03

Экспериментальная и вычислительная микрофдюидика для изучения особенностей вытеснения нефти в пористых средах

© И.Ш. Гарифуллин,[1] С.У. Фазлетдинов,[2,3] Ю.А. Питюк,[2] Э.С. Батыршин[2]

[1] Уфимский университет науки и технологий,
450077 Уфа, Россия
[2] ООО „РН-БашНИПИнефть“ (ОГ ПАО НК „Роснефть“),
450103 Уфа, Россия
[3] Уфимский федеральный исследовательский центр РАН,
450054 Уфа, Россия
e-mail: GarifullinISh@yandex.ru, spartak.fazlet@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 января 2025 г.
В окончательной редакции 30 июня 2025 г.
Принято к публикации 18 июля 2025 г.

Представлен микрофлюидный подход для решения задач эффективного извлечения нефти из пористых сред. Основное внимание уделено методам увеличения нефтеотдачи с использованием поверхностно-активных веществ. Показаны преимущества предлагаемого метода с использованием микрофлюидных чипов по сравнению с традиционными фильтрационными экспериментами на керне. Предложен комбинированный экспериментальный и численный подход для оценки эффективности различных вытесняющих агентов. Рассмотрены возможности и ограничения свободных вычислительных пакетов для поросетевого моделирования. Проведено сравнение экспериментальных результатов с численным моделированием. Представлены экспериментальные результаты, показывающие влияние смачиваемости на эффективность вытеснения нефти. Продемонстрирована эффективность применения растворов поверхностно-активных веществ для снижения остаточной нефтенасыщенности. Представленный подход рассматривается как перспективный вариант проведения быстрого скрининга агентов воздействия на продуктивные пласты.

Ключевые слова: методы увеличения нефтеотдачи, заводнение поверхностно-активными веществами, микроэмульсия, поросетевая модель, микрофлюидный чип.

DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62032.8-25

Введение

Эффективное извлечение нефти из пористых сред — ключевая задача нефтегазовой промышленности. Существует несколько последовательно применяемых методов разработки месторождений. Первичный метод основан на добыче углеводородов за счет естественной энергии пласта, обеспечивающей их движение к добывающим скважинам. Вторичный метод предполагает закачку воды в нагнетательные скважины. Первичные и вторичные методы позволяют добыть около 30 % от общего количества запасов нефти [1]. Остаточная нефть удерживается капиллярными силами или остается в тупиковых порах коллектора. Мобилизация такой нефти требует применения различных методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Заводнение с использованием растворов на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ, Surfactant) является одним из таких методов [2]. ПАВ-заводнение обеспечивает дополнительное вытеснение нефти за счет действия нескольких механизмов: снижения межфазного натяжения [3], изменения смачиваемости [4] и эмульгирования [5]. Кроме того, применение специально подобранных составов ПАВ позволяет добиться образования микроэмульсии в процессе вытеснения, что сопровождается снижением межфазного натяжения на несколько порядков [6] и значительно усиливает эффект от использования ПАВ. В то же время из-за уникальности состава нефти и пластовых условий, подбор таких составов должен производиться для каждого объекта индивидуально. Традиционно подбор оптимального состава ПАВ основан на проведении ряда лабораторных тестов, в результате которых определяют физико-химические свойства составов, межфазное натяжение, совместимость агентов вытеснения с пластовыми флюидами, а также фазовые диаграммы равновесия трехкомпонентной системы ПАВ/нефть/вода. После ранжирования составов проводят оценку коэффициентов вытеснения в результате фильтрационных исследований на насыпных моделях [7] или керне [1]. Результаты керновых испытаний являются ключевыми при выборе составов ПАВ, однако трудоемкость и продолжительность таких исследований делают подбор агентов вытеснения чрезмерно дорогостоящей и длительной процедурой. Кроме того, в процессе вытеснения в пористой среде отсутствует возможность визуализации процессов в масштабе отдельных пор, что не позволяет дифференцировать механизмы, обеспечивающие дополнительную добычу нефти. По указанным причинам в качестве инструмента для быстрого и эффективного скрининга агентов вытеснения все чаще рассматрива-

ются микрофлюидные системы, основная идея которых связана с проведением фильтрационных тестов на микрофлюидных чипах — аналогах горной породы [8–11]. Данный подход позволяет проводить качественное ранжирование различных составов по степени эффективности на предварительных этапах подбора агентов вытеснения. Микрофлюидные чипы представляют собой оптически прозрачные устройства, которые содержат в себе одиночные микроканалы или их сети. Основные преимущества проведения экспериментов на чипах обусловлены возможностью визуализации многофазного потока флюидов в поровом пространстве. Это позволяет проанализировать связь интегральных характеристик многофазного потока с процессами в поровом масштабе.

Важным инструментом, дополняющим эксперименты, является численное моделирование, которое позволяет, сохраняя важные физические и геометрические свойства порового пространства керна, выполнять многовариантные расчеты для различных агентов вытеснения в разы быстрее, чем лабораторные исследования. В то же время предварительное численное моделирование позволяет подобрать оптимальный дизайн микрофлюидного чипа с учетом имеющихся ограничений при решении конкретной задачи.

