений. Будем полагать, что в начальный момент времени пласт содержит нефть и связанную воду, т.е.  $S(x, z, 0) = S_* = 0.2$ . В задачах многокомпонентной фильтрации качка реагента осуществляется с начального момента.

Рассмотрим простейший случай, когда пласт состоит из двух однородных слоев с абсолютной проницаемостью 1.0 и 0.2 мкм<sup>2</sup> и толщиной 2 и 8 м (фиг. 1). Здесь и далее границы между слоями нанесены пунктирными линиями. На всех рисунках векторы скорости изображаются стрелками одинаковой длины. Для наглядности в увеличенном виде приведены только левый и правый фрагменты пласта, в которых локализованы подвижные структуры суммарного потока. Характерный признак этих структур – изменение направления вертикальной составляющей вектора скорости  $V$  на противоположное, так что профили скорости в них аналогичны профилям обычной волны.

При обычном заводнении насыщенность  $S$  на переднем фронте меняется скачком, скорость перемещения которого вдоль пласта зависит от абсолютной проницаемости пористой среды. В высокопроницаемом нижнем слое он распространяется, сохраняя практически вертикальную форму, а в верхнем менее проницаемом слое линия скачка является вогнутой в силу перетоков жидкости между слоями. На фиг. 1 линия этого скачка расположена между изолиниями насыщенности  $S$  со значениями 0.2 и 0.5. На этой линии относительная проводимость  $K^*$  суммарного потока терпит скачок, что приводит к преломлению вектора  $V$  суммарной скорости фильтрации (левый фрагмент фиг. 1, *a*). Точка пересечения линии скачка с границей разрыва проницаемости является особой точкой. Так, на границе слоев слева от нее вектор  $V$  направлен под некоторым углом вверх, т.е. из высокопроницаемого в менее проницаемый слой, а справа – вниз. Это порождает подвижную структуру в поле скорости – переднюю волну (правый фрагмент фиг. 1, *a*). Глубина ее проникновения по вертикали зависит от параметров слоев, и со временем гребень передней волны может достичь кровли пласта.

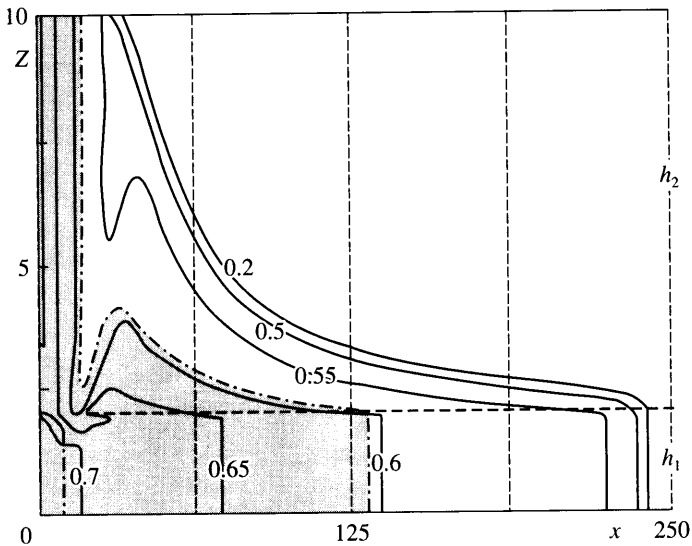
Подобная структура образуется и в точке пересечения линии скачка насыщенности с непроницаемой кровлей пласта (левый фрагмент фиг. 1, *a*). Линия гребня ( $V_z = 0$ ) этой задней волны пересекает границу слоев, и, как видно из рисунка, слева от точки пересечения поток направлен из верхнего менее проницаемого слоя в нижний, а справа от нее, вплоть до переднего скачка, переток на границе имеет обратное направление. Скорость перемещения рассматриваемой структуры вдоль пласта весьма мала из-за низкой проницаемости верхнего слоя, что приводит к ее длительному воздействию на медленное фильтрационное движение фаз и в результате заметно сказывается на распределении водонасыщенности. Это иллюстрируют профили изолиний  $S = 0.55$  и 0.65, которые в отличие от линии скачка насыщенности уже не являются монотонно убывающими по направлению оси  $X$ .

