

УДК 532.546/553.984
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732
Шифр специальности ВАК: 25.00.22
Обзорная статья

Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах нефтегазовой индустрии

А.С. Якимов, В.Д. Мешкова[✉], Д.В. Гузей, А.И. Пряжников, А.В. Минаков

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

[✉]Redel-VD@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Микрофлюидные чипы, имитирующие структуру горной породы, являются одним из немногочисленных методов, позволяющих визуализировать микромасштабные гидродинамические процессы, протекающие в пористых средах. **Целью** данной работы является описание методики разработки микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости, на основе которой была разработана коллекция микрофлюидных чипов, которую рекомендовано использовать для решения задач в нефтегазовой индустрии. **Методы.** Для реализации поставленной цели применялись методы лабораторного и численного моделирования. Предложены и апробированы на практике новые алгоритмы построения искусственных топологий пористых тел с изотропными и анизотропными характеристиками проницаемости, а также адаптирована методика оцифровки натуральных изображений для получения на их основе топологий чипов. **Результаты и выводы.** Полученные результаты демонстрируют успешную реализацию рассматриваемой методики. С ее помощью были разработаны различные топологии чипов-моделей, имитирующих горную породу, которые и легли в основу разработки коллекции. Особое внимание было уделено созданию топологий, направленных на изучение течения жидкости в зоне трещины гидроразрыва пласта и буровых растворов, а также для моделирования течений на масштабе отдельных пор в районах трещин и стыков пород с разными фильтрационно-емкостными характеристиками. Основным выводом исследования является то, что созданную коллекцию микрофлюидных чипов рекомендовано использовать для лабораторного моделирования физико-химических процессов в прискважинной зоне, а также для тестирования разрабатываемых математических моделей и верификации численных алгоритмов.

Ключевые слова: микрофлюидика, пористая среда, керн, моделирование в масштабе пор, методика, алгоритмы

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>

Для цитирования: Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах нефтегазовой индустрии / А.С. Якимов, В.Д. Мешкова, Д.В. Гузей, А.И. Пряжников, А.В. Минаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732

UDC 532.546/553.984
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732
Review article

Development of a collection of microfluidic chips for studying multiphase flows in the oil and gas industry

A.S. Yakimov, V.D. Meshkova[✉], D.V. Guzey, A.I. Pryazhnikov, A.V. Minakov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[✉]Redel-VD@yandex.ru

Abstract. Relevance. Microfluidic chips simulating the structure of rocks are one of the few methods that allow visualizing microscale hydrodynamic processes occurring in porous media. **Aim.** To describe the methodology for developing microfluidic chip models of rocks with different permeability and wettability characteristics, on the basis of which a collection of microfluidic chips was developed. The latter is recommended for use in solving problems in the oil and gas industry. **Methods.** To

achieve this goal, laboratory and numerical modeling methods were used. New algorithms for constructing artificial topologies of porous bodies with isotropic and anisotropic permeability characteristics were proposed and tested in practice, and a technique for digitizing natural images was adapted to obtain chip topologies on their basis. **Results and conclusions.** The obtained results demonstrate the successful implementation of the considered method. With its help the authors developed various topologies of the chip models simulating rock, which easily formed the basis for the development of the collection. Particular attention was paid to the creation of topologies aimed at studying the flow of liquid in the zone of a hydraulic fracturing crack and drilling muds, as well as for modeling flows on the scale of individual pores in the areas of cracks and joints of rocks with different filtration-capacitive characteristics. The main conclusion of the study is that the created collection of microfluidic chips is recommended for use in laboratory modeling of physical and chemical processes in the near-wellbore zone, as well as for testing the developed mathematical models and verifying numerical algorithms.

Keywords: microfluidics, porous media, core, scale modeling, methodology, algorithms

Acknowledgements: The research was carried out with the grant of the Russian Science Foundation no. 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>

For citation: Yakimov A.S., Meshkova V.D., Guzey D.V., Pryazhnikov A.I., Minakov A.V. Development of a collection of microfluidic chips for studying multiphase flows in the oil and gas industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732

Введение

Для нефтегазовой отрасли изучение течения многофазных потоков и исследование сложных физико-химических процессов, протекающих в пористых средах, играет очень важную роль, так как полученные знания в данной области позволяют оптимизировать имеющиеся технологии добычи углеводородного топлива, а также ложатся в основу для разработки новых.