По сравнению с методом решеточных уравнений Больцмана [12,13] и методом частиц [14,15], методы поросетевого моделирования [16,17] являются более привлекательными, поскольку занимают меньше времени и менее требовательны к вычислительным ресурсам из-за представления порового пространства в виде сети пор и каналов. При этом данный метод позволяет учитывать физико-химические свойства вытесняющего агента и горной породы, такие как его плотность, вязкость и поверхностное натяжение между флюидами, угол смачивания и др., что, в свою очередь, дает возможность оценить влияние этих свойств на процесс вытеснения нефти различными агентами, а также подобрать оптимальные параметры растворов ПАВ, обеспечивающие максимальное вытеснение нефти из поровой сети.

В настоящей работе представлено численное и экспериментальное исследование процессов вытеснения гептана различными вытесняющими агентами, в том числе показано влияние смачиваемости на величину коэффициента вытеснения. На основе экспериментальных данных была проведена апробация численного подхода. Новизна настоящей работы заключается в разработанном подходе и новых экспериментальных данных, подтверждающих, что применение специально подобранного раствора повышает эффективность вытеснения нефти.

1. Методика и материалы эксперимента

Изготовление микрофлюидных чипов производилось с использованием методов фотолитографии и химического травления. Чипы представляли собой две склеенные

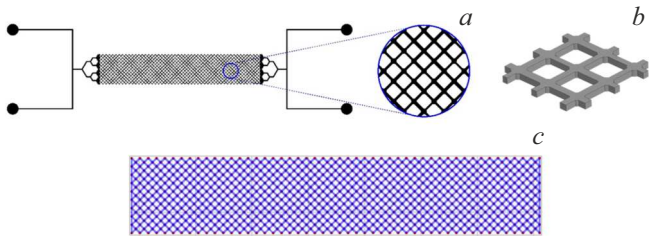

Рис. 1. Структура порового пространства чипа: *a* — вид сверху в плоскости стеклянной пластины; *b* — трехмерная визуализация; *c* — вид сверху численной поросетевой модели.

стеклянные пластины, на одной из которых была сформирована сеть микроканалов, а на другой сделаны отверстия для подвода и отвода флюидов. Процедура формирования микроструктуры и склейки пластин детально описана в работе [18]. Поровое пространство чипов представляло собой поросетевую структуру — систему цилиндрических пор, соединенных между собой каналами в форме прямоугольных параллелепипедов. Структура каналов в плоскости микрофлюидого чипа показана на рис. 1, *a*. Поры распределены в узлах прямоугольной решетки и соединены между собой прямыми каналами. К поровой сети подведена сеть вспомогательных каналов, предназначенная для подвода и отвода потока флюидов. На рис. 1, *b* показан трехмерный фрагмент поровой сети, дающий наиболее детальное представление о структуре порового пространства чипа. Диаметр всех пор составлял $80\,\mu$m, а ширина каналов была задана случайным образом равновероятно в диапазоне от 25 до $55\,\mu$m. Высота всех пор и каналов была одинаковой и составляла $6\,\mu$m. Пористость и проницаемость модели составляли 53 % и $4.1 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{m}^2$ соответственно. Материал микрофлюидных чипов (стекло) позволял использовать их многократно. Для этого после каждого эксперимента поровое пространство чипов последовательно промывалось смесью толуола (Химреактивснаб, Россия) и изопропанола (Химреактивснаб, Россия) в соотношении 2 : 1, деионизированной водой и продувалось воздухом. После промывки чипы высушивались в термошкафе (Ulab, Россия) при температуре 120 °C.

В качестве углеводородной фазы в экспериментах применялся н-гептан (ООО „Протон“, Россия). Для приготовления вытесняющих растворов (агентов вытеснения) использовались: анионный ПАВ — додецилсульфат натрия (Sigma-Aldrich, США), н-бутанол (Химреактивснаб, Россия), хлорид натрия (ОАО „МЗХР“, Россия). В таблице представлены использованные в работе агенты вытеснения. Соляной раствор использовался для моделирования базового варианта вытеснения нефти путем закачки воды. Раствор ПАВ использовался как стандартный агент МУН, позволяющий увеличить добычу за счет снижения межфазного натяжения. Последний раствор представляет собой раствор двух дополняющих друг друга ПАВов (ПАВ/соПАВ). Использование такого рас-

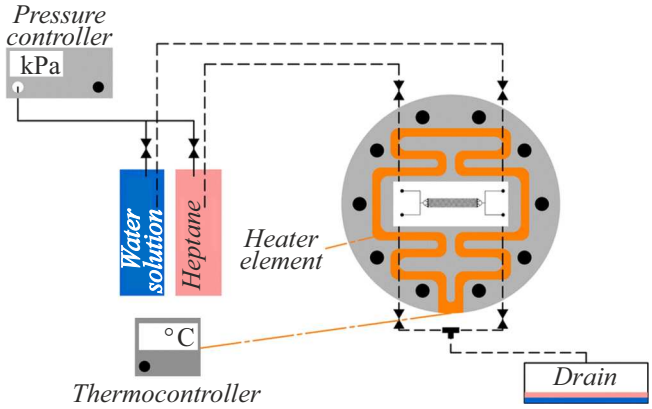

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для микрофлюидных исследований.

