

На фиг. 2 показаны оптимальные управления $u=u/u_0$ при $z=0, 0.1, 0.2, 0.3$ (кривые 1–4 соответственно). Эти кривые близки к функции $1-M \sin(2\pi t/T)$ ($0 \leq t \leq T$). Здесь $M \geq 0$ — масштабный множитель, постоянный для определенного значения z . Значение функционала (1.4) изменяется на 0, 1.56; 3.84 и 8.6% соответственно.

Штриховыми линиями на фиг. 2 показаны стоимостные функции $a(t)$ для $z=0, 0.1, 0.2$ и 0.3 .

Поступила 29 I 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев О. Ф., Гладышев М. Т. О расчете прерывных волн в открытых руслах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 6.
2. Картвелишвили Н. А. Неустановившиеся открытые потоки. Л., Гидрометеоиздат, 1968.
3. Theory of optimum aerodynamic shapes. New York – London, Acad. Press., 1963 (Рус. перев.: «Теория оптимальных аэродинамических форм». М., «Мир», 1969).
4. Атанов Г. А., Уланова Т. Д., Шипилин А. В. Сопло для получения максимальной скорости втекания жидкости. Тез. докл. Второй Всес. конф. по оптимальному управлению в механических системах. Казань, 1977.
5. Крайко А. Н. К решению вариационных задач сверхзвуковой газовой динамики. ПММ, т. 30, вып. 2, 1966.
6. Шипилин А. В. Оптимальные формы тел с присоединенными ударными волнами. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 4.
7. Борисов В. М. О системе тел с минимальным волновым сопротивлением. Инж. ж., 1965, т. 5, вып. 6.

УДК 532.546

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ПОЛИМЕРА В ВОДУ НА ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ СРЕД

Г. Г. ВАХИТОВ, В. Г. ОГАНДЖАНЯНЦ, А. М. ПОЛИЩУК

(Москва)

Разработана методика исследования относительных проницаемостей пористых сред для нефти и водных растворов полимеров и создана экспериментальная установка для определения фазовых проницаемостей стационарным методом. Проведены исследования влияния добавок поликарбамида на изменение относительных проницаемостей при совместной фильтрации воды и неполярной углеводородной жидкости. Установлено, что добавка полимера может приводить к одновременному снижению относительной проницаемости для смачивающей жидкости и возрастанию для несмачивающей. Получены фазовые проницаемости для нефти и воды, движущихся вслед за оторочкой полимерного вещества. Установлено, что фазовая проницаемость для водной фазы является функцией насыщенности и количества сорбированного вещества.

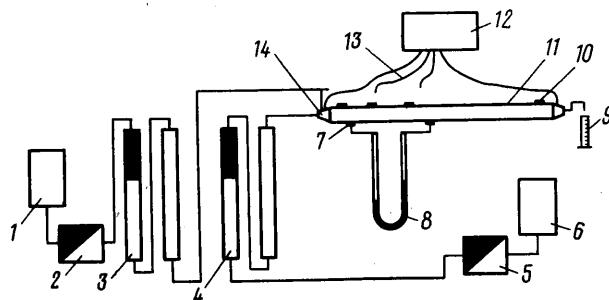
Проведен цикл экспериментальных исследований влияния скорости закачки и концентрации растворенного полимера на изменение относительных проницаемостей.

При расчетах технологических показателей разработки нефтяных месторождений широко применяется схема Баклея – Леверетта и ее модификации. Одной из важнейших эмпирических характеристик, необходимых для проведения вычислений по этой схеме, являются зависимости относительных проницаемостей для воды и нефти от насыщенности, от вида которых существенно зависят текущие и конечные результаты расчетов. Поэтому определение представительных указанных функций для каждого конкретного случая – одно из основных условий получения достоверных расчетных данных.

Это условие остается справедливым и для других способов вытеснения нефти, не исключая и технологию полимерного заводнения, если расчеты технологических показателей основаны на применении теории Баклей – Леверетта.