Традиционно данные исследования осуществляются с использованием образцов керна нефтегазовой горной породы, но в силу непрозрачности образца и геометрической сложности природной пористой среды детальная визуализация течения и демонстрация процессов фильтрации/вытеснения в данном случае невозможна [1–3]. В связи с этим одним из немногих методов, позволяющих визуализировать микромасштабные процессы, протекающие в пористых средах, является использование микрофлюидных чипов, имитирующих структуру горной породы [4–7].

Внешне микрофлюидный чип является прозрачным образцом, воспроизводящим пористую сеть в 2D-плоскости, что позволяет наглядно демонстрировать динамику жидкости и оценить поведение флюида в пластовых условиях [8–10]. Основное преимущество применения микрофлюидного чипа заключается в том, что исследователь может сам воссоздавать необходимую топологию чипа под определенный класс задач, путем настройки их геометрических характеристик и свойств поверхности [11, 12]. Так, например, в работе [13] авторы использовали микрофлюидный чип для моделирования процесса вытеснения нефти пеной из трещины между породами с различной проницаемостью. Стоит отметить, что при разработке топологии чипа пористость и размер зерен можно задавать [14]. Также микрофлюидные чипы используют для про-

ведения физико-химического анализа процесса осаждения асфальтенов в прискважинной зоне на зернах породы [15] и для исследования течений в трещинах ГРП [16]. В обзорных работах [17, 18] представлен глубокий анализ применения микромоделей и их описание для изучения течения в гетерогенных горных породах и трещинах.

Разработка микрофлюидных чипов осуществляется по технологии «лаборатория-на-чипе» (ЛНЧ) [19, 20]. Для изготовления микромоделей используют различные материалы, например, такие как: стекло, кварц, полиметилметакрилат (ПММА) и полидиметилсилоксан (ПДМС), а также кремний и пластик [21, 22]. Но наиболее химически устойчивый материал по отношению к нефтепродуктам – ПДМС [23]. В качестве альтернативного материала можно рассматривать эпоксидные составы. Данные материалы используются и для изготовления подложки чипа.

Суть технологии ЛНЧ заключается в том, что она позволяет изготавливать модель чипа послойно, путем образования углубленного узора, который покрывается сверху другой ровной пластиной, формируя капиллярную сеть на стыке пластин [24]. В связи с этим ПДМС является наиболее применимым материалом для решения данного класса задач, так как позволяет создавать пластины, на которых можно формировать микроструктуру с отношением высоты к ширине равным до 5:1 с точностью 100 нм.

Кроме выбора материала, из которого будет изготовлен чип, необходимо подобрать метод, с помощью которого будет реализован процесс формирования узора. В научной практике таких методов существует достаточно много, но основными из них являются: метод фотолитографии, фрезерования, а также метод лазерной абляции [25–27].

Для получения узора методом фотолитографии необходимо на обрабатываемую поверхность нане-

сти фоторезистивный материал, который при засветке ультрафиолетом начнет менять свои свойства. Далее поверхность обрабатывается проявителем, и с поверхности удаляется засвеченный либо не засвеченный фоторезистор. Происходит формирование канализированного узора из фоторезистора путем поляризации поверхности. Таким образом, удастся получить структуры с высоким аспектным отношением (до 10:1) [25].

Метод фрезерования можно отнести к методам, позволяющим быстро прототипировать микрофлюидные устройства, так как реализация метода заключается в механической обработке материала в результате его резания фрезой. Максимальное аспектное отношение определяется длиной фрезы и ее диаметром, для стандартных фрез этот параметр составляет 4:1 [26]. В качестве альтернативного метода для быстрой разработки чипа может применяться метод лазерной абляции. Принцип действия метода схож с принципом метода фрезерования, только удаление вещества происходит под воздействием лазерного импульса. Данный метод позволяет формировать структуры с аспектное отношение до 2:1 за один проход [27].

Обзор работ показал, что микрофлюидные чипы могут эффективно применяться при гидродинамических исследованиях в различных отраслях науки и технологиях. Методов создания микрофлюидных чипов в настоящее время известно достаточно много. Выбор конкретного метода изготовления является нетривиальной задачей и напрямую зависит от материала, из которого планируется изготовить чип, и условий микрофлюидного эксперимента. Данная работа посвящена описанию методики разработки микрофлюидных чипов и созданию коллекции чипов-моделей для научно-исследовательских задач нефтегазовой индустрии.