Агенты вытеснения

Агент вытеснения	Состав
Соляной раствор	4 weight% раствор хлорида натрия (NaCl) в воде
Раствор ПАВ	5 weight% раствор додецилсульфата натрия (SDS) в соляном растворе
Раствор ПАВ/соПАВ	5 weight% раствор смеси SDS/бутанол (вес.соотношение SDS : бутанол = 1 : 2) в соляном растворе

твора, с правильно подобранной концентрацией и соотношением содержания компонентов, позволяет добиться образования микроэмульсии на фронте вытеснения и тем самым получить дополнительную добычу нефти [19]. Водные растворы окрашивались добавлением бромфенолового синего (Химреактивснаб, Россия) в массовой концентрации 0.2 % для контрастирования водной и углеводородной фаз в процессе вытеснения. Эксперименты проводились на чипах с различной смачиваемостью. Для части чипов исходная гидрофильная поверхность порового пространства модифицировалась в гидрофобную с использованием двухпроцентного раствора диметилхлорсилана (ABCR, Германия) в толуоле [20].

Микрофлюидная установка (рис. 2) собиралась на столе оптического микроскопа Olympus IX-71 (Olympus, Japan), сопряженного с камерой Lumenera Infinity 2 (Lumenera, USA). Микрофлюидный чип фиксировался в специальном держателе, который обеспечивал подключение к источникам флюидов и термостабилизацию. Все эксперименты проводились при температуре 30 °C. Течение флюидов в чипе контролировалось величиной приложенного перепада давления, которое задавалось при помощи контроллера давления (Parker, USA). Изображения поровой сети в процессе вытеснения регистрировались с разрешением 2448 × 2048 точек. Поскольку вся структура чипа не помещалась в поле видения микроскопа, полные изображения порового пространства чипов сшивались из отдельных фрагментов с помощью программы Hugin [21]. Сегментация изображений для оценки флюидонасыщенности, а также оценка контактных углов смачивания (рис. 2, *b*) производилась с помощью программы ImageJ [22]. На рис. 2, *c* представлена сегментация изображения: белые области соответствуют гептану, черные области — вытесняющему агенту. Доля белых пикселей к общему количеству пикселей, занимаемых поровой сетью определяет остаточную долю гептана в поровой сети.

2. Методы численного моделирования

Для проведения численного моделирования использовались два пакета для поросетевого моделирования: OpenPNM [16] и PNFlow [17]. В поросетевых моделях расчетными узлами являются поры, которые соединяются каналом. Поток между этими двумя порами рассматривается как изотермическое несжимаемое течение вязкой жидкости в трубе, которое может быть описано любым количеством аналитических решений в зависимости от геометрии трубы (канала). В случае цилиндрического канала используется уравнение Хагена–Пуазейля. Для квазистатического приближения система уравнений записывается следующим образом:

$$Q_{ij} = g_{ij}(P_i - P_j), \tag{1}$$

где Q_{ij} — расход между порами i и j; P_i и P_j — давления в порах i и j соответственно; g_{ij} — гидравлическая проводимость канала между порами i и j, которая зависит от длины, площади поперечного сечения канала и вязкости жидкости.

Уравнение сохранения массы в поросетевой модели для внутренних пор описывается законом Кирхгофа. Поле давления во всей сети можно рассчитать путем применения уравнения сохранения массы ко всем порам с соответствующими граничными условиями, которые задаются значениями давления во входных и выходных порах. Капиллярное давление в каналах рассчитывается в зависимости от его формы [23]. После расчета поля давления находится расход в поровой сети, который используется для определения абсолютной проницаемости поросетевой модели по закону Дарси.

В первую очередь, моделирование проводилось в пакете OpenPNM, в котором был обнаружен ряд ограничений, первое из которых заключается в том, что рассматриваются цилиндрические каналы, поэтому элементы поровой сети могут быть полностью насыщены только одной фазой, что не позволяет моделировать захват одной из фаз в углах и, как следствие, угловые течения, которые имеют место в реальных процессах вытеснения в пористых средах. Кроме того, возможно задание только одного статического контактного угла, что не позволяет моделировать случайные процессы при вытеснении, которые имеют место при фильтрации в

пористых средах и наблюдаются в экспериментах на микрофлюидных чипах.

Ввиду выявленных ограничений пакета OpenPNM, был рассмотрен второй пакет для поросетевого моделирования PNFlow, который позволяет учитывать частичное заполнение элементов поросетевой модели с различной геометрией. Кроме того, PNFlow позволяет задать случайное распределение контактных углов, которое наблюдается в эксперименте на чипах. В PNFlow задаются как статические, так и динамические контактные углы различными моделями. Статические контактные углы можно задать как равновесным углом для всех элементов, так и распределением Вейбулла [24]. Для динамических контактных углов можно задать постоянное значение или в виде равномерного распределения. Помимо этого, отступающий и наступающий контактные углы можно задать классами углов Morrow [25].