Полимерное заводнение приводит к существенному изменению распределения водонасыщенности (см. фиг. 1, *b*). В менее проницаемом верхнем слое линия скачка функции  $S$  становится почти вертикальной. Возникает горизонтальный участок этой линии, который проходит вдоль границы слоев и в зависимости от соотношения их



Фиг. 1. Поля направлений вектора скорости  $\mathbf{V}$  суммарного потока и изолинии водо-насыщенности  $S$  и концентрации  $C$  полимера в двухслойном пласте при обычном (а) и полимерном (б) заводнении на моменты достижения передними фронтами насыщенности координаты  $x = 450$  м

абсолютных проницаемостей может располагаться либо несколько выше (как в приведенном примере), либо ниже этой границы. Кроме того, наличие загустителя, присутствующего во всей части пласта левее переднего фронта (изолиния  $C = 0.1$ ), приводит к тому, что на всем расстоянии от него до линии переднего скачка функции  $S$  величина насыщенности имеет постоянное значение, образуя так называемую “полочку”.



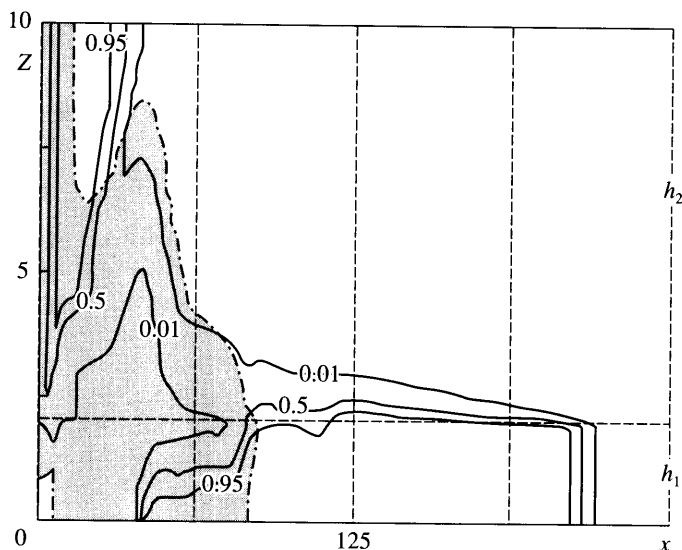
Фиг. 2. Изолинии водонасыщенности  $S$  (сплошные линии) в двухслойном пласте и граница области (штрихпунктирные линии), занятой первым гелеобразующим компонентом, на момент времени, предшествующий закачке второго компонента

Поскольку изолиния  $S = 0.5$  практически совпадает с изолинией концентрации  $C = 0.1$ , то для иллюстрации протяженности полочки на рисунке приведена изолиния  $S = 0.53$ .

Так же, как и при обычном заводнении, перемещение линии скачка насыщенности порождает две подвижные структуры – переднюю и заднюю волны. Однако при полимерном заводнении точка пересечения линии скачка насыщенности с непроницаемой кровлей перемещается значительно быстрее. При этом задняя волна не оказывает воздействия на распределение насыщенности, так как она располагается в области полочки. Кроме того, переток жидкости через границу слоев между передней и задней волнами практически отсутствует.

На левом фрагменте фиг. 1, б хорошо видно, что в поле вектора скорости  $V$  появляются новые структуры, обусловленные зависимостью вязкости (2.2) полимерного раствора, а следовательно, и относительной проводимости  $K^*$  суммарного потока, от концентрации  $C$  загустителя. Эти структуры аналогичны рассмотренным выше и также образуются в точках пересечения линии переднего фронта концентрации  $C$  с непроницаемыми границами и с линиями разрыва абсолютной проницаемости. Самая интенсивная структура с практически вертикальными векторами суммарного потока образуется в окрестности точки пересечения фронта концентрации  $C$  с границей слоев. Здесь расстояние между изолиниями  $C = 0.1$  и  $C = 1$  минимально, так что можно говорить о скачке концентрации  $C$ . Под влиянием нисходящего потока этой структуры передний фронт отклоняется к подошве пласта, а расстояние между изолиниями  $C = 0.1$  и  $C = 1$  в нижнем слое увеличивается.