Описание методики разработки микрофлюидных чипов

Методика, на основе которой разрабатываются микрофлюидные чипы, имитирующие различные горные породы, состоит из трех основных этапов. На *первом этапе* получают топологию микрофлюидного чипа; на *втором этапе* разрабатывают численную модель чипа и выполняют численные исследования, в ходе которых определяют его фильтрационно-емкостные свойства, затем выполняется анализ результатов и осуществляется оптимизация топологии. На *третьем этапе* изготавливается микрофлюидный чип уже с оптимизированной топологией. Ниже представлено подробное описание реализации каждого этапа.

Разработка топологии микрофлюидного чипа

На *первом этапе* строится топология пористого тела, которая имитирует структуру горной породы.

В качестве примера рассматривается топология, полученная в результате заполнения чаши Петри суспензией наноалмазов. В результате естественного высыхания рассматриваемой суспензии происходит образование случайной формы уникального узора, который теоретически подобен структуре горной породы. В итоге получают плоские изображения сформированной структуры.

Получившиеся растровые изображения в виде фотографий необходимо преобразовать в векторную модель представления. Данная операция выполняется с помощью графического редактора Inkscape. Результатом векторизации станет набор замкнутых контуров, повторяющих очертания непрозрачных ячеек растрескавшейся наноалмазной пленки.

Расчетные исследования по оптимизации топологий микрофлюидных чипов

На *втором этапе* выполняются расчетные исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств, разрабатываемых микрофлюидных чипов, а также корректируются их геометрические характеристики и проектируются системы микроканалов для подвода и отвода жидкости.

Численное исследование выполнялось с помощью математической модели однофазного течения вязкой жидкости Навье–Стокса с постоянными значениями динамической вязкости и плотности.

Движение жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса для несжимаемой среды:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$
$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{S}),$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости; p – динамическое давление; $\mathbf{S} = 0,5(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$ – тензор скоростей деформации; μ – динамическая вязкость; ρ_∞ – плотность среды.

Численный алгоритм базируется на методе конечного объема для неструктурированной сетки. Для получения балансных соотношений метода конечных объемов выполняется интегрирование дифференциальных уравнений по объему ячейки со сведением объемных интегралов к интегралам по поверхности контрольного объема. В качестве среднего значения по объему принимается значение в центре ячейки, а в качестве среднего значения на грани – значения в геометрическом центре грани. Градиенты сеточных полей в центре ячейки строятся на основе метода наименьших квадратов.

Решение исходной системы уравнений решается последовательно. На каждом временном шаге выполняется несколько глобальных итераций, связывающих поля скорости, давления.

Представленная математическая модель была реализована в программном модуле «PoreFlow» на базе отечественного программного комплекса «SigmaFlow» [28]. Программный комплекс «SigmaFlow» ранее тестировался на большом количестве задач капиллярной гидродинамики и теплообмена [29–31]. Было продемонстрировано хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными как по локальным характеристикам течения (форма профиля скорости и температуры, полученная micro-PIV и LIF измерениями), так и по интегральным параметрам (коэффициенты сопротивления и теплоотдачи).

В ходе многочисленных исследований осуществляется оптимизация топологии чипа-кандидата до тех пор, пока не будут получены необходимые значения пористости и проницаемости, а также уточняются геометрические характеристики чипа и утверждается система микроканалов для подвода и отвода жидкости.

С помощью численного моделирования проводилась оптимизация топологии чипа-кандидата с целью получения необходимых значений пористости и проницаемости. Кроме того, с помощью расчетов также было выполнено проектирование системы микроканалов для подвода и отвода жидкости в микрочипе.

Изготовление микрофлюидных чипов

На третьем этапе выполняется изготовление микрофлюидного чипа с оптимизированной топологией.

Для изготовления модели-чипа был выбран ПДМС как популярный и достаточно изученный материал для изготовления микрофлюидных чипов с высоким аспектным отношением и субмикронным разрешением, для которого известны различные технологии микроформовки, герметизации и модификации поверхности. Часть используемых технологий описана ниже.

Изготовление модели-чипа начиналось с того, что на кремниевую монокристаллическую пластину диаметром 100 мм и толщиной 525 мкм наносился позитивный фоторезист ФП-383, после чего высушивался в соответствии с инструкцией производителя и помещался в установку лазерного экспонирования μ PG 101 (Heidelberg, Германия). После экспонирования фоторезист проявлялся, оголяя кремний в местах будущих возвышенностей (на негативной мастер-форме соответствуют каналам чипов) (рис. 4, п. 3).