В работе [1] высказано предположение, что при вытеснении нефти полимерными растворами относительные проницаемости должны зависеть не только от насыщенности, но и от количества сорбированного полимерного вещества. Экспериментальных же результатов по этому вопросу в специальной литературе до настоящего времени еще нет. Отсюда возникла необходимость создания экспериментальной установки и проведения серии опытов для изучения влияния добавок в воду полимеров на относительные проницаемости пористой среды для фильтрующихся через нее жидкостей.

1. Методика определения влияния полимеров на относительные проницаемости и экспериментальная установка. В лабораторных условиях кривые относительных



Фиг. 1

проницаемостей обычно определяются двумя методами – нестационарным и стационарным. При нестационарном методе нефть вытесняется из пористой среды другой несмешивающейся с ней жидкостью при постоянном перепаде давления или постоянном расходе. По данным фильтрации двух жидкостей рассчитывают зависимости относительной проницаемости от насыщенности.

При стационарном методе в образец одновременно подаются углеводородная и несмешивающаяся с ней жидкость. Изменяя соотношение расходов, в пористой среде устанавливают разные значения насыщенности, которую измеряют непосредственно тем или иным способом. Зная расходы жидкостей, перепад давления и насыщенность, определяют искомую зависимость.

Нестационарный метод для исследования влияния добавок полимерного вещества на изменение кривых относительных проницаемостей непригоден по следующей причине. При вытеснении нефти полимерным раствором в результате сорбционных процессов в пористой среде образуются области фильтрации, которые условно можно разделить на три зоны [1]. В первой из них, примыкающей к выходному концу образца, происходит движение нефти в присутствии связанный воды; во второй зоне, находящейся между первой и третьей зонами, имеет место совместное движение нефти и воды, лишенной полимерного вещества; в третьей зоне – полимерный раствор вытесняет остаточную нефть. Существующие расчетные методы не позволяют по замерам характеристик фильтрации на выходе пористого образца установить вид кривых относительных проницаемостей для этого процесса. Вот почему для определения влияния полимеров на относительные проницаемости использованы стационарный метод и экспериментальная установка, схема которой показана на фиг. 1.

Масло из емкости 1 микронасосом 2 подавалось в мерную емкость 3, заполненную 1%-ным раствором NaCl в дистиллированной воде или раствором полиакриламида (ПАА) требуемой концентрации в 1%-ном NaCl. Неполярная углеводородная жидкость (очищенный керосин) вытеснялась из мерной емкости 4 микронасосом 5, нагнетавшим воду из емкости 6. Жидкости поступали в образец пористой среды 11 различдельно. (Длина образца 132 см, диаметр 3 см.) Жидкости смешивались на начальном участке пористого образца 14, который, как и выходной участок образца, изготовлен в форме конуса [2]. Давления измерялись на участке элемента пластины длиной 50 см в точках 7, расположенных на расстоянии 20 см от входного и 62 см от выходного конца образца. Такое расположение узла отбора давления и коническая форма входа и выхода позволили исключить влияние концевых эффектов на результаты экспериментов. Величину перепада давлений измеряли ртутным дифманометром 8, а количество выходящей жидкости – мерными цилиндрами 9.

При использовании стационарного метода необходимо знать насыщенность пористой среды на исследуемом участке. Если при совместном течении воды и углеводородной жидкости она довольно легко определяется измерением электросопротивления по четырехэлектродной схеме [3], то при фильтрации растворов ПАА возникают определенные трудности из-за отсутствия сведений о связи между электросопротивлением и насыщенностью. Поэтому в рассматриваемой установке была предусмотрена возможность определения насыщенности и по балансу объемов вошедшей и вышедшей из пористой среды жидкостей. Достигалось это предварительной тарировкой мерных прозрачных емкостей, что позволило измерять количество закачанной жидкости с точностью до 3 см^3 или 1% от объема пор. При совместной фильтрации углеводородной жидкости и воды насыщенность пористых сред определяли и по данным электропроводности. Электроды 10 располагались на начальном, рабочем и выходном участках пористого образца.