При создании гидрогелевой оторочки на этапе закачки первого компонента все характеристики процесса вытеснения нефти (поле скоростей, распределение водонасыщенности и т.д.) такие же, как и при обычном заводнении, так как концентрация  $C_1$  не влияет на вязкость водного раствора и фильтрационные параметры пласта. На фиг. 2 показаны изолинии функции  $S$  и область, занятая первым химическим реагентом на некоторый момент времени после прекращения его закачки, предшествующий началу нагнетания второго компонента. Область ненулевых значений  $C_1$  огра-



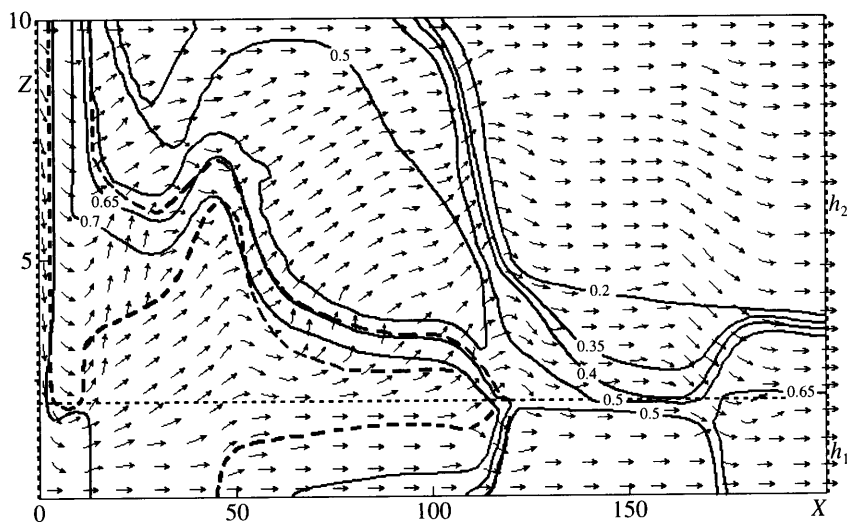
Фиг. 3. Изолинии концентрации  $C_1$  первого гелеобразующего компонента (сплошные линии) в двухслойном пласте и граница области (штрихпунктирные линии), занятой вторым компонентом на момент прекращения его закачки

ничена пунктирной линией и для наглядности заретуширована. Хорошо видно, что в силу сорбции передний фронт  $C_1$  отстает от переднего фронта водонасыщенности  $S$ . В результате он оказывается, с одной стороны, в зоне перетоков из верхнего слоя в нижний (на участке от нагнетательной галереи до точки пересечения гребня волны с границей слоев), порождаемой задней волной насыщенности, а с другой – в зоне интенсивных перетоков из нижнего слоя в верхний. Это приводит к формированию такого распределения концентрации  $C_1$ , у которого граница переднего фронта существенно отличается от соответствующей границы водонасыщенности (фиг. 2) и практически совпадает с изолинией  $S = 0.6$ . Нисходящий поток в задней волне (см. фиг. 1, а) препятствует проникновению первого реагента в верхний слой пласта и формирует вертикальный участок его переднего фронта, простирающийся почти по всей толщине этого слоя. Именно задняя волна стремится разделить оторочку  $C_1$  на две части, и в области ее влияния толщина оторочки минимальна.

То же самое относится и к этапу закачки второго реагента до того момента, пока его передний фронт не догонит задний фронт первого компонента. Затем в области совместной фильтрации обоих реагентов в результате химической реакции образуется подвижный гидрогель, который приводит к существенному изменению фильтрационного процесса. На фиг. 3 область, занимаемая вторым реагентом в момент прекращения его закачки в пласт, ограничена пунктирной линией и заретуширована. Граница области, занятой первым компонентом, соответствует изолинии  $C_1 = 0.01$ . К этому моменту он имеет наибольшую концентрацию ( $C_1 > 0.5$ ) в двух частях оторочки, расположенных в верхнем и нижнем слоях и соединенных между собой перемычкой, в большей части которой концентрация  $C_1$  не превосходит 0.1. Образование гидрогеля происходит в общей области пересечения оторочек реагентов, и величина его концентрации  $C$  определяется значениями  $C_1$  и  $C_2$ . Очевидно, что концентрация  $C$  в перемычке незначительна.

Характерной особенностью процесса вытеснения нефти водой с использованием оторочек гидрогеля является формирование перед ними в обоих слоях подвижной зо-





Фиг. 4. Поле направлений вектора скорости суммарного потока в двухслойном пласте, изолинии водонасыщенности  $S$  (сплошные линии) и граница области, занятой гидрогелем (штрихпунктирные линии), на момент времени, предшествующий разрыву оторочки загустителя