Далее пластинка обрабатывалась в СВЧ-плазме низкого давления в среде аргона с целью очистки поверхности оголившегося кремния от остатков проявителя и для обеспечения высокой адгезии при осаждении хрома. Затем пластинка помещалась в установку термовакuumного осаждения Auto 500

RF Boc (Edwards) напротив тигля с расплавом хрома при давлении 6,4 мТорр. Хром плавился с помощью электронного пучка, происходило его испарение и осаждение на все поверхности, которые были расположены напротив тигля, в том числе на образце. Контроль толщины осаждения приводился по прозрачности контрольного покровного стекла в автоматическом режиме. Толщина напыления составляла 50 нм и была нанесена примерно за 1 час на всю поверхность образца, включая проявленные и непроявленные области: на кремний и фоторезист.

Если растворить фоторезист, то и слой хрома над ним будет удален. При этом связанная с кремнием хромовая маска останется и будет надежно защищать поверхность в процессе дальнейшего травления. Данный процесс называется «Lift-off» («взрывом»). «Взрыв» фоторезиста производился в диметилсульфоксиде, нагретом до 80–85 °С. Для увеличения эффективности данный процесс сопровождается ультразвуковой обработкой до полного удаления фоторезиста в течение нескольких часов.

Далее происходило анизотропное травление пластинки высокоэнергетичными ионами по Bosch-процессу при комнатной температуре. Проектная глубина травления 40 мкм. После травления была измерена фактическая глубина на профилометре XP-1 (AMBiOS technology) в различных областях пластинки: 36,042; 34,399; 35,883 мкм.

Стоит отметить, что кремний имеет высокую адгезию к ПДМС, поэтому перед заливкой его необходимо было силанизировать. Силанизация производилась путем помещения образца в вакуумный эксикатор с несколькими каплями трихлорперфторооктилсилана на сутки. Капли полностью испарялись и конденсировались на всех поверхностях, в том числе на образце.

Заливка мастер-формы производилась двухкомпонентным силиконовым компаундом Sylgard 184 (DowCorning, США) (после полимеризации он превращается в ПДМС) в соответствии с инструкцией производителя. При этом компаунд дегазировался после замешивания и после заливки в мастер-форму для удаления пузырей воздуха из внутренних углов мастер-формы. Полимеризация происходила при температуре 80 °С в течение четырех часов. После чего канцелярским ножом ПДМС надрезался по периметру мастер-формы и извлекалась канализированная пластинка из ПДМС.

В местах подключения трубочек прорезались отверстия с помощью изготовленного из тупой иглы пробойника. Для этого края иглы диаметром 1 мм затачивались снаружи полировочной резинкой и убирался заусенец внутри твердосплавным стоматологическим буром. Для прочистки пробойника в иглу подавался воздух с помощью шприца.

Очистка поверхности от частиц ПДМС после пробивания отверстий осуществлялась клейкой лентой Magic Scotch (3М, США). Затем производилась герметизация микрофлюидного чипа предметным стеклом.

Для этого стекло тщательно отмывалось в ацетоне, изопропанолe и дистиллированной воде. После чего высушивалось и обе пластинки (ПДМС и стекло) помещались в плазменную камеру оригинальной конструкции [32], где в разряженной влажной атмосфере поджигался диэлектрический барьерный разряд и на поверхности пластин образовывались полярные силанольные и метанольные группы. После плазмления поверхности прикладывались друг к другу, и происходило их слипание. Для упрочнения соединения изготовленный чип выдерживался при температуре 125 °С в течение 15 минут. Эта температура катализировала реакцию образования ковалентных силоксановых связей из водородных силанольных.

Результаты исследования и их обсуждения

Для изучения сложных физико-химических процессов в интересах нефтегазовой отрасли были разработаны различные топологии прототипов микрофлюидных чипов. Так, была воспроизведена серия чипов-моделей, имитирующих горную породу. Данный вид чипов необходим для проведения сравнительных экспериментов при тестировании разрабатываемых математических моделей и верификации реализованных в них численных алгоритмов. Были разработаны топологии чипов, с помощью которых моделировались физико-химические процессы, протекающие в проразожженной зоне. Особое внимание было уделено созданию топологий, направленных на изучение течения жидкости в зоне трещины гидроразрыва пласта и буровых растворов, а также для моделирования течений на масштабе отдельных пор в районах трещин и стыков пород с разными фильтрационно-емкостными характеристиками.

