

УДК 532.546

**АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУХФАЗНОГО
ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ РАСТВОРОМ АКТИВНОЙ ПРИМЕСИ
С УЧЕТОМ МАССООБМЕНА МЕЖДУ ФАЗАМИ**

ЗИСКИН Е. А., РЫЖИК В. М.

Рассматривается одномерное вытеснение нефти двухкомпонентной смесью, причем один из компонентов (активный) может переходить в нефтяную фазу. Эта задача возникает в связи с применением методов увеличения нефтеотдачи, заключающихся в добавлении к основным вытесняющим агентам, воде или газу, примесей, растворимых в обеих фазах. Такими примесями могут быть углекислота, спирты, углеводородные газы. В результате перехода части примеси из нагнетаемой фазы в нефтяную возрастает насыщенность порового пространства нефтяной фазой, что увеличивает ее подвижность. Обычно растворение примеси понижает вязкость нефти, что также способствует увеличению ее подвижности, и как следствие, более полному вытеснению. В работе получены автомодельные решения для различных отношений плотностей фаз, коэффициентов распределения активного компонента между фазами и начальных нефтенасыщенностей пласта.

Близкие по постановке задачи рассматривались ранее. Подробно исследованы автомодельные решения, описывающие вытеснение нефти слабо концентрированными растворами полимеров, ПАВ или иных сорбирующихся примесей, изменяющих отношение подвижностей, но практически не влияющих на объемное соотношение фаз [1, 2]. Были получены автомодельные решения некоторых частных задач вытеснения нефти водными растворами агентов, растворимых в обеих фазах: двуокиси углерода [2] и изопропилового спирта [3]. В работе [4] показано существование автомодельных решений задачи о вытеснении нефти смесью углеводородных газов.

Однако авторы ограничились рассмотрением только отдельных частных случаев, причем суммарный объем фаз при массообмене в [2, 3] предполагается неизменным. В настоящей работе проведено детальное исследование структуры автомодельных решений для широкого диапазона изменения параметров и граничных условий, причем учитывалось изменение суммарного объема фаз при массообмене.

1. Основные уравнения. Рассматривается плоскопараллельное течение в однородном горизонтальном пласте. Движение каждой из фаз подчиняется обобщенному закону Дарси, причем относительные проницаемости могут зависеть не только от насыщенностей, но и от концентраций активного компонента в фазах. Система уравнений переноса состоит из уравнений сохранения массы трех компонентов (активного, пассивного и нефтяного) в обеих движущихся фазах (нагнетаемой и нефтяной). При записи уравнений пренебрегается влиянием диффузии в направлении течения, капиллярных и гравитационных сил, а также адсорбцией активного компонента на породе пласта. Плотности фаз и коэффициент распределения K , равный отношению концентрации активного компонента в нефти к его концентрации в нагнетаемой фазе, считались постоянными. При указанных допущениях система уравнений многофазной многокомпонентной фильтрации [4] принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \{Sc + K\gamma(1-S)c\} + \frac{\partial}{\partial x} \{Fc + K\gamma(1-F)c\} U = 0$$

$$(1.1) \quad \frac{\partial}{\partial t} S(1-c) + \frac{\partial}{\partial x} F(1-c)U = 0, \quad F = \left[1 + \frac{\mu_1 f_2}{\mu_2 f_1} \right]^{-1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (1-S)(1-Kc) + \frac{\partial}{\partial x} (1-F)(1-Kc) = 0$$

Здесь F — функция Баклея — Леверетта, $t = t_* W/mL$ — безразмерное время, $x = x_*/L$ — безразмерная координата, x_* , t_* — соответствующие размерные величины, m — пористость, L — длина пласта, $W = \text{const}$ — скорость фильтрации при нагнетании, $U(x, t)$ — суммарная скорость фильтрации обеих фаз, отнесенная к W , S — насыщенность нагнетаемой фазы, c — массовая концентрация активного компонента в нагнетаемой фазе, $\gamma = \rho_2/\rho_1$; $f_i(S, c)$ — относительная фазовая проницаемость, $\mu_i(c)$ — вязкость, а ρ_i — плотность i -й фазы ($i=1$ относится к нагнетаемой, а $i=2$ — к нефтяной фазе).