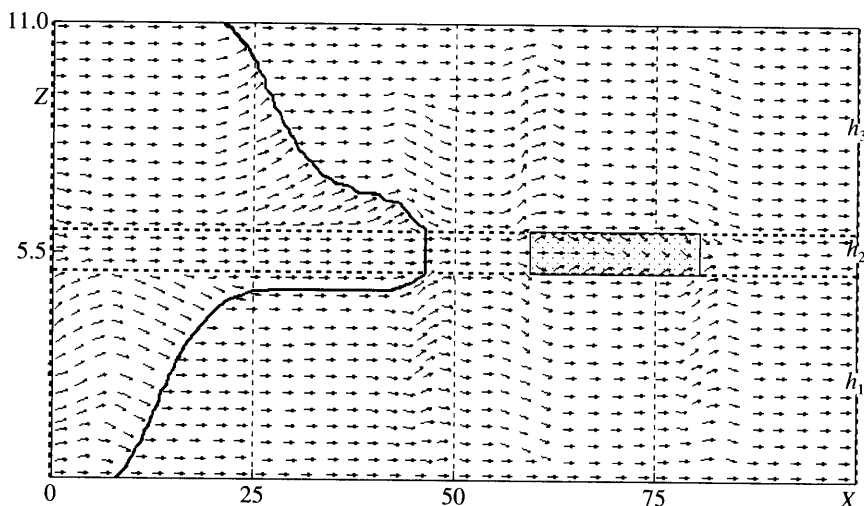
ны повышенного нефтесодержания – нефтяного вала с насыщенностью  $S$ , близкой к константе (в рассматриваемом примере ее значение равно 0.5). В определенном смысле нефтяной вал соответствует полочке насыщенности при полимерном заводнении. Сложная конфигурация нефтяного вала показана на фиг. 4 изолиниями  $S = 0.5$  на момент времени, близкий к моменту разрыва оторочки гидрогеля в окрестности ее пересечения с границей слоев. Здесь же пунктирной линией обозначена граница области, занятой гидрогелем, а сплошными линиями нанесены некоторые изолинии водонасыщенности  $S$ .

Так же, как и при использовании полимерного загустителя воды, образование подвижной оторочки гидрогеля и нефтяного вала перед ней приводят к формированию соответствующих структур в поле суммарной скорости фильтрации (фиг. 4).

На переднем фронте нефтяного вала поток является нисходящим практически по всей толщине верхнего слоя, что приводит к снижению водонасыщенности в нем на участке, расположенном над нефтяным валом в нижнем слое.

В точке пересечения переднего фронта загустителя с границей слоев, расположенной в окрестности заднего фронта нефтяного вала, возникает еще одна подвижная структура. Нисходящий поток в этой волне перед оторочкой снижает концентрацию  $C_1$  первого компонента в верхнем слое и отжимает его к подошве пласта. Вследствие этого область образования гидрогеля в нижнем слое расположена вдоль нижней его границы. Восходящий поток слева от волны перемещает второй реагент вверх (фиг. 3) и тем самым препятствует разрыву оторочки загустителя в данной окрестности. С другой стороны, воздействие рассматриваемой волны приводит к распаду нефтяного вала на две части, одна из которых расположена в верхнем слое над передним фронтом оторочки, а в высокопроницаемом слое – перед ним. Как и при полимерном заводнении, эта волна способствует формированию вертикального участка переднего фронта насыщенности в этом слое.

В точке пересечения заднего фронта оторочки гидрогеля с непроницаемой подошвой пласта в нижнем слое образуется задняя волна, распространяющаяся почти по



Фиг. 5. Поле направлений вектора скорости  $V$  суммарного потока и изолиния переднего фронта водонасыщенности  $S$  при обычном заводнении трехслойного пласта, содержащего слабопроницаемое включение

