

Таким образом, геометрия потока и охват вытеснением после подхода воды к выходу существенно зависят от скорости фильтрации. На фиг. 2, $a - e$ показаны распределения вдоль оси x доли смачивающей фазы s в поперечном сечении, соответствующие задачам $a - e$. Кривые 1 и 2 соответствуют положениям границы раздела 3 и 4 на фиг. 1. Отметим качественное совпадение характера течения с экспериментальными и теоретическими исследованиями. Напомним, что в модели Раппопорта — Лиса для учета концевго эффекта условие прорыва смачивающей фазы обычно принимается не зависящим от скорости [3], что приводит к росту водонасыщенности вблизи выходного сечения при любой скорости. Тем не менее такая постановка правильно учитывает тенденцию к уменьшению концевго эффекта (области повышенной водонасыщенности) при увеличении скорости вытеснения.

Рассмотрим подробнее динамику границы раздела после подхода воды к выходу на примере задачи вытеснения с $\Delta p = 0.2 \text{ ат}$ (фиг. 1, б). На фиг. 3 показаны распределения фаз для части образца, примыкающей к выходному сечению. Распределения $a - d$ соответствуют значениям $\eta = 76.1, 77.5, 79.4, 80.7$ и 81% . Область D_2 заштрихована. Так как гидродинамические градиенты давления в поперечном направлении малы, то под действием капиллярных сил вода растекается вдоль выходного сечения. Одновременно к выходу подходит другой язык воды, который сливается с растекающейся водой. В результате около выходного сечения образуется целик нефти (а). Под действием градиента давления в продольном направлении нефть, оттесняя воду, выталкивается к выходу (б). Однако капиллярные силы заставляют воду войти в блок, занятый нефтью, и, заполнив его, опять образовать целик нефти. Такое пульсирующее истечение несмачивающей фазы может происходить в различных местах выходного сечения как до, так и после прорыва воды (г, д). Описанное явление согласуется с физическими экспериментами [6], в которых обнаружено, что после появления воды на выходе вытесняемая фаза вытекает не сплошной струей, а отдельными прерывистыми каплями.

Поступила 12 XII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Richardson J. G., Kerver J. K., Hafford J. A., Osoba J. S. Laboratory determination of relative permeability. Trans. AIME, 1952, vol. 195.
2. Индельман П. В., Кац Р. М., Швидлер М. И. Об одной модели фильтрации несмешивающихся жидкостей. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 6.
3. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. М., «Мир», 1964.
4. Индельман П. В., Кац Р. М., Швидлер М. И. Исследование процессов неустойчивого вытеснения с помощью численного моделирования. В сб. «Численное решение задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости». Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1977.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. М., «Наука», 1977.
6. Бабалян Г. А. Вопросы механизма нефтеотдачи. Баку, Азнефтеиздат, 1956.

УДК 532.546

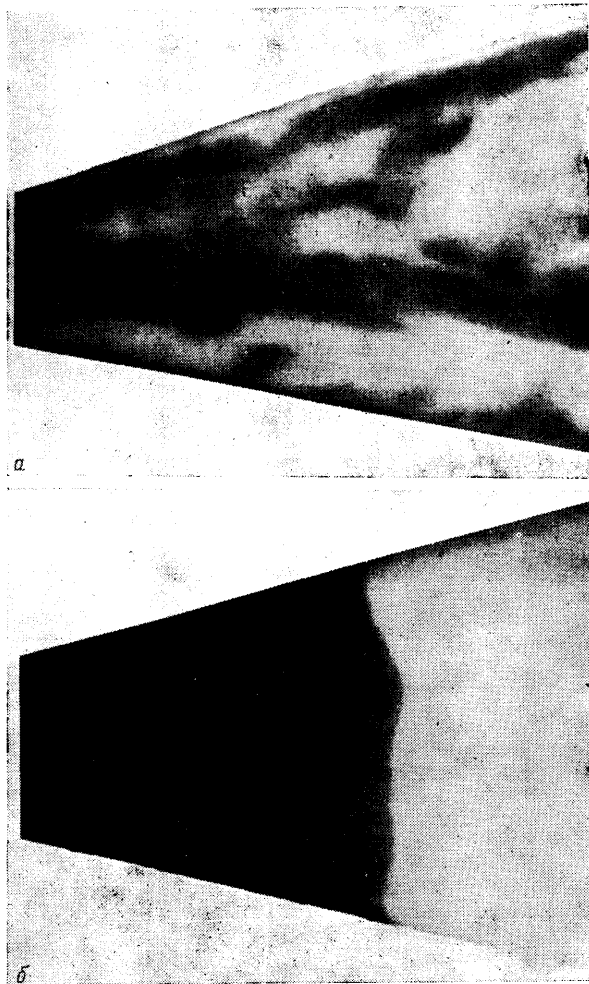
ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПРИ ПЕНООБРАЗОВАНИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

М. Ф. КАРИМОВ, М. М. ХАРИСОВ

(Уфа)

В работе экспериментально изучены относительные проницаемости для жидкости и газа при пенообразовании в пористой среде. При этом установлено, что газопроницаемость зависит от насыщенности и абсолютной концентрации пенообразователя. Проведена статистическая оценка корреляции аппроксимирующих степенной и полиномиальной функций. Приводится сопоставление теоретических значений фронтальной насыщенности, полученной по схеме Баклея — Леверетта с использованием аппроксимирующей функции, с экспериментальными.