Система (1.1) допускает решения, на которых S , c , U терпят разрыв, причем на скачках должны выполняться условия

$$(1.2) \quad \begin{aligned} V[Sc + K\gamma(1-S)c] &= [FSc + K\gamma(1-F)c]U \\ V[S(1-c)] &= [F(1-c)U] \\ V[(1-S)(1-Kc)] &= [(1-F)(1-Kc)U] \end{aligned}$$

Здесь V — скорость скачка.

Рассматриваемую систему можно привести к виду

$$(1.3) \quad \frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{F-a}{S-a} \frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial F}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial c} + \frac{F-a}{S-a} \frac{K}{\gamma} (\gamma + F - F\gamma) \right\} U \frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

$$(1.4) \quad \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{F-S}{S-a} U \frac{K(1-\gamma)}{\kappa} \frac{\partial c}{\partial x}$$

$$(1.5) \quad \kappa(c) = K\gamma - 1 + Kc(1-\gamma), \quad a(c) = K\gamma(1-c)/\kappa$$

Таким образом, задача может быть сформулирована в виде двух уравнений (1.3) для двух функций S , c . Скорость фильтрации U легко выражается через S и c из уравнения (1.4) путем его интегрирования по x .

Начальные и граничные условия задаются следующим образом:

$$(1.6) \quad S = S_0, \quad c = c_0 \quad (t=0); \quad S = S^\circ, \quad c = c^\circ, \quad U = 1 \quad (x=0)$$

Предполагается, что до начала вытеснения активный компонент в пласте отсутствует, т. е. $c_0 = 0$, а нефть в пласт не закачивается, т. е. $S^\circ \geq S_2$, где $(1-S_2)$ — остаточная нефтенасыщенность при $c = c^\circ$.

Ограничимся в дальнейшем наиболее важным в практике случаем, когда при растворении активного компонента в нефти ее подвижность увеличивается, т. е. $\partial F/\partial c = F_c < 0$ при $S < S_2$. Предполагается также, что $F(S, c) = 1$ при $S \geq S_2$. Тогда выполнены равенства (1.7)

$$(1.7) \quad F(S^\circ, c) = 1, \quad F_s(S^\circ, c) = F_c(S^\circ, c) = 0 \quad (0 \leq c \leq c^\circ)$$

На плоскости (S, F) кривые $F(S, c_*)$, где c_* — параметр, имеют качественно такой же вид, как и функции $F_1(S) = F(S, c^\circ)$, $F_0(S) = F(S, 0)$. Так как $F_c < 0$ при $S < S_2$, то кривые $F(S, c_*)$ ($0 < c_* < c^\circ$) не пересекаются и расположены ниже $F_0(S)$ и выше $F_1(S)$.

Обратим внимание на то, что рассматриваемая система уравнений упрощается, если плотности фаз равны ($\gamma = 1$). Из (1.4) следует, что в этом

случае, как и в [1-3], суммарная скорость фильтрации не зависит от координаты x и вследствие принятой нормировки $U=1$.

2. Анализ автомодельного решения. Рассматриваемая задача допускает автомодельное решение вида $S(\xi)$, $c(\xi)$, $U(\xi)$, $\xi=x/t$, удовлетворяющее следующей краевой задаче:

$$(2.1) \quad \left(\xi - U \frac{F-a}{S-a} \right) \frac{dc}{d\xi} = 0$$

$$(\xi - UF_s) \frac{dS}{d\xi} - \left\{ F_c + \frac{F-S}{S-a} \frac{K}{x} (\gamma - F - F\gamma) \right\} U \frac{dc}{d\xi} = 0$$

$$dU = U \frac{F-S}{S-a} \frac{K(1-\gamma)}{x} dc$$

$$(2.2) \quad \begin{aligned} \xi = \infty: & \quad S = S_0, \quad c = c_0 = 0 \\ \xi = 0: & \quad S = S^0, \quad c = c^0, \quad U = 1 \end{aligned}$$