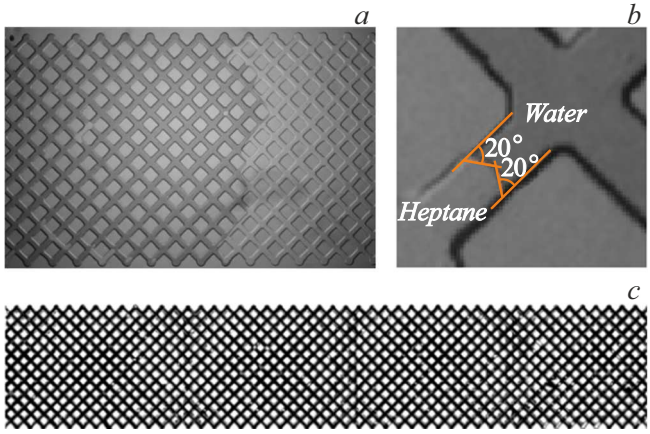

Рис. 4. Вытеснение углеводорода соляным раствором в гидрофильной модели: *a* — характерная картина вытеснения; *b* — контактный угол смачивания; *c* — распределение флюидов. Светлые области — гептан, темные — вода.

3. Результаты экспериментов

Контроль исходной и измененной смачиваемости поверхности микроканалов осуществлялся методом сидячей капли. На рис. 3 показаны капли воды на поверхности стеклянных пластин, которые использовались для изготовления чипов. Угол смачивания необработанной исходной поверхности пластины на границе „стекло–вода–воздух“ составил 24°, а обработанной — 91°. Таким образом, обработка поверхности позволила изменить исходную гидрофильную смачиваемость поверхности пластин на гидрофобную.

Характеристики вытеснения гептана различными растворами определялись в результате фильтрационных экспериментов. Поровое пространство микрофлюидного чипа предварительно заполнялось гептаном до состояния стопроцентной насыщенности, затем производилась закачка вытесняющего агента при постоянном перепаде давления. Коэффициент вытеснения определялся как относительное изменение насыщенности поровой сети углеводородной фазой в результате вытеснения. Поскольку высота пор и каналов чипа — величина постоянная для всех участков поровой сети, соотношение объемов фаз равно соотношению площадей фрагментов изображений, занятых водной и углеводородной фазами. Площади областей изображений, соответствующих различным фазам, легко определялись, поскольку водная фаза была специально окрашена для контрастирования.

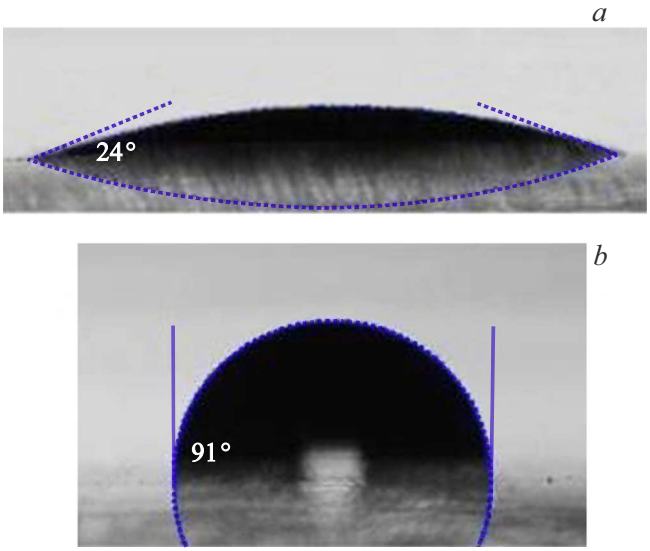

Рис. 3. Контактные углы смачивания поверхности стекла: *a* — исходная; *b* — обработанная.

Первоначально для оценки эффективности раствора были проведены эксперименты по вытеснению углеводорода соляным раствором в условиях различной смачиваемости чипов. В этих экспериментах моделировалась базовая схема заводнения при разработке месторождений. На рис. 4, *a* показана характерная картина вытеснения для гидрофильной поросетевой структуры. Характерный расход и время вытеснения составили 0.04 μl/min и 370 s соответственно. Фронт вытеснения в данном случае являлся почти поршневым и имеет четкую локализацию. В гидрофильном чипе вытесняющий агент является смачивающей жидкостью, поэтому капиллярные силы способствуют вытеснению. Контактные углы смачивания на границе „стекло–вытесняющая жидкость–гептан“ изменялись в диапазоне 20–40° (рис. 4, *b*). Сегментация изображения поровой сети после вытеснения (рис. 4, *c*) дает оценку коэффициента вытеснения углеводородной фазы 92 %.

