

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени И.М. ГУБКИНА

Труды

Выпуск 181

**ФИЗИКО - ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ**

МОСКВА - 1985

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
и ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ им. И.И. ГУБКИНА

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных месторождений

Труды

Выпуск 181

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

Под редакцией проф. Ю.П. Желтова

Москва 1985

УДК 622.276.344

Настоящий сборник отражает результаты выполненных сотрудниками МИНХ и ГП им. И.М.Губкина и других учебных и научных организаций страны (ИПМ АН СССР, ВНИИнефть, ВНИИБТ, БГУ им. В.И.Ленина) теоретических и экспериментальных исследований различных физико-химических методов повышения нефтеотдачи пластов.

Сборник условно разделяется на 2 части:

I. Модели фильтрации и математические вопросы, связанные с постановкой задач вытеснения нефти с помощью различных физико-химических методов повышения нефтеотдачи пластов.

2. Численные методы решения задач подземной термогидродинамики.

Основные результаты указанных исследований внедряются или же предполагаются к внедрению в практику проектирования разработки нефтяных месторождений с использованием различных физико-химических методов повышения нефтеотдачи пластов.

Сборник предназначен для научных сотрудников, аспирантов и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами разработки и эксплуатации нефтяных месторождений с применением различных методов повышения нефтеотдачи пластов, а также для специалистов в области численного моделирования процессов многофазной фильтрации в пористых средах.

Редакционная коллегия:

Проф. Кичигин А.В. (отв. редактор), проф. Гиматудинов Ш.К.,
с.и.с. Еноков В.И.



Московский институт нефтехимической и газовой
промышленности им. И.М.Губкина, 1985 г.

4. Чарный И.А. Основы подземной гидравлики. - М.: Гостоптехиздат, 1956.

5. Черноуско Ф.Л., Баничук Н.В. Бариационные задачи механики и управления. - М.: Наука, 1973.

УДК 532.546

В.Б. Таранчук (Белорусский
государственный университет)

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ НЕФТИ РАСТВОРОМ АКТИВНОЙ ПРИМЕСИ

Математический аппарат исследования одномерных плоских линейных задач вытеснения нефти раствором активной примеси достаточно развит, и решен целый ряд принципиально важных задач (см., например, [1,2,7]). Однако решения получены для случаев, когда вытесняемая нефть является ньютоновской и ее движение описывается обобщенным законом фильтрации Дарси. В то же время известно, что для нефей ряда месторождений характерно проявление вязкопластических свойств. Поэтому задача о вытеснении неньютоновских нефтей растворами активных примесей представляет не только теоретический, но и практический интерес.

В настоящей работе приведен и проиллюстрирован примерами алгоритм построения точного аналитического решения одномерной линейной задачи вытеснения вязкопластической нефти раствором активной примеси для условий, когда справедливо крупномасштабное приближение, то есть капиллярные силы и диффузионный перенос примесей пренебрежимо малы. Для упрощения выкладок изучается фильтрация в горизонтальном пласте, когда примесь растворяется только в вытесняющей фазе.

Рассмотрим процесс изотермической фильтрации двух несмешивающихся несжимаемых жидкостей в недеформируемой пористой среде. Пусть x и t - пространственная координата и время, $x \geq 0$, $t \geq 0$; k и m - абсолютная проницаемость и пористость среды, полагаемые далее постоянными; индексы $i = 1$ и 2 отно-

сятся к вытесняемой и вытесняющей фазам; μ_i , μ_i' и f_i - скорость фильтрации, вязкость и относительная проницаемость i -й фазы; G - предельный градиент давления нефти ($G = \text{const}$);

α - величина адсорбции примеси на породу; S - насыщенность пористой среды вытесняющей жидкостью, C - концентрация примеси в вытесняющей фазе. Тогда с учетом сделанных предположений законы фильтрации, уравнения неразрывности фаз и закон сохранения массы примеси [1,3] могут быть записаны в виде:

$$u_1 = -\frac{k f_1}{\mu_1} \psi_1 \frac{\partial P}{\partial x}, \quad u_2 = -\frac{k f_2}{\mu_2} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

$$m \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0, \quad m \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left(SC + \frac{\alpha}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (Cu_2) = 0, \quad (3)$$

где $\psi_1 = 1 - G/P_x$, если $P_x > G$; $\psi_1 = 0$, если $P_x \leq G$, $P_x = |\partial P / \partial x|$.