Подобно [1-3] будем строить автомодельное решение, рассматривая поведение соответствующей ему изображающей точки на плоскости (S, F) . Любому такому решению соответствует путь Φ из точки $Q = \{S^0, F(S^0, c^0)\}$ в точку $P = \{S_0, F(S_0, c_0)\}$. При этом угловым точкам пути Φ ставится в соответствие отрезок автомодельного решения $\xi_1 < \xi < \xi_2$, на котором сохраняются значения всех функций S, c, U . Согласно (2.1), участки автомодельного решения, на которых хотя бы одна из этих функций меняется, могут быть двух типов. На участках непрерывного изменения S при постоянных c и U (S -волны) выполнены соотношения

$$(2.3) \quad \xi = F_s U, \quad dc = dU = 0$$

Если $c=c_*$, этим участкам на плоскости (S, F) соответствует путь изображающей точки по кривой $F(S, c_*)$.

На участках второго типа (Sc -волны) непрерывно меняются все функции S, c, U . Связь между ними и координатой ξ дается соотношениями

$$(2.4) \quad \xi = U \frac{F-a}{S-a}; \quad \frac{dc}{dS} = x \frac{(F-a) - F_s(S-a)}{x F_c(S-a) + K(\gamma + F - F\gamma)(F-S)}$$

Поскольку на автомодельном решении, имеющем физический смысл, координата ξ не может убывать, а концентрация c , согласно условиям (2.2), должна убывать от c^0 до 0, то на таких участках должно выполняться неравенство $d\xi/dc < 0$. В рассматриваемой задаче

$$(2.5) \quad \frac{d\xi}{dc} = \frac{2\gamma K(U-\xi)(K-1)}{(S-a)x^2} = U \frac{2\gamma K(K-1)(S-F)}{(S-a)^2 x^2}$$

Таким образом, если $F(S, c) > S$, решение типа Sc -волны возможно при $K > 1$ и невозможно при $K < 1$.

Скачки, которыми сопрягаются участки непрерывного решения, также могут быть двух типов. На скачках S при постоянных c и U условия (1.2) приводятся к виду

$$(2.6) \quad [c] = [U] = 0; \quad V = U \frac{[F]}{[S]} = U \frac{F_+ - F_-}{S_+ - S_-}$$

При этом на плоскости (S, F) такому скачку ставится в соответствие отрезок прямой, соединяющий точки $\{S_+, F(S_+, c_+)\}$ и $\{S_-, F(S_-, c_-)\}$.

Возможны также совместные скачки S, c, U (Sc -скачки). Если при этом скачок концентрации «полный», т. е. $c_- = c^0$, $c_+ = 0$, то условия (1.2) принимают вид

$$(2.7) \quad V = \psi_1(S_-, \beta) = U_+ \psi_0(S_+, \alpha); \quad U_+ = \frac{K(V-U_-)(1-\gamma)c_0}{K\gamma-1}$$

$$\psi_1(S, \beta) = \frac{F_1(S) - \beta}{S - \beta}; \quad \psi_0(S, \alpha) = \frac{F_0(S) - \alpha}{S - \alpha}$$

$$(2.8) \quad \alpha = a(c_0); \quad \beta = a(0) = \frac{K\gamma}{K\gamma-1}$$

Для выделения физически осмысленного решения, построенного из перечисленных выше элементов, используется дополнительное условие устойчивости [5]: число характеристик, приходящих на линии скачка, должно быть на единицу больше числа переменных. Характеристики, скорость которых равна скорости скачка, также считаются приходящими [1]. Как было показано выше, в рассматриваемом случае имеются две независимые неизвестные функции S и c , поэтому число приходящих на линию скачка характеристик должно равняться трем.

Сформулированное условие устойчивости в общем случае является необходимым. Как будет видно далее, в рассматриваемом случае, с помощью этого условия удается выделить единственное решение системы (1.1).

Характеристики системы (1.1) даются соотношениями

$$(2.9) \quad \frac{dx}{dt} = v_1 = UF_S; \quad \frac{dx}{dt} = v_2 = U \frac{F-a}{S-a}$$

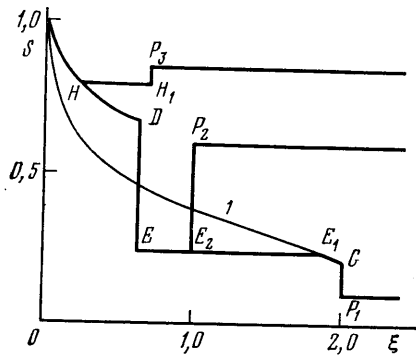
Характеристики первого семейства будут называть S -характеристиками, а второго — Sc -характеристиками. Пусть текущее состояние характеризуется значениями насыщенности $S=S_*$ и концентрации $c=c_*$. Если $\gamma=1$, то характеристические скорости $v_1(S_*, c_*)$ и $v_2(S_*, c_*)$ равны угловым коэффициентам соответственно касательной к кривой $F(S, c_*)$ и прямой, проведенной в эту точку из точки $\{a(c_*), a(c_*)\}$.