В случае гидрофобного чипа наблюдается картина вытеснения, обусловленная действием капиллярных сил (рис. 5, *a*), препятствующих вытеснению гептана. Характерный расход и время вытеснения составили 0.03 μl/min и 450 s соответственно. Контактные углы смачивания на границе „стекло–вытесняющая жидкость–гептан“ составляют 108–143° (рис. 5, *b*). В данном случае на-

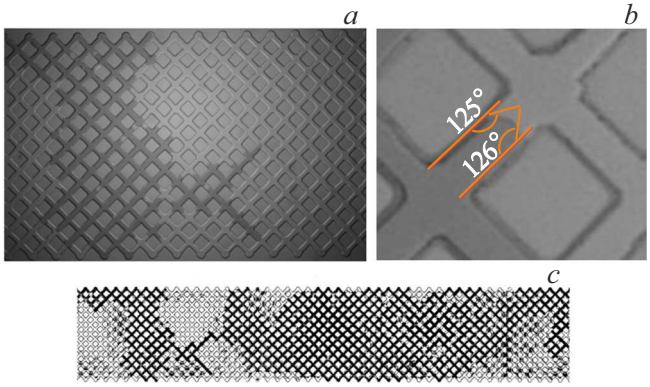

Рис. 5. Вытеснение углеводорода соляным раствором в гидрофобной модели: *a* — характерная картина вытеснения; *b* — контактный угол смачивания; *c* — распределение флюидов. Светлые области — гептан, темные — вода.

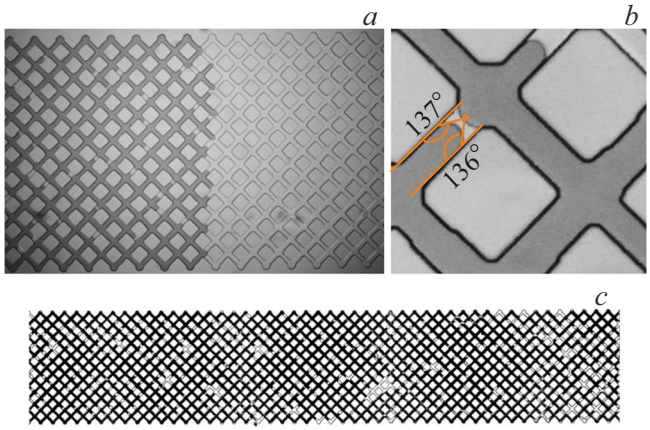

Рис. 6. Вытеснение углеводорода раствором ПАВ в гидрофобной модели: *a* — характерная картина вытеснения; *b* — контактный угол смачивания; *c* — распределение флюидов. Светлые области — гептан, темные — вода.

блюдаются большие кластеры неподвижной углеводородной фазы, удерживаемые капиллярными силами. Как результат, коэффициент вытеснения составил 80 %, что заметно меньше значения для случая гидрофильного чипа.

Эксперименты с применением растворов с ПАВ проводились на гидрофобных моделях. На рис. 6, *a* показана характерная картина вытеснения гептана раствором ПАВ. Применение ПАВ позволяет уменьшить межфазное натяжение на границе „вытесняющая жидкость–гептан“ и, как следствие, уменьшить капиллярные силы, препятствующие течению вытесняющей жидкости. Характерный расход и время вытеснения составили 0.18 μl/min и 90 s соответственно. Эти изменения ведут к выравниванию фронта вытеснения и позволяют увеличить относительную долю поровой сети, вовлеченную в процесс фильтрации. Контактные углы в данном случае изменялись в диапазоне 133–151° (рис. 6, *b*). Увеличение охвата дренирования позволило уменьшить остаточную нефтенасыщенность и увеличить коэффициент вытеснения гептана до 88 % (рис. 6, *c*).

Особым случаем ПАВ-заводнения является микроэмульсионное заводнение, при котором состав ПАВ подбирается таким образом, что в области контакта вытесняющего агента с нефтью образуется микроэмульсионная фаза. Образование микроэмульсии сопровождается уменьшением межфазного натяжения на несколько порядков, что дает возможность дополнительного извлечения нефти. Именно такой состав ПАВ/соПАВ, способный к образованию микроэмульсии при смешении с гептаном, использовался в последней серии экспериментов (рис. 7). При прокачке раствора наблюдается поршневой фронт вытеснения, однако в отличие от простого ПАВ-заводнения с течением времени наблюдается „размывание“ границы между вытесняющим агентом и углеводородом (рис. 7, *b*). На изображениях переход от вытесняющего агента (темные области) к углеводороду (светлые области) становится размытым (наблюдаются полутона) без четко локализованной в пространстве межфазной границы. Указанный процесс взаимного растворения водной и углеводородной фаз становится возможным благодаря процессу солюбилизации с образованием микроэмульсии [26]. Отсутствие хорошо выраженной границы между фазами эффективно выражается в уменьшении межфазного натяжения на несколько порядков. Характерный расход и время вытеснения составили 0.15 μl/min и 100 s соответственно. После проведения вытеснения были измерены контактные углы смачивания на границе „стекло–раствор вытеснения–гептан“, которые составили 124–129°. Ультранизкие значения коэффициента межфазного натяжения позволили в данном случае увеличить коэффициента вытеснения до 95.1 % (рис. 7, *c*).