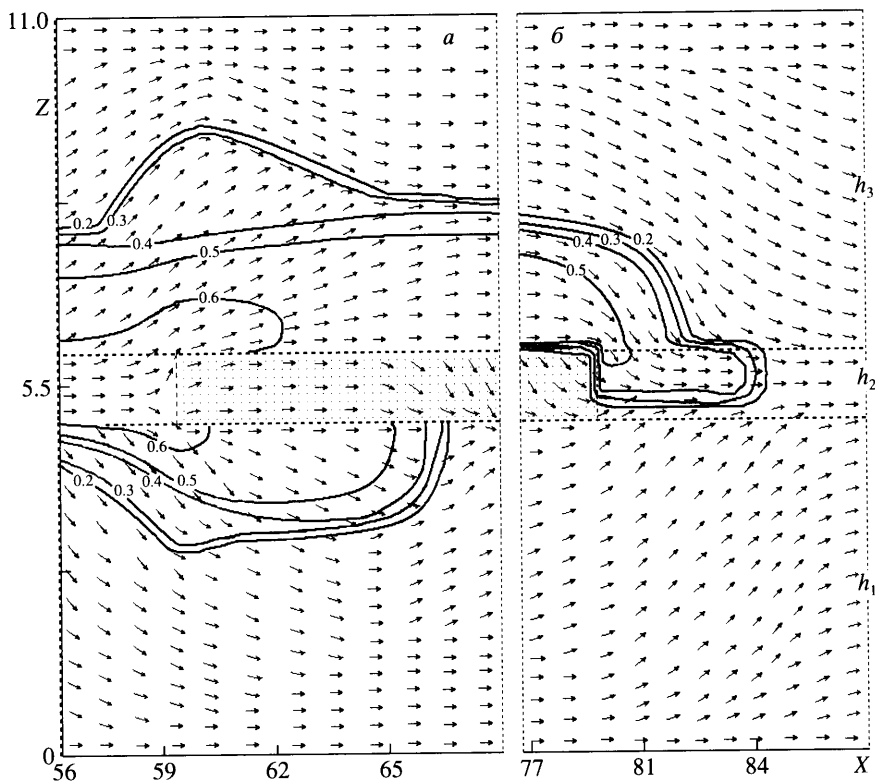
всей толщине верхнего слоя. Ее воздействие формирует характерные конусообразные профили изолиний концентраций всех компонентов и водонасыщенности. Именно в зоне ее влияния находится большая часть оторочки второго реагента. В результате значительная его часть уходит в менее проницаемый слой (даже обгоняя первый компонент, см. фиг. 3), что приводит к уменьшению количества первого компонента и, как следствие, гидрогеля в нижнем слое, именно в котором он нужен для улучшения условий нефтевытеснения. Аналогичные структуры, возникающие за счет взаимодействия фронтов оторочки загустителя с непроницаемой кровлей, дополнительно блокируют ее перемещение вдоль пласта, так что гидрогель остается в этой области до конца разработки пласта, создавая слабопроницаемый барьер в том его месте, где он не нужен.

Из рассмотренных примеров видно, что сложная картина распределения фаз и компонентов в слоистых пластах обусловлена подвижными структурами, возникающими в полях скоростей и перемещающимися в области переменной насыщенности.

Влияние слабопроницаемых включений на поле суммарной скорости фильтрации и распределение водонасыщенности продемонстрируем на примере двухфазной фильтрации в трехслойном пласте длиной 100 м, образованном слоями с абсолютной проницаемостью 0,2, 2,2 и 0,8 мкм<sup>2</sup> и толщиной 5, 1 и 5 м, когда в среднем высокопроницаемом слое находится блок 20-метровой длины с проницаемостью  $k_b = 0.0001$  мкм<sup>2</sup>.

При обтекании нефтью этого включения (на фиг. 5 оно заштриховано) на его передней и задней кромках образуются неподвижные структуры. Здесь поле скоростей приведено на момент времени, когда передний фронт водонасыщенности (нанесенный сплошной линией) еще не достиг включения. Передняя волна идет в верхнем и нижнем слоях, простираясь до кровли и подошвы пласта. Две задние волны, образующиеся у его непроницаемых границ, затухают в высокопроницаемом слое, так что каждая из них оказывает влияние на распределение насыщенности только в своем (верхнем или нижнем соответственно) и весьма незначительно – в среднем слое.

При подходе переднего фронта водонасыщенности к включению начинается его обтекание двухфазным потоком. Передняя волна, образующаяся на горизонтальных



Фиг. 6. Поле направлений вектора скорости суммарного потока и изолинии водонасыщенности  $S$  в окрестности передней (а) и задней (б) кромок слабопроницаемого включения

границах включения, двигаясь в зоне неподвижных структур, значительно усиливается в результате взаимодействия с ними. За счет восходящей части потока в этих структурах передний фронт насыщенности вытягивается в вертикальном направлении, а возникшая нисходящая часть потока стремится вернуть его к поверхности включения. В результате такого взаимодействия подвижных и неподвижных структур формируется своеобразное распределение водонасыщенности в окрестности передней кромки включения, представленное на фиг. 6, а. Здесь карта насыщенности дана на момент времени, когда двухфазный поток уже прошел вдоль всей поверхности включения в верхнем слое и обогнул заднюю кромку. Когда передний фронт насыщенности двигается в среднем высокопроницаемом слое за задней кромкой, то здесь передняя волна отсутствует (фиг. 6, б). Это связано с тем, что в левой части передней волны поток должен быть направлен из более проницаемого слоя в менее проницаемый, т.е. противоположно потокам, возникающим при обтекании включения. Последние в силу своей большей интенсивности препятствуют зарождению структуры в поле скоростей. По мере удаления переднего фронта насыщенности от включения могут снова возникнуть условия для формирования передней волны.