В результате была разработана коллекция топологий микрофлюидных чипов, которая представлена на рис. 1.

Каждая топология, представленная в коллекции, была разработана для решения конкретных задач. Так, например, *Топология № 1* разрабатывалась для исследования процесса вытеснения нефти заводнением (рис. 1, а). Длина чипа порядка 3220 мкм, для увеличения сопротивления трещины на границе двух сред ширина трещины составляла 70 мкм. Пористость обеих половин сформирована заполнением с симметрией четвертого порядка квадратами, расстояние между которыми равно стороне 40 мкм для одной половины и 80 мкм для другой.

Трещины в породе могут иметь иерархию, то есть зерна породы тоже имеют микро- и даже

нанопористость. Для исследования вытеснения нефти из более мелких пор в присутствии достаточно широкого протока рядом (аналог байпаса) была спроектирована серия топологий, которые в коллекции объединены в *Топологию № 2* (рис. 1, б). В отличие от *Топологии № 1* в них есть пустые зоны до и после активной структуры, а квадраты и оси симметрии расположены по диагонали к основному направлению потока для уменьшения эффекта выделенного направления потока. Пористость и проницаемость варьировалась с помощью размеров зерен и расстояния между ними. Для одного из таких вариантов также была проварьирована ширина щели: 141; 40; 30, 123; 40; 20, 127; 30; 30, 85; 30; 3, 42; 30; 30 мкм.

Для моделирования осаждения асфальтенов в прискважинной зоне была разработана *Топология № 3* (рис. 1, в). Для получения данной топологии было произведено расчетное уплотнение виртуальной засыпки в объеме. В результате этого расчета была получена объемная модель виртуального пористого тела и одно из сечений этого тела стало прототипом данной топологии. Для получения *Топологии № 4* было произведено расчетное уплотнение виртуальной засыпки в объеме. В результате этого расчета была получена объемная модель виртуального пористого тела, и одно из сечений этого тела стало прототипом данной топологии (рис. 1, г). Данная топология имитирует горную породу для исследования задач вытеснения нефти.

Ранее было описано, что для разработки микрофлюидных чипов используется способ построения пористых тел путем векторизации растровых изображений, именно данный подход был реализован для построения *Топологий № 5–7*. *Топология № 5* была основана на векторизованном изображении суспензии наноалмазов, растрескавшейся в процессе высыхания (рис. 1, д). *Топология № 6* основана на использовании диаграммы Вороного (рис. 1, е), где ширина каналов в породе составляла 25 мкм, а в проппанте – 60 мкм. *Топология № 7* была получена на основе периодического заполнения плоскости шарами с порядком симметрии равным шести, $\varnothing$ зерен в области модельного проппанта 300 мкм, расстояние между зернами 100 мкм; $\varnothing$ зерен в области породы 50 мкм расстояние между зернами 10 мкм (рис. 1, ж). Данные топологии были разработаны для модели трещин ГРП. Важной деталью является то, что проницаемость модельной горной породы ниже проницаемости модельного проппанта, заполняющего тело самой трещины.

При разработке *Топологии № 8* за основу было взято изображение высушенной на стеклянной чашке Петри суспензии взрывных наноалмазов (рис. 1, з). При высыхании образовывалась тонкая пленка, которая растрескивалась. Отличительной

особенностью данного объекта является то, что края образующихся в процессе растрескивания чешуек не отрываются от поверхности стекла и таким образом остаются в одной фокальной плоскости, и

при фотографировании получается изображение удовлетворительной резкости с четкими краями чешуек.