Сравнение эффективности вытеснения различными агентами, представленное на рис. 8, показывает наиболь-

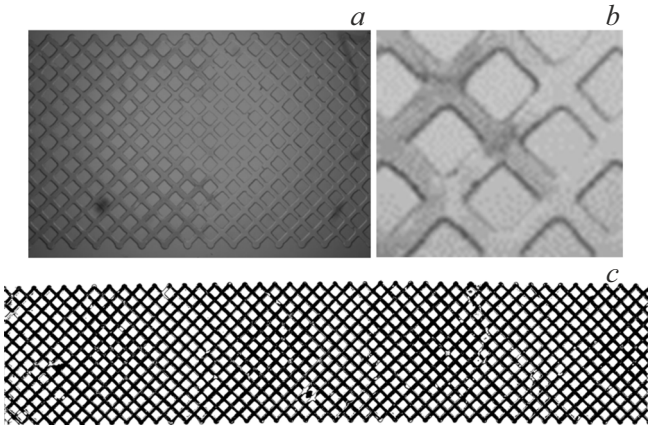

Рис. 7. Вытеснение углеводорода раствором ПАВ/соПАВ в гидрофобной модели: *a* — характерная картина вытеснения; *b* — контактный угол смачивания; *c* — распределение флюидов. Светлые области — гептан, темные — вода.

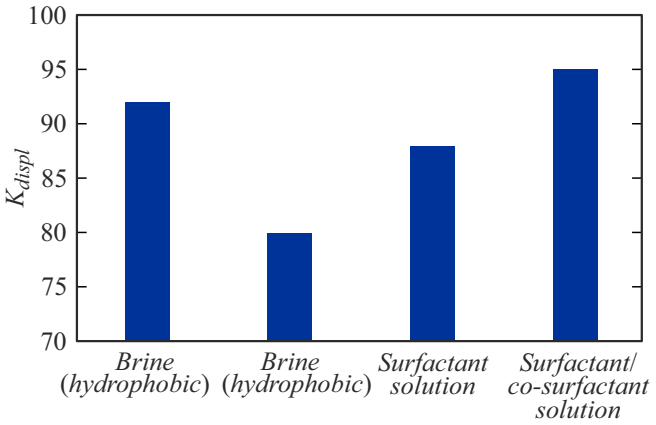

Рис. 8. Сопоставление эффективности вытеснения гептана различными агентами в гидрофобной модели.

шую эффективность для случая заводнения с использованием раствора, способного к образованию микроэмульсии. Показанный экспериментальный метод позволяет детализировать действие механизмов вытеснения в масштабе отдельных пор при ПАВ-заводнении и может быть использован для подбора оптимального состава агента с добавлением ПАВ для условий конкретного объекта месторождения. Такая технология скрининга агентов, содержащих ПАВ, с применением микрофлюидных чипов может эффективно использоваться для массовых предварительных тестов с целью выбора кандидатов для исследований на реальном керне.

4. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными

Поросетевая модель для численного моделирования сгенерирована на основе экспериментального микрофлюидного чипа (рис. 1, *b*) с применением пакета pnextract [13]. Общая длина сгенерированной модели составила 14 mm, ширина — 3 mm. Изначально модель полностью заполнялась гептаном с вязкостью $3.86 \cdot 10^{-4}$ Pa · s, что соответствовало экспериментальному значению вязкости, полученному при температуре 30 °C (температура проведения лабораторных исследований). Слева, во входные поры, подавалась вода с вязкостью 10^{-3} Pa · s. Рассматривался случай вытеснения соленой водой с коэффициентом поверхностного натяжения 0.05 N/m и гидрофобной поверхностью с динамическим контактным углом в диапазоне от 108 до 143° согласно экспериментальным данным. В численной модели в пакете OpenPNM был задан такой же коэффициент поверхностного натяжения и контактный угол, равный 130°. В результате коэффициент вытеснения гептана составил 79.4 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, где коэффициент вытеснения гептана составил 80 %. На рис. 9, *a* представлена характерная картина вытеснения, полученная в результате численного моделирования в OpenPNM. Стоит отметить, что, несмотря на хорошее согласование коэффициента вытеснения гептана, поры, в которых остался гептан после вытеснения, не соответствуют эксперименту на чипах, где для каждого эксперимента наблюдается захват гептана в разных порах с сохранением при этом доли вытесненного гептана. Это объясняется преобладанием капиллярных сил, на которые существенное влияние оказывают динамические контактные углы, являющиеся случайной величиной.