Из уравнений неразрывности (2) следует, что суммарная скорость фильтрации $U = U_1 + U_2$ не зависит от координаты x , а является функцией только времени t . Пусть величина U задана, положительна и постоянна. Тогда из закона фильтрации вытесняемой фазы (1) следует, что условие застывания нефти $P_x \leq G$ может быть преобразовано к виду

$$f_2 \geq \infty, \quad (4)$$

где $\varphi = (\bar{\tau} \mu)^{-1}$, $\bar{\tau} = kG(U_1 \mu_1)^{-1}$, $\mu = \mu_1 \mu_2^{-1}$.

С учетом условия (4), из (1) - (3), для определения насыщенности S и концентрации C , нетрудно получить следующую систему уравнений:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} (sc + \frac{a}{m}) + u \frac{\partial}{\partial x} (\phi c) = 0, \quad (6)$$

где $\Phi = 1$ при $f_2 \geq \infty$, $\phi = \psi$ при $f_1 \leq \infty$, $\psi = F(1 + \sqrt{f_1})$,
 $F = \mu f_2 (f_1 + \mu f_2)^{-1}$.

Если нефть ньютоновская, то $\Phi \equiv F$ и система (5), (6) совпадает с рассмотренной в [1]. Функция F монотонно возрастает и имеет точку перегиба. При $G \neq 0$, как будет показано ниже, на интервале $0 < \phi < 1$ ϕ также монотонно возрастает, причем в зависимости от $\bar{\mu}$ и μ может иметь или не иметь точку перегиба. Поэтому ясно, что решение задачи (5), (6) с соответствующими начальными и граничными условиями может быть построено по аналогии с [1], но его структура из-за возможности застывания нефти (сравни, например, с [3]) будет сложнее, чем в случае, когда нефть — ньютоновская. Используя методы, изложенные в [1] и [2], для системы (5), (6) можно построить решения задач вытеснения и довытеснения остаточной нефти растворами примеси, закачиваемой постоянно или оторочкой. Особенности применения указанных методов в рассматриваемом случае, когда нефть является вязкопластической, одинаковы в каждой из упомянутых задач. Для их иллюстрации приведем алгоритм решения задачи вытеснения нефти активной примесью, закачиваемой постоянно для случая, когда примесь снижает поверхностное напряжение, $\partial F / \partial c < 0$ и адсорбция описывается выпуклой изотермой $a = a(c)$, $a'' < 0$.

Пусть в начальный момент $t = 0$ $s(x, 0) = s_0 = \text{const}$, $c(x, 0) = 0$, на входе $x = 0$ скорость фильтрации нефти $u_1 = 0$, а скорость водной фазы $u_2 = u = \text{const}$ и концентрация примеси $c(0, t) = c^0 = \text{const}$.

При сделанных предположениях естественно искать решение вида

$$s = S(\xi), \quad c = C(\xi), \quad \xi = mx(ut)^{-1} \quad (7)$$

соответственно для системы —

$$\int \frac{ds}{d\xi} = \frac{d\phi}{d\xi}, \quad (8)$$

$$\int \frac{d(sc + \frac{a}{m})}{d\xi} = \frac{d(\phi c)}{d\xi}, \quad (9)$$

с условиями —

$$c = c^0, \quad s = S^*(c^0), \quad \xi = 0; \quad (10)$$

$$c = 0, \quad s = s_0, \quad \xi \rightarrow \infty, \quad (II)$$

где $I = S^*$ — остаточная нефтенасыщенность.

Задача (8)-(II), как и исходная для системы уравнений в частных производных, вообще говоря, не имеет непрерывных решений и следует строить разрывные. Соотношения на скачках (сравни с [1]) после перехода к автомодельной переменной и несложных преобразований могут быть записаны в виде

$$\xi_c = \frac{\phi^- - \phi^+}{S^- - S^+}, \quad \xi_c = \frac{\phi^+}{S^+ + S_\alpha}, \quad (12)$$

где индексы " + " и " - " обозначают функции перед и за скачком, соответственно, $S_\alpha = (\alpha^- - \alpha^+) \cdot [m(c^- - c^+)]^{-1}$.