При совместной фильтрации углеводородной жидкости и воды равновесное состояние определяется равенством расходов каждой из жидкостей на выходе и входе образца при неизменном перепаде давления. При фильтрации полимерного раствора условие равновесия требует дополнительного равенства концентраций полимера на входе и выходе образца. Равенство концентраций полимера в растворе на входе и выходе определяли по данным замеров вязкости.

Результаты замеров показали, что разница в насыщенностях, измеренных по электропроводности и балансовым методом, не превышает 2–3%.

Суммарный расход жидкостей в течение всего опыта поддерживался постоянным. Микронасосы обеспечивали беспульсационную подачу жидкостей с расходом в диапазоне $5\text{--}500 \text{ см}^3/\text{час}$.

Для апробации методики определения относительных проницаемостей и экспериментальной установки, а также для нахождения скоростей, соответствующих автомодельности процесса фильтрации, при которых относительные проницаемости являются функциями только насыщенности, в первой серии опытов исследовано влияние скорости на совместное движение углеводородной жидкости и воды.

В этой серии опытов пористую среду сначала насыщали 1%-ным раствором NaCl, определяли проницаемость, поровый объем, пористость и электросопротивление образца, полностью насыщенного минерализованной водой. Затем, вытесняя воду углеводородной жидкостью, создавали неподвижную водонасыщенность. По-степенно увеличивая долю воды в нагнетаемом потоке, в поровом объеме создавали более высокие значения водонасыщенности (s). Эксперименты проводили при трех скоростях нагнетания: 40, 100, 200 $\text{см}^3/\text{час}$, что примерно соответствовало скоростям фильтрации 20, 50, 100 $\text{см}^3/\text{час}$. Скорость нагнетания каждой из двух жидкостей колебалась в диапазоне от 0 до $200 \text{ см}^3/\text{час}$.

Результаты данной серии опытов приведены на фиг. 2 в форме зависимости $f_i(s)$, где f_i – относительные проницаемости. Темные точки на фигурах 2, 3, 4 относятся к углеводородной жидкости, а светлые – к 1%-ному раствору NaCl или раствору полимера. Точки 1, 2, 3 получены в экспериментах со скоростями закачки 100, 50 и $200 \text{ см}^3/\text{час}$ соответственно. На этой же фигуре нанесены значения $f_i(s)$, измеренные в опытах, в которых необходимые значения s достигались не увеличением доли воды в потоке, а за счет ее уменьшения. Расхождения результатов не превысили ошибки измерения.

Представленные на фиг. 2 данные показывают, что в исследованном диапазоне скоростей величины $f_i(s)$ не зависят от скорости фильтрации.

2. Результаты исследований влияния добавок ПАА на относительные проницаемости пористой среды для несмешивающихся жидкостей.

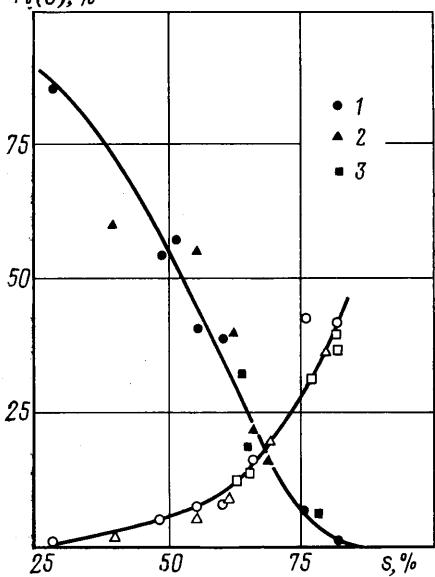
В этой серии экспериментов исследовано влияние добавок полимера на зависимость $f_i(s)$. Для этого использован образец пористой среды проницаемостью $k=3.8 \text{ дарси}$, углеводородная жидкость вязкостью $\mu_1=1.3 \text{ снз}$, 1%-ный раствор NaCl в дистиллированной воде и 0.05% ПАА в 1%-ном растворе NaCl. Объемная скорость нагнетания жидкостей $q=100 \text{ см}^3/\text{час}$. Результаты этих опытов представлены на фиг. 3. Точки 1 определены при совместном течении углеводородной жидкости и воды при суммарной скорости закачки $100 \text{ см}^3/\text{час}$. Точки 2–4 – при движении углеводородной жидкости и раствора полимера при скоростях 100, 60 и $200 \text{ см}^3/\text{час}$ соответственно. Видно, что добавка в минерализованную воду 0.05% ПАА, как и предполагалось, приводит к заметному снижению проницаемости пористой среды для вытесняющей жидкости.