Теория совместного движения в пористой среде двухфазных систем основывается на относительных проницаемостях, полученных при фильтрациях не взаимодействующих между собой фаз. Современные методы интенсификации взаимозамещения жидкости и газа предусматривают физико-химические превращения в пористой среде. В этих условиях использование в расчетах известных зависимостей Викова и Ботсета приводит к большой погрешности, в частности разница в фронтальной насыщенности, определенная по теории Баклея — Леверетта и эксперименту, составляет несколько десятков процентов.



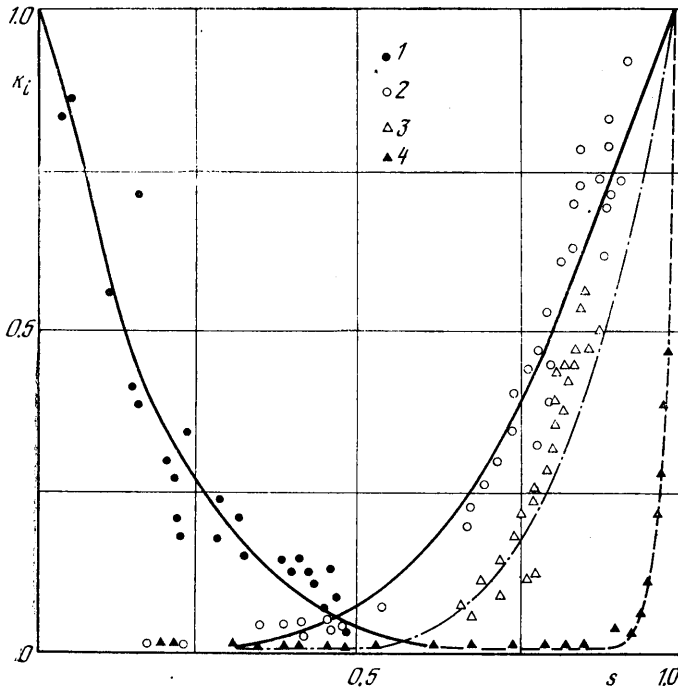
Фиг. 1

Одним из эффективных методов интенсификации вытеснения пластовой жидкости является применение пенообразующих растворов. Пенообразование при вытеснении жидкости газом приводит к устойчивому движению границы раздела фаз и обеспечивает практически поршневое вытеснение. На фиг. 1 представлены фотоснимки процесса вытеснения жидкости газом из прозрачной модели пористой среды. Снимок *а* соответствует вытеснению воды азотом, при котором наблюдается неустойчивая граница раздела, *б* – вытеснению газом пенообразующей жидкости. Если для случая *а* фронтальная насыщенность составляет 0.1–0.15, то в случае *б* она достигает 0.6–0.8. Изучение характеристик фильтрации, сопровождающейся пенообразованием, на физических моделях показывает, что жидкость-пенообразователь как смачивающая фаза имеет непрерывное распределение, а газ фильтруется при постоянном образовании и разрушении ячеек пены. Следует указать, что жидкость-пенообразователь может быть получена растворением в воде незначительного количества активных веществ (десятые и сотые доли процента), при этом такие динамические характеристики воды, как вязкость, плотность, практически сохраняются. Пенообразование в пористой среде объясняется неравновесными сорбционными явлениями и, следовательно, зависит от абсолютной концентрации стабилизатора пен. Для описания распределения давления и насыщенности двухфазной моделью необходимо построить кривые относительных проницаемостей для жидкости и газа при фильтрации, сопровождающейся пенообразованием.

Эксперименты проводились на моделях насыщенных пористых сред длиной 0.8 м, проницаемостью 0.7, 1.7, 3.0, 3.7 и 4.4 *дарси* и пористостью 0.35–0.40. В качестве пено-

образователя к дистиллированной воде добавлялся от 0.002 до 0.5% (всего десять различных значений) по весу продукт ОП-10 СНХК.

На вход модели подавались газ при определенном давлении и дозирочным безымпультным микронасосом БМН водный раствор пенообразователя. Регистрировались объемы поступающих в модель и выходящих из модели раствора и газа. Насыщенность раствором определялась балансовым методом и контролировалась взвешиванием.