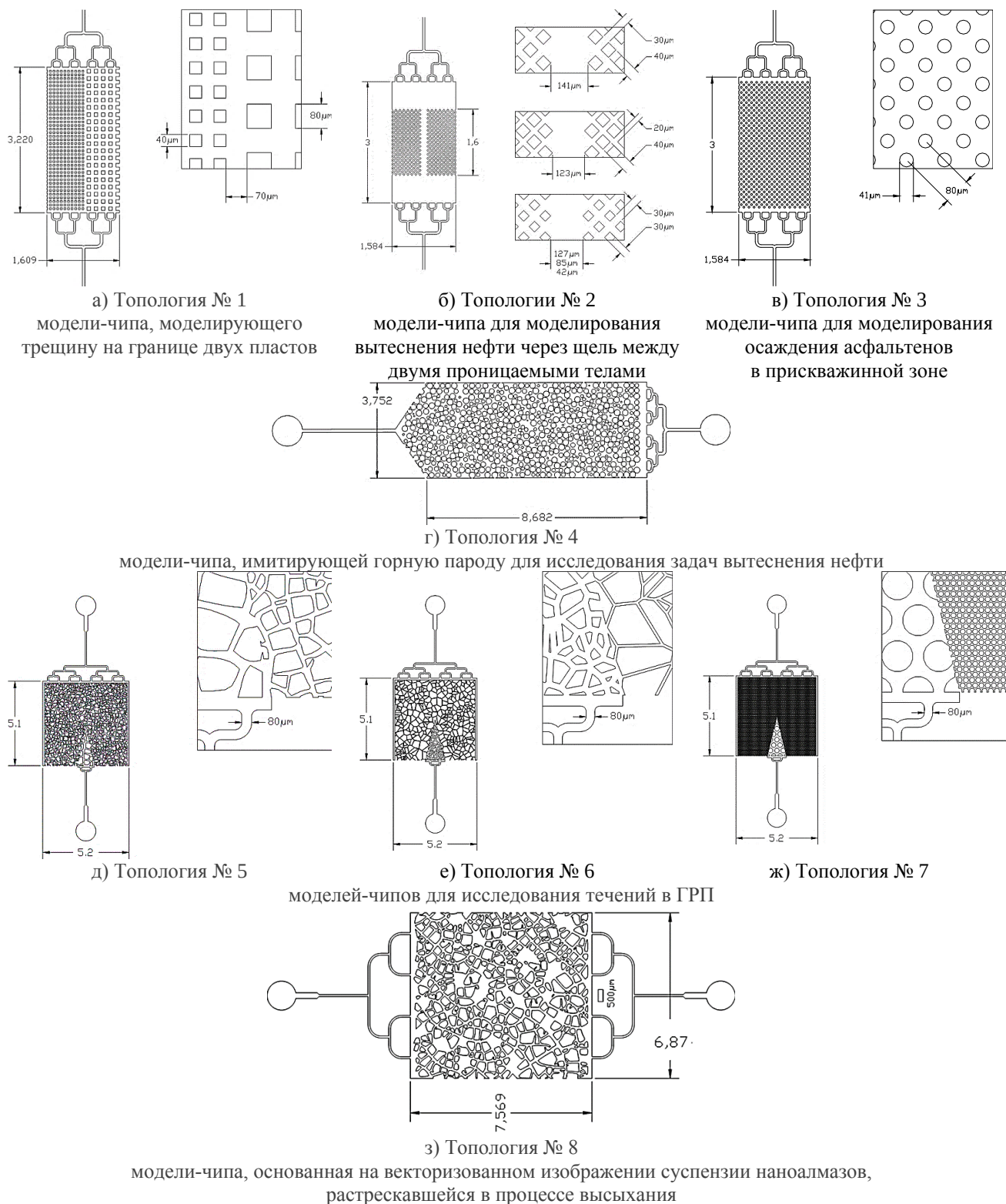


Рис. 1. Коллекция топологий микрофлюидных чипов для решения задач в нефтегазовой индустрии
Fig. 1. Collection of microfluidic chip topologies for solving problems in the oil and gas industry