Далее были проведены расчеты вытеснения гептана соленой водой, но с использованием пакета PNFlow. В модели статические углы задавались в виде распределения Вейбулла в диапазоне 108–143°, что соответствовало экспериментальным данным. Динамические контактные углы были заданы классом MorrowIII, который определяет отступающий и наступающий динамические углы на основе статического. Такое задание статического и динамических контактных углов в элементе поросетевой модели в каждом расчете приводило к захвату различных каналов и пор (рис. 9, *b*), что соответствовало картинам вытеснения, наблюдаемым при многократном проведении экспериментов на чипе (рис. 9, *c*). После запуска серии расчетов был получен средний коэффициент вытеснения гептана, равный 80 %, что соответствует коэффициенту вытеснения, полученному в эксперименте.

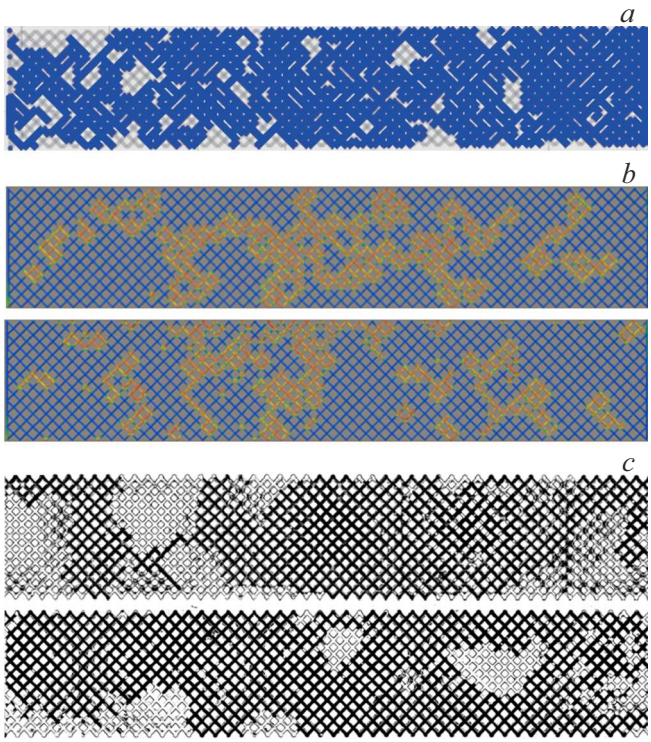

Рис. 9. Сравнение результатов вытеснения гептана соленой водой в поросетевой модели с использованием OpenPNM (*a*), PNFlow (*b*) и в эксперименте (*c*). В первом случае $K_{displ} = 79.4\,\%$, при использовании PNFlow результат идентичен эксперименту — $K_{displ} \approx 80\,\%$.

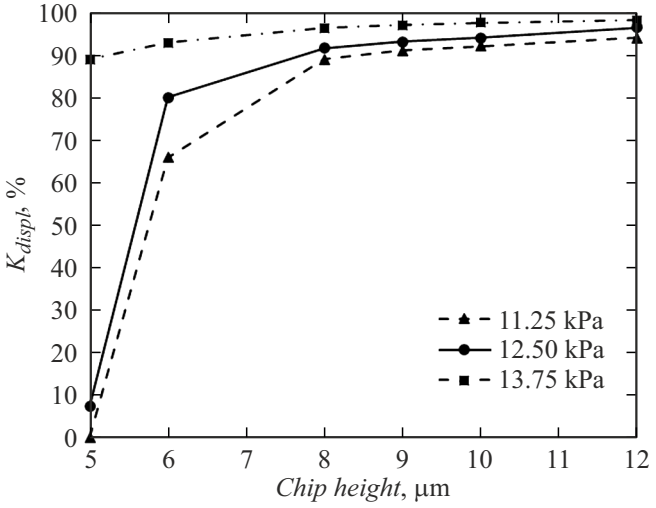

Рис. 10. Изменение коэффициента вытеснения гептана в поросетевой модели в зависимости от высоты чипа при различных перепадах давления.

Также был проведен анализ изменения коэффициента вытеснения углеводородной фазы в зависимости от высоты чипа при различных значениях перепада давления (рис. 10). Из рисунка видно, что с увеличением высоты чипа увеличивается коэффициент вытеснения гептана. Данный факт обусловлен уменьшением гидравлического сопротивления каналов в поросетевой модели, а, соответственно, и уменьшением капиллярных сил, направленных против течения агента вытеснения. Кроме того, отметим, что с увеличением перепада давления, доля захваченного гептана уменьшается, однако для высоты более $8\,\mu$m влияние перепада давления не оказывает существенного влияния на процесс вытеснения, поскольку доминирующую роль начинает играть вклад вязких сил, преобладание которого приводит к тому, что практически весь гептан вытесняется из поровой сети при незначительных перепадах давления. Также стоит отметить, что перепада давления 11.25 kPa в чипе высотой $5\,\mu$m недостаточно, чтобы преодолеть капиллярные силы и начать вытеснение. Таким образом, численное моделирование можно использовать для составления дизайна микрофлюидного чипа и подбора условий эксперимента.

Таким образом, пакет PNFlow позволил смоделировать процесс вытеснения в поросетевых моделях, наблюдаемый в эксперименте на чипах, и может быть использован для развития технологий скрининга агентов ПАВ на базе микрофлюидных чипов, в том числе для подготовки дизайна геометрии чипа.