3. Построение автомодельного решения. Фигуры 1—3 иллюстрируют решения задачи (1.1), (1.6), имеющие качественно такой же вид, как и решения, описывающие процессы вытеснения нефти из пористой среды водными растворами полимеров, ПАВ, некоторых спиртов, а также смесью нерастворимого и ограниченно растворимого в нефти газов.

Расчеты были проведены при следующих значениях определяющих параметров: $K=0,4$, $c^0=0,6$, $\gamma=10$, $\mu_1=1$, $\mu_2=9-10$ с. Начальным водонасыщенностям $S_0=0,5, 0,6, 0,85$ соответствуют точки P_1, P_2, P_3 на фиг. 1 и 3, $S_0=0$ — точка P на фиг. 2 и 3. Кроме того, проведен расчет при отношении плотностей $\gamma=1$ и начальной водонасыщенности $S_0=0$, которой на фиг. 2 соответствует точка P' . На фиг. 1, 2 приведены графики зависимости насыщенности от автомодельной переменной $S(\xi)$, а на фиг. 3 — соответствующих путей изображающих точек. На фиг. 4 приведено распределение насыщенностей $\bar{S}(\xi)$, а на фиг. 5 — соответствующие пути изображающих точек $\Phi(S)$ для случая вытеснения нефти карбонизированной водой при $K=8$, $c^0=0,05$; $\gamma=1$, $\mu_1=0,5$, $\mu_2=2-24$ с. Начальным водонасыщенностям $S_0=0,2$ и $0,72$ соответствуют точки P_1 и P_2 . На фиг. 4 приведен также график зависимости концентрации двуокиси углерода в нефти $c_2(\xi) = Kc(\xi)$ от автомодельной переменной ξ .

Решение при $c^0=0$ (активный компонент отсутствует не только в пласте, но и в нагнетаемом агенте) суть известные решения Баклея — Левретта. Они приведены на фиг. 1, 2, 4 (тонкие сплошные линии). При расчетах использовались модельные фазовые проницаемости $f_1(S) = S^2$ и $f_2(S) = (1-S)^2$.

Из условия (1.7), которому удовлетворяют используемые здесь функции $F(S, c)$, можно заключить, что автомодельное решение не может начинаться с Sc -волны, а также участка постоянных значений S, c и U , за которым следует Sc -волна. Можно показать также, что скачки из начальной точки Q неустойчивы. Таким образом, любое автомодельное решение

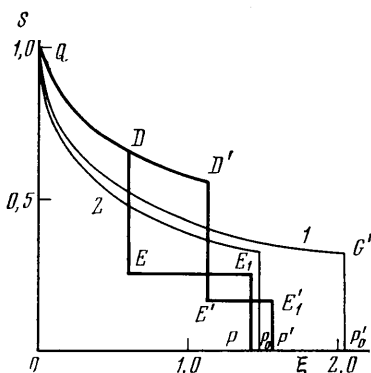


Фиг. 1

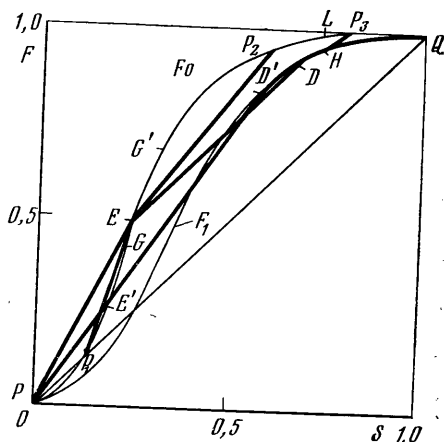
начинается с S -волны. На этом участке массообмен отсутствует, $U=1$, а $c=c^\circ$. На плоскости S, F путь Φ начинается с участка кривой $F_1(S)$. Приравняем количество закачанного к моменту времени t активного компонента к количеству этого компонента, находящегося в пласте, считая, что весь он находится на участке от $x=0$ до $x=x_D$:

$$c^\circ t = \int_0^{x_D} \{c^\circ S + (1-S)K\gamma c^\circ\} dx$$

Отсюда с учетом (1.1) получим, что участок решения типа S -волны, начинающийся при $\xi=0$, может продолжаться только до значения $S=S_D$ такого, что $F_s(S_D, c^\circ) = \psi_1(S_D, \beta)$ (см. фиг. 3).



Фиг. 2



Фиг. 3

На этом участке будет содержаться весь закачанный в пласт активный компонент. На плоскости S, F изображающая точка не может двигаться по кривой $F_1(S)$ далее точки $D = \{S_D, F_1(S_D)\}$, касательная к которой проходит через точку $B = (\beta, \beta)$. Обратим внимание, что на фиг. 3 точки $A = (\alpha, \alpha)$ и $B = (\beta, \beta)$ не отмечены. Их координаты α и β равны соответственно 1,9 и 1,33 при $\gamma=10$ и $-0,267$ и $-0,667$ при $\gamma=1$.

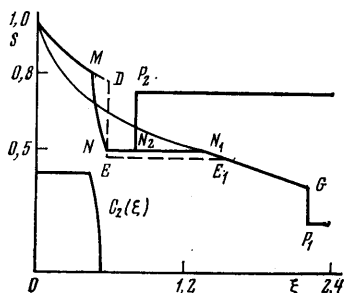
Пусть активный компонент растворяется в нагнетаемой фазе не хуже, чем в нефти ($K \leq 1$). Тогда на участке QD , согласно (2.5), Sc -волна невозможна и из какой-нибудь точки этого участка должен произойти Sc -скачок. Можно показать, что на любом таком Sc -скачке имеются две входящие Sc -характеристики и одна уходящая S -характеристика. Вторая S -характеристика будет входящей лишь при $S \leq S_D$. Таким образом, только в точке D возможен устойчивый Sc -скачок, причем он будет «полный» ($c_- = c^\circ, c_+ = 0$).

Насыщенность S_+ находится из уравнения (2.7) с учетом (2.8), если положить $S_- = S_D$ и $U_- = 1$. Ограничимся рассмотрением наиболее часто встречающегося случая, когда эти уравнения имеют два корня: S_E и S_L ($S_E < S_L$). На плоскости S, F отметим точки $E = \{S_E, F_0(S_E)\}$ и $L = \{S_L, F_0(S_L)\}$ (см. фиг. 3). Если $\gamma=1$, то E и L находятся как точки пересечения кривой $F_0(S)$ и прямой, параллельной BD и проходящей через точку $A = (\alpha, \alpha)$. Легко видеть, что в этом случае уравнение (2.7) всегда имеет два корня. Если начальная нефтенасыщенность достаточно велика ($S_0 < S_L$), следует положить $S_+ = S_E$, иначе значение ξ после скачка будет

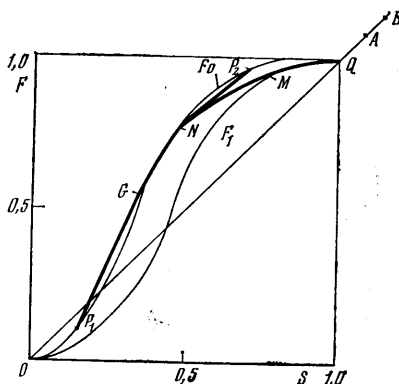
меньше, чем перед ним. Таким образом, S -скачок происходит из точки D в точку E . Дальнейший вид пути ϕ зависит от взаимного положения точек E , P и $G = \{S_D, F_0(S_D)\}$. В точке G касательная к F_0 проходит через P , т. е.

$$F_s(S_G, 0) = \frac{F_0(S_G) - F_0(S_0)}{S_G - S_0}$$

При S_0 , близких к 0, возможно расположение точки G выше точки E на кривой $F_0(S_0)$, т. е. $S_G > S_E$. В этом случае из точки E происходит S -скачок в точку начальных условий P . Путь изображающей точки имеет вид $QDEP$ (фиг. 3). Угловой точке E соответствует на плоскости ξ, S