Фиг. 2

В ходе экспериментов проверялась справедливость линейного закона фильтрации

$$(1) \quad V_i = -a_i \text{ grad } p, \quad a_i = \frac{kk_i(s,c)}{\mu_i} \quad (i=1, 2)$$

Здесь V_i — скорости фильтрации; p — давление; k — абсолютная проницаемость пористой среды; s — газонасыщенность, c — весовая концентрация пенообразователя, %; μ_i — вязкость флюидов, а величину $k_i(s, c)$ можно назвать относительной проницаемостью i -й фазы; индекс 1 относится к жидкой, 2 — к газовой фазе.

Ниже приводится зависимость коэффициента пропорциональности a_2 для газа от градиента давления при газонасыщенности 0.89 и концентрации пенообразователя 0.05%.

$\text{grad } p \cdot 10^{-5} \text{ н/м}^2$	0.750	1.125	1.500	1.875	2.250
$a_2 \cdot 10^7 \text{ м}^4/\text{нсек}$	0.1465	0.1459	0.1389	0.1451	0.1392

Для других насыщенных и концентраций в диапазоне изученных проницаемостей зависимость аналогичная, поэтому в пределах ошибок эксперимента можно считать, что равновесная фильтрация газа и раствора в присутствии пены подчиняется линейному закону Дарси (1).

На фиг. 2 кривой 1 представлены экспериментальные данные для жидкой фазы, полученные из опытов с растворами различных концентраций, при этом влияние концентрации на относительную проницаемость жидкости не обнаружено, что можно объяснить непрерывным капиллярным распределением этой фазы. Аналогичное явление имеет место при фильтрации трехкомпонентной системы вода — нефть — газ, где относительная проницаемость смачивающей фазы является функцией только своей

насыщенности. В связи с этим при расчетах можно пользоваться формулой относительной проницаемости для воды, приведенной, например, в [1]: $k_1(s, c) = (1-s/0.8)^{3.5}$ ($s \leq 0.8$), $k_2(s, c) = 0$ ($s > 0.8$).

На фиг. 2 приводятся экспериментальные данные и эмпирические кривые для газа при концентрации пенообразователя 0.002, 0.05 и 0.1% (кривые 2, 3 и 4 соответственно). Из представленных данных видно, что присутствие небольших количеств пенообразователя приводит к сильной деформации кривых относительных проницаемостей для газа. Такое изменение фазовой проницаемости для газа в присутствии растворов поверхностно-активных веществ следует объяснить пенообразованием в пористой среде, при котором перепад давления расходуется также на образование и разрушение высокоразвитой поверхности пены.

Формула для проницаемости газовой фазы, удобная для расчетов и достаточно хорошо описывающая экспериментальные данные для всех исследованных значений концентраций, имеет вид

$$(2) \quad k_2(s, c) = 0 \quad (s \leq 0.1), \quad k_2(s, c) = (4-3s) \left(\frac{s-0.1}{0.9} \right)^\alpha \quad (s > 0.1)$$

$$\alpha = 3.5 + 12 \ln[1 + (100c)^{1.5}]$$

Формула (2) по структуре аналогична формуле, приведенной в [1] для системы газ - вода.

Среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от полученной эмпирической кривой для концентраций 0.002 и 0.1% равны соответственно 0.053 и 0.045 (при аппроксимации многочленов четвертого порядка по методу наименьших квадратов - 0.025 и 0.095).

По полученным эмпирическим формулам рассчитывалась фронтовая насыщенность s_f (скачок насыщенности) при вытеснении газом растворов пенообразователя по схеме [2]. Ниже приводятся расчетные и экспериментальные значения фронтовой насыщенности для некоторых значений концентрации.

$c, \%$	0	0.002	0.02	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0
s_f расчетная	0.29	0.36	0.69	0.75	0.78	0.79	0.80	0.80
s_f экспериментальная	0.15	0.21	0.55	0.65	0.72	0.74	0.76	0.78

Таким образом, при совместной равновесной фильтрации газа и раствора пенообразователя относительная проницаемость для газа зависит от насыщенности пористой среды и абсолютной концентрации пенообразователя, а вытеснение пенообразующей жидкости газом при концентрации $c \geq 0.05\%$ можно считать практически поршневым.

Поступила 29 IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Чарный И. А., Чэнь Чжун-сян. Об определении воздуhonасыщенности и водонасыщенности в переходной зоне при просачивании воды в почву. Изв. АН СССР, ОН, Механика и машиностроение, 1960, № 1.
2. Стклянин Ю. И., Томельга В. А. О движении скачков насыщенности при фильтрации двухкомпонентных сжимаемых жидкостей. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 4.

УДК 533.6.01

ВТОРОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В ТЕОРИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ОКОЛОЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

В. Н. ДИЕСПЕРОВ

(Москва)

В [1] рассматривалось околосвуковое течение химически активной смеси, в которой происходит единственная реакция. Для таких течений можно определить две характерные скорости звука (замороженную и равновесную) и соответственно этому два различных трансзвуковых режима. Наиболее интересным с математической и физической точек зрения оказалось изучение равновесного трансзвукового режима. В теории малых возмущений трансзвуковые течения в отличие от дозвуковых и