Поскольку $\alpha'' < 0$, можно доказать, что решение является кусочно-постоянным:

$$c(\xi) = c^0, \quad 0 \leq \xi \leq \xi_1; \quad (2.22)$$

$$c(\xi) = 0, \quad \xi > \xi_1, \quad (2.23)$$

где ξ_1 — координата сопряженного скачка, на котором должны выполняться условия (12). Тогда задача сводится к построению решения уравнения (8) в областях, где $c = c^0$ и $c = 0$. Вообще говоря, можно построить бесконечно много решений задачи (8) —

(2.18) (2.21)

(2.18)

- 98 -

(2.20)

— (II), но, согласно [I], существует единственное устойчивое, которое и приводится ниже.

Опишем основные этапы построения решения.

А. Определение насыщенности застывания $S_3(c^\circ)$.

Решается уравнение

$$f_2(s, c^\circ) = \partial\phi(s, 0) / \partial s = 0. \quad (I-4)$$

Пусть s^* — корень этого уравнения. Если $s^* < S^*(c^\circ)$, значение $S_3 = s^*$ — насыщенность застывания, а $1 - S_3$ является неуменьшаемой при данном режиме вытеснения величиной нефтенасыщенности. Координата ξ_3 , для которой $s = S_3$, в этом случае, очевидно, больше нуля. При $s^* \geq S^*(c^\circ)$ застывания нефти не происходит, и полагаем $\xi_3 = 0$, $S_3 = S^*(c^\circ)$. Режим вытеснения, когда $\xi_3 = 0$, условимся называть режимом вытеснения без застывания.

Б. Расчет координаты сопряженного скачка, насыщенности за и перед ним, а также ξ_3 , если $\xi_3 > 0$.

Решается трансцендентное уравнение

$$\frac{\partial\psi(s, c^\circ)}{\partial s} = \frac{\psi(s, c^\circ) / (s + S_a)}{s - S_a} = 0. \quad (I-5)$$

Если учесть характерный вид функции $\psi(s, c^\circ)$, то, очевидно, корень уравнения (I-5) $s^* < S^*(c^\circ)$. Если $\xi_3 = 0$, корень $s^* = S_1$, и значение насыщенности за сопряженным скачком. При $\xi_3 > 0$ возможны два случая: $s^* < S_3$ и $s^* \geq S_3$. Если $s^* \geq S_3$, полагаем $S_1 = S_3$ и такой режим вытеснения по аналогии с [3] назовем поршневым. Для координат в этом случае имеем: $\xi_1 = \xi_3 = \psi(S_3, c^\circ) / (S_3 + S_a)$.

При $s^* < S_3$, $S_1 = s^*$, а такой режим вытеснения назовем режимом вытеснения с застыванием, $\xi_1 = \phi(S_1, c^\circ) / (S_1 + S_a)$ и из (8) $\xi_3 = \partial\phi(S_3, c^\circ) / \partial s$ (очевидно, что $\xi_3 < \xi_1$).

С учетом найденных ξ_1 , S_1 решаем уравнение

$$\xi_1 = \frac{\phi(S_1, c^\circ) - \phi(s, 0)}{S_1 - s}. \quad (I-6)$$

откуда находим $s = S_1$ — значение насыщенности перед сопряженным скачком.

В. Вычисление положения переднего скачка насыщенности ξ_2 и значения насыщенности S_2 за ним.

Решается уравнение

$$\frac{\partial\phi(s, 0)}{\partial s} = \frac{\phi(s, 0) - \phi(s_0, 0)}{s - s_0}. \quad (I-7)$$

Пусть s_c — корень этого уравнения, $\xi_c = \partial\phi(s_c, 0) / \partial s$. Если $s_c \geq S_1$, принимаем $S_2 = S_1$, $\xi_2 = [\phi(S_2, 0) - \phi(s_0, 0)] / (S_2 - s_0)$, $\xi_2 = \xi_1$. При $s_c < S_1$, $S_2 = s_c$, $\xi_2 = \xi_c$, $\xi_2' = \partial\phi(s_1, 0) / \partial s$. Очевидно, что $\xi_2' < \xi_2$.