Неожиданным оказалось смещение вправо кривой относительной нефтепроницаемости, что предопределяет улучшение процесса вытеснения нефти полимерным раствором по сравнению с закачкой воды не только за счет снижения подвижности вытесняющей жидкости, но и вследствие увеличения подвижности нефти. При этом уменьшение скорости от 100 до $60 \text{ см}^3/\text{час}$ практически не повлияло на величину фазовой проницаемости пористой среды для углеводородной жидкости и раствора ПАА. Увеличение же скорости до $200 \text{ см}^3/\text{час}$ привело к некоторому сниже-

нию f_i для 0.05%-ного раствора ПАА, тогда как характер изменения нефтепроницаемости пористой среды остался таким же, как при скорости 100 см³/час.

Интересная особенность установлена при совместной фильтрации в пористой среде неполярной жидкости и воды при наличии в пористой среде сорбированного полимера. Результаты этого опыта приобретают особое значение при изучении процесса вытеснения нефти оторочкой полимерного раствора, перемещаемой по пласту нагнетаемой водой.

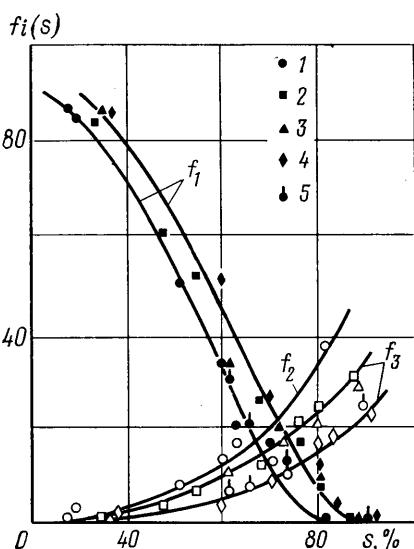
Фиг. 2



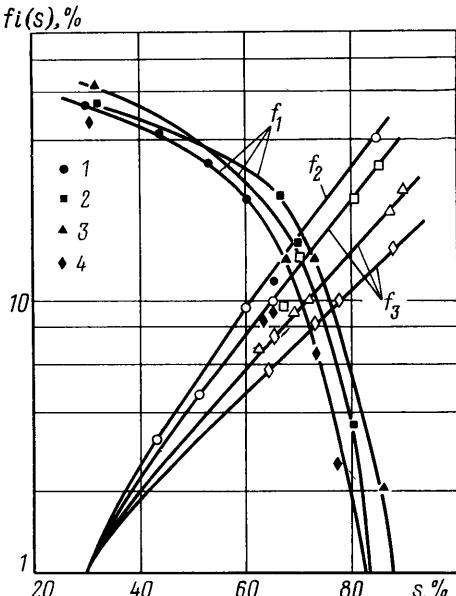
Фиг. 2

В этом опыте полимерный раствор был вытеснен 1%-ным раствором NaCl, и в образец стали нагнетать одновременно углеводородную жидкость и воду, т. е. воспроизошли условия движения воды и нефти за оторочкой полимерного раствора. Полученные результаты представлены на фиг. 3 точками 5. Видно, что точки для воды легли на кривую, полученную в предыдущем опыте для полимерного раствора, а точки для углеводородной жидкости — на кривую, полученную в опыте при ее совместной фильтрации с водой. Идентичность относительных проницаемостей для водной фазы в пределах оторочки и за ней можно объяснить необратимостью процесса сорбции полимера в пористой среде [4] и существующими представлениями о механизме фильтрации полимерных растворов [1, 5], согласно которым повышенное сопротивление пористой среды фильтрации полимерного раствора определяется количеством сорбированного полимерного раствора.