Фиг. 4



Фиг. 5

участок автомодельного решения EE_1 , на котором сохраняются постоянные значения S, c, U . Начальная и конечная координаты этого участка равны соответственно

$$(3.1) \quad \xi_1 = \psi_1(S_D, \beta), \quad \xi_2 = \frac{F_0(S_E) - F_0(S_0)}{S_E - S_0}$$

Координата S -скачка ξ_2 всегда меньше координаты скачка соответствующего решения Баклея — Леверетта. Распределение $c(\xi)$ будет иметь вид ступеньки: $c = c^0$ при $\xi < \xi_D$ и $c = 0$ при $\xi > \xi_D$. Распределение $S(\xi)$ имеет вид $QDEE_1P$ и приведено на фиг. 2. При увеличении S_0 появляется участок пути изображающей точки EG на $F_0(S)$ и соответствующая S -волна E, G в автомодельном решении. Конечная точка участка постоянных значений S, c, U будет иметь координату $\xi_2 = F_s(S_E, 0)$. Весь путь изображающей точки имеет вид $QDEGP_1$ (фиг. 3), распределение $c(\xi)$ такое же, как и в предыдущем случае, а $S(\xi)$ имеет вид $QDEE_1GP_1$ (фиг. 1). Участок решения рассматриваемой задачи E_1G совпадает с участком соответствующего решения Баклея — Леверетта (при $c^0 = 0, U = U_+ = 0,72$), изображенного на фиг. 1 (кривая I).

При дальнейшем увеличении S_0 в этих решениях исчезает конечный S -скачок и они оканчиваются S -волной. При $S_0 = S_E$ в рассматриваемом решении исчезает и эта S -волна. Если же $S_0 > S_E$, то при $\xi = \xi_2$, полученном из (3.1), участок постоянных значений S, c, U сменяется S -скачком. Этот скачок будет «обратным», т. е. насыщенность до скачка меньше, чем насыщенность после скачка ($S_+ > S_-$). Путь изображающей точки имеет вид $QDEP_2$ (фиг. 3), а распределение $S(\xi) - QDEE_2P_2$ (фиг. 1). При дальнейшем увеличении S_0 координата конечной точки простой волны ξ_2 сначала несколько увеличивается, а потом уменьшается до ξ_1 при $S_0 = S_L$. Если

$S_0 \geq S_L$, то не существует S -скачка и решение заканчивается обратным S -скачком из точки $H = \{S_H, F_0(S_H)\}$ в точку начальных условий P_3 . Величина S_H является большим корнем уравнения (2.5) с учетом (2.6), если положить $S_+ = S_0$ и $U_- = 1$ и решить его относительно S_- . Изображающая точка проходит путь QHP_3 (фиг. 3). Автомодельное решение состоит из S -волны QH , волны постоянства HN_1 , соответствующей угловой точке H пути Φ , и обратного S -скачка H_1P_3 . Распределение $S(\xi) - QHN_1P_3$ показано на фиг. 1, распределение $c(\xi)$ имеет вид ступеньки: $c = c^0$ при $\xi < \xi_H$, и $c = 0$ при $\xi > \xi_H$.

Пусть теперь активный компонент лучше растворяется в нефти, чем в нагнетаемой фазе, т. е. $K > 1$. Это будет, например, при вытеснении нефти карбонизированной водой. В этом случае две S -характеристики уходят с S -скачка, если он происходит на участке, где $F(S, c) > S$ (в частности, на участке QD), и любой такой скачок неустойчив.

Отсюда следует, что изменение концентрации от c^0 до $c_0 = 0$ должно происходить на участке типа S -волны. Как отмечалось выше, при $K > 1$ такие участки возможны. Таким образом, S -волна, начинающаяся при $\xi = 0$, должна смениться S -волной.