После определения насыщенности застывания и ее координаты, положений скачков и параметров перед и за ним, исходя из уравнения (8), так как концентрация примеси в каждой из выделенных областей постоянна, имеем для насыщенности:

$$\xi = \frac{\partial\phi(s, c^\circ)}{\partial s}, \quad (I-8)$$

где $c = c^\circ$ либо $c = 0$, и, следовательно, интегрируя (I-8), получаем $s = s(\xi)$.

Итак, решение определяется следующим образом:

$$c(\xi) = c^\circ, \quad s(\xi) = S_3, \quad 0 \leq \xi \leq \xi_3;$$

$$c(\xi) = c^\circ, \quad s = s(\xi), \quad (S_1 \leq s \leq S_3), \quad \xi_3 \leq \xi \leq \xi_1;$$

$$c(\xi) = 0, \quad s = S_1, \quad \xi_1 < \xi \leq \xi_2'; \quad (I-9)$$

$$c(\xi) = 0, \quad s = s(\xi), \quad (S_c \leq s \leq S_2), \quad \xi_2' \leq \xi \leq \xi_2;$$

$$c(\xi) = 0, \quad s = S_0, \quad \xi > \xi_2.$$

Для иллюстрации описанного решения рассмотрим случай вытеснения вязкопластичной нефти водным раствором с примесью, снижающей поверхностное натяжение. Результаты лабораторного исследо-

вания подобного процесса вытеснения приведены в [4]. Предположим, что адсорбция примеси описывается изотермой Ленгмюра, насыщенность связанный воды S_* при добавлении примеси не меняется, вязкость вытесняемой нефти постоянна; относительные фазовые проницаемости, вязкость водной фазы и остаточная нефтенасыщенность определяются по аналогии с [5]: вязкость водной фазы зависит от концентрации примеси, а остаточная нефтенасыщенность $1-S^*(c)$ от концентрации c и суммарной скорости фильтрации u .

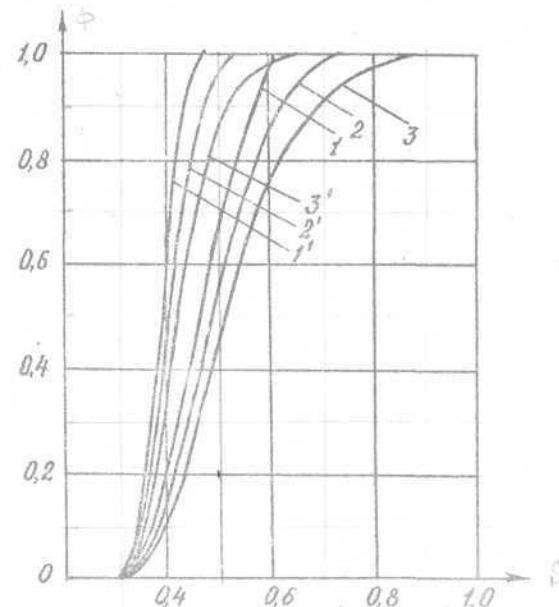


Рис. 2.1. Зависимости $\Phi(S, c^*, u)$ — пунктирные, $\Phi(S, 0)$ — сплошные кривые.

$\pi = 2$, $\pi = 1$,

В табл. I приведены характеристики решения величины, определенные по описанному алгоритму. Дополнительно рассчитаны величины нефтеотдачи для двух моментов времени. Условно выделена длина образца и определены: β_1 — коэффициент нефтеотдачи к моменту прорыва вытесняющей жидкости в выделенное сечение (момент подхода переднего скачка), β_2 — коэффициент нефтеотдачи к моменту подхода к выбранному сечению фронта примеси (момент подхода сопряженного скачка). Таблица иллюстрирует зависимость ха-

теристик моделируемого процесса вытеснения от задаваемой суммарной скорости фильтрации u (в м/с), когда $c^* = 0,05\%$, $\mu_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\mu_1(0) = 10^{-3}$ Па·с, $S_* = 0,3$, $k = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $G = 5 \cdot 10^3$ Па/м, $S_a = 0,2$.