**Закключение.** На основе вычислительных экспериментов показано, что при двухфазной многокомпонентной фильтрации в многослойных неоднородных пластах в поле скоростей суммарного потока формируются подвижные и неподвижные структуры.

Их возникновение связано с взаимодействием подвижных скачков водонасыщенности и концентрации загустителя с границами разрывов абсолютной проницаемости и приводит к различным гидродинамическим эффектам. Такие структуры воздействуют на фильтрационный поток и оказывают заметное влияние на перераспределение фаз и концентраций компонентов в пластах сложного строения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.* Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 208 с.
2. *Ентов В.М., Зазовский А.Ф.* Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. М.: Недра, 1989. 232 с.
3. *Чекалин А.Н., Кудрявцев Г.В., Михайлов В.В.* Исследование двух- и трехкомпонентной фильтрации в нефтяных пластах. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. 147 с.
4. *Volkov Yu.A., Konyukhov V.M., Checalin A.N.* Investigation of the process of water-oil displacement in laminated reservoirs taped by horizontal holes // Proc. Intern. Symp. on Liquid-Liquid Two-Phase Flow and Transport Phenomena, Antalya, Turkey, Begel house, inc. New-York, Wallingford (UK). 1997. P. 435–445.
5. *Hessert J.E., Fleming – III.P.D.* Gelled polymer technology for control of water in injection and production wells // Proc. 3rd Tertiary Oil Recovery Conf. Wichita, Kansas, 1979. V. 4. P. 58–70.
6. *Халимов Э.М., Леви Б.И., Дзюба В.И., Пономарев С.А.* Технология повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1984. 271 с.
7. *Маляренко А.В., Земцов Ю.В.* Методы селективной изоляции водопритоков в нефтяных скважинах и перспективы их применения на месторождениях Западной Сибири. М.: ВНИИОЭНГ, 1987. 34с. Обзор. информация. Сер. Нефтепромысловое дело: (ВНИИОЭНГ. Вып.1).
8. *Kohler N., Lessi J., Tabary R.* Successful application cases of water control treatments in Russia // Proc. Intern. Conf. "Problems of Complex Development and Production of Hard-Accessible Oils and Natural Bitumens. (Production and Refining)", 1994. Kazan, 1994. V. 1. P. 228–254.
9. *Ентов В.М., Турецкая Ф.Д.* Гидродинамическое моделирование разработки неоднородных нефтяных пластов // Изв. РАН МЖГ. 1995. № 6. С. 87–94.
10. *Зубков П.Т., Федоров К.М.* Механизм формирования высоковязких барьеров в неоднородных нефтяных пластах // Изв. РАН МЖГ. 1994. № 1. С. 98–103.
11. *Зубков П.Т., Федоров К.М.* Влияние гелевых барьеров на течение воды и нефти в неоднородном пористом пласте // Изв. РАН МЖГ. 1995. № 2. С. 99–107.
12. *Конюхов В.М., Костерин А.В., Чекалин А.Н.* Образование и фильтрация оторочки загустителя в слоистых неоднородных пластах // Изв. РАЕН. Сер. Мат., мат. моделир., информ. и управление. 1997. Т. 1. № 1. С. 84–109.
13. *Конюхов В.М., Костерин А.В., Чекалин А.Н.* Фильтрация химически реагирующей смеси в слоистых пластах // Тр. 14-й сессии Междунар. школы по моделям механики сплошной среды. Жуковский, Россия, 1997. М.: МФТИ, 1998. С. 97–103.
14. *Волков Ю.А., Конюхов В.М., Костерин А.В., Чекалин А.Н.* О вытеснении нефти в слоисто-неоднородных пластах оторочками загустителя // Сб.тр. науч.-практ. конф. "Приоритетные методы увеличения нефтеотдачи пластов и роль супертехнологий". Бугульма, 1997. Казань: Новое знание, 1998. С. 136–138.
15. *Checalin A.N., Konyukhov V.M., Kosterin A.V.* Simulation of two-phase multi-component filtration in layered reservoir // Intern. Centre for Heat and Mass Transfer. Intern. Symp. on Multiphase Flow and Transport Phenomena, Antalya, Turkey, Begel house, inc. New-York, Wallingford (UK). 2000. P. 209–216.