Отметим на плоскости (S, F) точку $M = \{S_M, F_1(S_M)\}$, касательная в которой к кривой $F_1(S)$ проходит через точку A (см. фиг. 5), т. е. S_M удовлетворяет уравнению $F_S(S_M, c^0) = \psi_1(S_M, \alpha)$. Если $S < S_M$, то, согласно (2.2) и (2.9)

$$(3.2) \quad \frac{dS}{dc} < 0; \quad v_1 < v_2$$

В точке M эти неравенства меняют знак. Отсюда следует, что при смене S -волны на S -волну в точке, где $S > S_M$, ξ будет убывать, что физически невозможно. Учитывая тот факт, что при $K > 1$ точка M лежит выше точки D на кривой $F_1(S)$, можно сделать вывод, что S -волна должна начинаться на отрезке QM . Если $S < S_M$, то из (3.2) следует, что с убыванием концентрации насыщенность будет возрастать. Такое решение возможно лишь в случае, когда конечная точка S -волны (обозначим ее N) совпадает с точкой начальных условий P , т. е. при высокой начальной водонасыщенности. При этих условиях автомодельное решение состоит из S -волны, участка постоянных значений S, c, U и S -волны.

В случае, когда S_0 не слишком велико, S -волна начинается в точке M . В этой точке $v_1 = v_2$, а $dS/d\xi = \infty$, поэтому начальный участок S -волны мало отличается от скачка. Если точка G расположена на кривой $F_0(S)$ ниже конечной точки S -волны N , путь Φ изображающей (фиг. 5) точки имеет вид $QMNGP_1$. Автомодельное решение будет состоять из S -волны QM , S -волны MN , волны постоянства NN_1 (соответствующей угловой точке N), S -волны N_1G и S -скачка GP_1 . Участок N_1GP_1 совпадает с участком соответствующего решения Баклея — Леверетта. На фиг. 4 приведены графики зависимости от автомодельной переменной насыщенности $S(\xi)$ и концентрации двуокиси углерода в нефти $c_2(\xi) = Kc(\xi)$. Обратим внимание, что можно формально построить решение $QMDEE_1GP_1$ с неустойчивым S -скачком DE . На фиг. 5 пунктирной линией приведен участок такого решения, отличный от устойчивого решения. Если точка начальных условий лежит выше точки N , то изображающая точка на плоскости (S, F) проходит путь $QMNP_2$ (фиг. 5), а в автомодельном решении после волны постоянства NN_2 следует обратный S -скачок N_2P_2 . Распределение насыщенностей будет иметь вид $QMNN_2P_2$ (фиг. 2).

Как отмечалось выше, в [1—3] в отличие от настоящей работы предполагалось, что при массообмене суммарный объем фаз не меняется.

Можно показать, что при принятии этого предположения рассматриваемый процесс описывается уравнениями (1.1)–(1.3), если в них положить $\gamma=1$ при любом соотношении плотностей фаз. На фиг. 2, 3 приведены решения, построенные при $\gamma=10$ и 1 (остальные определяющие параметры совпадают). Первый случай был рассмотрен выше (распределение насыщенностей на фиг. 2 имеет вид $QDEE_1P$).

При $\gamma=1$ распределение насыщенностей имеет вид $QD'E'E_1'P$ (фиг. 2), а изображающая точка проходит на плоскости (SF) путь $QD'E'P$ (фиг. 3). Сравнивая эти графики, можно сделать вывод, что при большой разнице плотностей фаз пренебрежение этим различием при массообмене приводит к значительным погрешностям при построении автомодельного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинская Г. С., Ентов В. М. О неизотермическом вытеснении нефти раствором активной примеси. М., 1978. (Ин-т пробл. мех. АН СССР. Препринт № 112).
2. Claridge E. L., Bondor P. L. A graphical method for calculating linear displacement with mass transfer and continuously changing mobilities. — Soc. Petrol. Eng. J., 1974, v. 14, № 6, p. 609–618.
3. Wachmann C. A mathematical theory for the displacement of oil and water by alcohol. — Soc. Petrol. Eng. J., 1964, v. 4, № 3, p. 250–266.
4. Николаевский В. Н., Бондарев Э. А., Миркин М. И., Степанова Г. С., Терзи В. П. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 190 с.
5. Гельфанд И. М. Некоторые задачи теории квазилинейных уравнений. — Усп. матем. наук, 1959, т. 14, вып. 2.

Москва

Поступила в редакцию
24.I.1979