В следующей серии опытов сделана попытка исследовать влияние величины



Фиг. 3



Фиг. 4

концентрации ПАА в растворе на относительные проницаемости (фиг. 4). В этих экспериментах в качестве исследуемых жидкостей использованы 1%-ный раствор NaCl в дистиллированной воде, в которой концентрации ПАА составляли 0 (точки 1),

0.025% (точки 2), 0.05% (точки 3) и 0.1% (точки 4), а вязкости 1; 1.18; 1.32; 1.86 сПз соответственно. Объемная скорость нагнетания жидкости 100 см³/час.

Как следует из фиг. 4, увеличение концентрации ПАА в растворе от 0 до 0.1% приводит к заметному снижению относительной проницаемости пористой среды для полимерного раствора. Если говорить о нефтепроницаемости, то она возрастает для растворов, концентрация ПАА в которых не превышала 0.05%. При концентрации ПАА 0.1% нефтепроницаемость снизилась до величин, характерных для систем «нефть — вода». Указанное снижение нефтепроницаемости пористой среды при 0.1%-ной концентрации ПАА в растворе требует дополнительной экспериментальной проверки.

Таким образом, первые экспериментальные исследования влияния добавок полимера (полиакриламида) в воду на относительные проницаемости пористой среды позволили установить:

1. Кривые относительных проницаемостей для нефти и раствора ПАА сдвигаются вправо, что предопределяет более эффективное вытеснение нефти полимерным раствором, чем водой.

2. Увеличение концентрации полимера (ПАА) в растворе от 0 до 0.05% приводит к увеличению нефтепроницаемости и снижению проницаемости пористой среды для полимерного раствора.

3. Относительные проницаемости пористой среды для полимерного раствора внутри оторочки и за ней описываются одной и той же кривой; нефтепроницаемости участка пористой среды после прохождения через него полимерного раствора описываются кривой, соответствующей процессу вытеснения нефти водой.

Поступила 1 III 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Ентов В. М., Полищук А. М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3.
2. Ковалев А. Г., Покровский В. В., Алхазов Л. Б. Прямой метод определения фазовых проницаемостей в условиях, близких к пластовым (на образцах естественного песчаника). В сб. Исследования в области разработки нефтяных месторождений и физики пласта. М., 1972. (Всес. нефтегаз. н.-и. ин-т, сб. науч. тр. Вып. 44).
3. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.
4. Ентов В. М., Полищук А. М. Движение аномальных жидкостей в пористой среде. В сб. Реология. Полимеры и нефть. Новосибирск, 1977.
5. Вахитов Г. Г., Кац Р. М., Оганджанянц В. Г., Полищук А. М., Суркова Е. М. Одностороннее вытеснение нефти водными растворами сорбирующихся агентов с учетом межслойных перетоков. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 2.

УДК 533.6.014

ДЛИНА БОЧКИ КОЛЬЦЕВОЙ НЕДОРАСПШИРЕННОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЗВУКОВОГО СОПЛА, ИМЕЮЩЕГО НА ОСИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ СТЕРЖЕНЬ

Ю. Я. БОРИСОВ, С. Л. ПОДОЛЬСКИЙ

(Москва)

На кольцевых соплах с центральным стержнем, выступающим за пределы сопла, проведены исследования влияния толщины соплового зазора, кривизны последнего, угла конусности звукового сопла и перепада давлений на длину первой бочки недорасширенной струи. Получено выражение для расчета длины бочки в зависимости от указанных факторов для перепадов давлений свыше 4.4.

Известно, что при торможении сверхзвуковых струй полым резонатором [¹] или даже просто плоским препятствием [²] возможно возникновение неустойчивых режимов течения, сопровождающихся появлением в струе периодических ударных волн, излучающихся в окружающее пространство в виде звуковых волн высокой интенсивности. В генераторе Гартмана, использующем этот эффект неустойчивости, применяется круглая недорасширенная струя, обычно истекающая из звукового конического или цилиндрического сопла [¹] и реже — из сверхзвукового [³]. Такие струи хорошо изучены, поэтому расчет генератора Гартмана, сводящийся к опре-