Заключение

В рамках исследования изготовлена и апробирована экспериментальная платформа с использованием микрофлюидных чипов для исследования процессов вытеснения в пористых средах.

Экспериментально исследованы процессы вытеснения углеводородов на примере н-гептана различными агентами вытеснения в гидрофильных и гидрофобных микрофлюидных чипах.

Эксперименты по вытеснению на гидрофобных микрофлюидных чипах различными агентами (соляным раствором, раствором ПАВ, раствором ПАВ/соПАВ) показали, что наибольшей эффективностью обладают растворы, способные к образованию микроэмульсионной фазы при контакте с углеводородами.

Предлагаемый подход является подходящей испытательной платформой для изучения процессов вытеснения благодаря возможности визуализации и анализа поведения жидкостей в поровом масштабе.

Получено хорошее согласование результатов численного моделирования в пакетах для поросетевого моделирования OpenPNM и PNFlow с экспериментальными данными. Показано, что использование PNFlow лучше описывает экспериментальные данные.

Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки микрофлюидной скрининг-технологии для подбора эффективных агентов вытеснения нефти, которая, в свою очередь, может оказать влияние на нефтедобывающую отрасль экономики в части развития инновационных технологий увеличения добычи нефти.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-79-10212.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интерсов.

Список литературы

[1] M. Fani, P. Pourafshary, P. Mostaghimi, N. Mosavat. Fuel, **315**, 123225 (2022).
[2] H. Imuetinyan, A. Augustine, A. Gbadamosi, R. Junin. Arabian J. Geosci., **15** (3), 226 (2022).
[3] X. Deng, Sh. Patil, M.Sh. Kamal, M. Mahmoud, A. Sultan, T. Saikia. Energy Fuels, **36** (14), 7391 (2022).
[4] G. Cheraghian, S. Rostami, M. Afrand. Processes, **8** (9), 1073 (2020).
[5] X. Zhao, F. Zhan, G. Liao, W. Liu, X. Su, Y. Feng. J. Colloid Interface Sci., **620**, 465 (2022).
[6] J. Pereira, A. Costa, N. Foios. Fuel, **134**, 196 (2014).
[7] O. Massarweh, A.S. Abushaikha. Geoenergy Sci. Eng., **221**, 211400 (2023).
[8] S. Gogoi, S.B. Gogoi. J. Petroleum Exploration Production Technol., **9**, 2263 (2019).
[9] L. Hao, P. Cheng. Intern. J. Heat Mass Transfer, **53** (9), 1908 (2010).

[10] M. Pryazhnikov, A. Pryazhnikov, A. Skorobogatova, A. Minakov, Y. Ivleva. Micromachines, **14** (6), 1137 (2023).
[11] Д.И. Перепонов, А. Щербакова, В.В. Казаку, М.Э. Гаджиев, М.А. Тархов, Е.Д. Шилов, А.Н. Черемисин. Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана, **5** (1), 57 (2023).
[12] M. Zhang, G. Ye, K.V. Breugel. Computational Mater. Sci., **68**, 142 (2013).
[13] A.M. Tartakovsky, P. Meakin. Adv. Water Resources, **29** (10), 1464 (2006).
[14] Y. Zhu, P.J. Fox. J. Computational Phys., **182** (2), 622 (2002).
[15] A.Q. Raeini, B. Bijeljic, M. Blunt. Phys. Rev. E, **96**, 013312 (2017).
[16] J. Gostick, M. Aghighi, J. Hinebaugh, Th.G. Tranter, M. Hoeh, H. Day, M.H. Sharqawy, B. Spellacy, A. Bazylak, A.D. Burns, W. Lehnert, A. Putz. Computing Sci. Eng., **18** (4), 60 (2016).
[17] P.H. Valvatne, M.J. Blunt. Water Resources Res., **40**, W07406 (2004).
[18] И.Ш. Гарифуллин, О.А. Солнышкина, Э.С. Батыршин. Приборы и техника эксперимента, **5**, 187 (2024).
[19] J. Van Nieuwkoop, G. Snoei. J. Colloid Interface Sci., **103** (2), 400 (1985).
[20] H. Emami Meybodi, R. Kharrat, X. Wang. Transport in Porous Media, **89**, 97 (2011).
[21] Hugin [сайт]. Panorama photo stitcher. URL: https://hugin.sourceforge.io
[22] W.S. Rasband. ImageJ Wiki [сайт]. URL: https://imagej.net/ij
[23] P.-E. Øren, S. Bakke, O.J. Arntzen. SPE J., **3**, 324 (1998).
[24] W. Weibull. J. Appl. Mech., **18** (3), 293 (1951).
[25] N.R. Morrow. J. Can. Pet. Technol., **14**, 1 (1975).
[26] T. Sottmann, C. Stubenrauch. *Microemulsions: background, new concepts, applications, perspectives* (Blackwell Publishing, Ltd, 2009), p. 1–47.