На рис. I для данных решений приведены зависимости $\Phi(S, c^*)$ и $\Phi(S, 0)$. Кривые нумеруются следующим образом: 1, 2, 3 — кривые $\Phi(S, c^*)$ при $\pi = 2, 1$ и $0,1$; 1', 2', 3' — кривые $\Phi(S, 0)$ при тех же значениях π . Соответствующие решения показаны на рис. 2. Как следует из графиков, при $\pi = 2$ имеет место поршневой режим вытеснения, при $\pi = 1$ — режим вытеснения с застыванием, при $\pi = 0,1$ — режим вытеснения без застывания.

на рис. 2.1

Таблица I

Результаты решения задачи вытеснения вязкопластичной нефти

u	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}
$S^*(c^*)$	0,8688	0,9621	0,9887	1,0	1,0	1,0
π	10	2	1	0,5	0,2	0,1
$S_3(c^*)$	0,4414	0,6162	0,7472	0,9324	—	—
ξ_3	1,5590	1,2251	0,2585	0,0072	0,0	0,0
S_1	$S_3(c^*)$	$S_3(c^*)$	0,6587	0,6791	0,6951	0,7009
ξ_1	ξ_3	ξ_3	1,1019	1,0459	1,0168	1,0080
$S_3(0)$	0,3707	0,4581	0,5236	0,6162	—	—
S_1^+	0,3655	0,4163	0,4289	0,4379	0,4445	0,4470
ξ_2	13,459	6,4895	5,3732	4,8401	4,5346	4,4662
β_1	0,1061	0,2201	0,2659	0,2952	0,3150	0,3220
β_2	0,2021	0,4521	0,5827	0,6512	0,6908	0,7030

Все три характерных кривых сущесв.
на рис. 2.1, 2.2 приведены зависимости $\Phi(S)$ и
 $S(\xi)$.

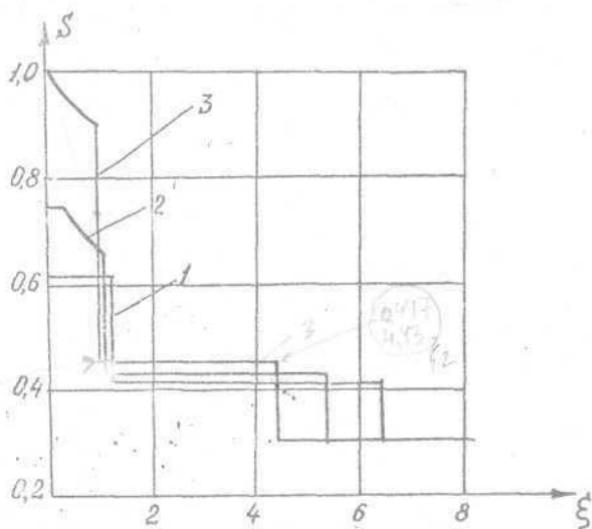


Рис. 2.2. Профиль насыщенности $S(\xi)$.

ххх — $\pi = 2$, 000 — $\pi = 1$,
 ΔΔΔ — $\pi = 0.1$.

Литература

1. Ентов В.М. Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах. (Математические модели методов повышения нефтеотдачи пластов). — Препринт ИПМ АН СССР № 161, 1980.
2. Бедриковецкий П.Г. Вытеснение нефти оторочкой активной примеси, продвигаемой по пласту водой. — Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1982, № 3, с. 102-111.
3. Алишев М.Г. Одномерное несмешивающееся вытеснение пеньютоновской жидкости водой. — В кн.: Численные методы решения задач фильтрации несмываемой жидкости. Новосибирск, 1975, с. 38-50.
4. Девликамов В.В., Кабиров М.И., Султанов В.Г., Шамаев Г.А. Особенности вытеснения аномальной нефти водными растворами ПАВ при малых градиентах давления. — Изв. вузов. Нефть и газ, 1981, № 7, с. 23-26.
5. Таранчук В.Б. Эффективный метод численного моделирования процесса мицеллярного вытеснения остаточной нефти. — В кн: Динамика многофазных сред. Новосибирск, 1981, с. 285-290.