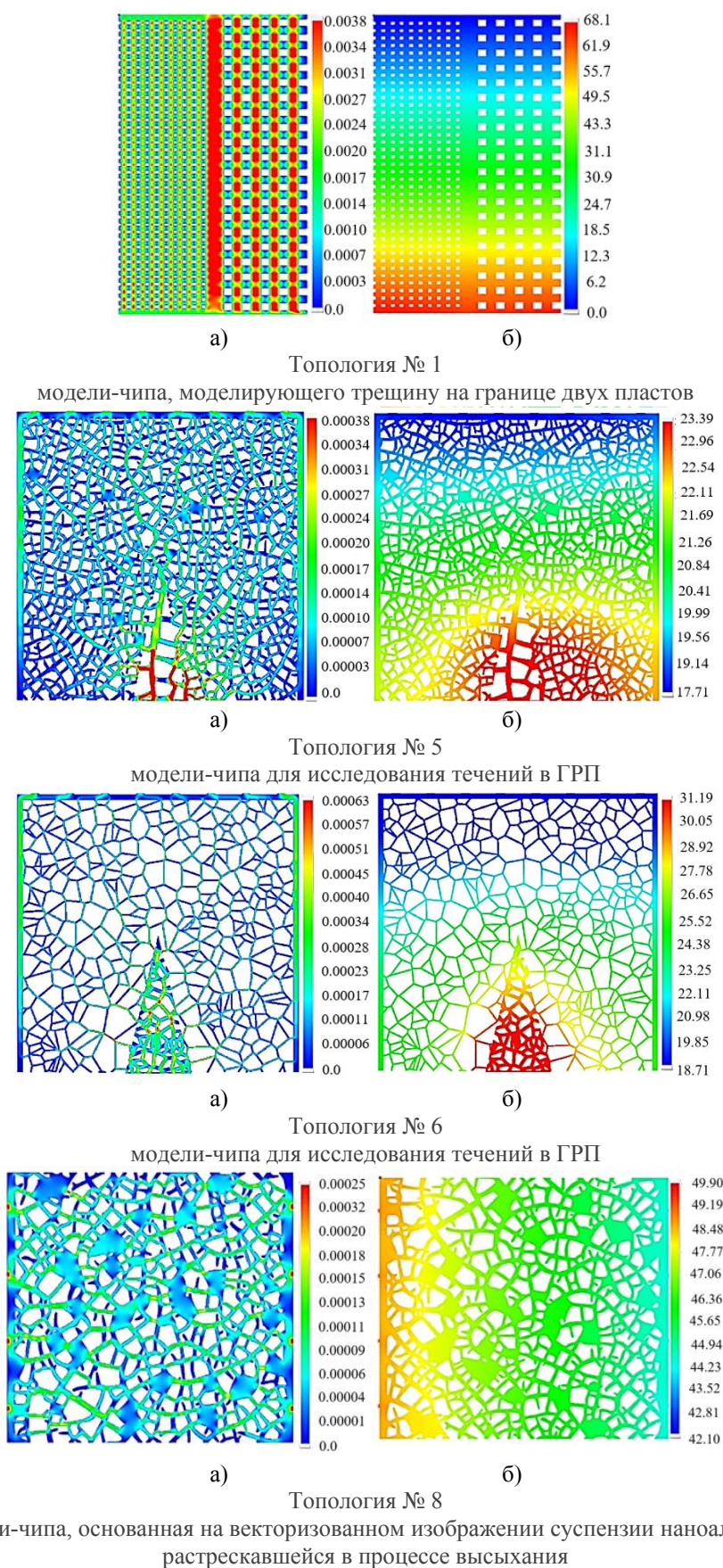


Рис. 2. Результаты численного моделирования однофазного течения в микрофлюидных чипах разной топологии
Fig. 2. Results of numerical simulation of single-phase flow in microfluidic chips of various topologies

Для разрабатываемых микрофлюидных чипов-моделей горных пород было проведено численное исследование по определению фильтрационно-емкостных свойств. С помощью моделирования была исследована структура течения в микрофлюидных чипах. Численные исследования выполнялись для воды со следующими физическими свойствами: плотность $\rho=998 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu=0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$. На входе в расчетную область задавалось значение скорости потока $v=1,25\cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. На выходе из расчетной области рассматриваются условия нулевого давления.

В ходе проведенных расчетов были доработаны топологии, определены значения проницаемости разрабатываемых микрофлюидных чипов. Далее приведены результаты расчетов для итоговых топологий некоторых моделей коллекции микрофлюидных чипов. Результаты представлены в виде полей скорости и давления (рис. 2).

По результатам проведенных численных исследований были определены фильтрационно-

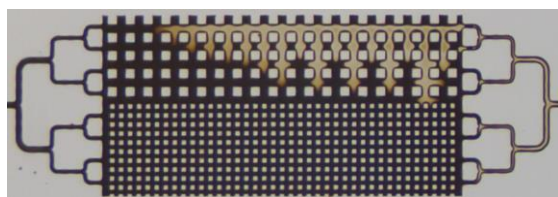
емкостные свойства разрабатываемых микрофлюидных чипов – моделей горных пород. Значения пористости и проницаемости некоторых микрофлюидных чипов приведены в таблице.

Таблица. Значения пористости и проницаемости микрофлюидных чипов

Table. Porosity and permeability values of microfluidic chips

Топология Topology	Пористость Porosity, %	Проницаемость Permeability, Д
1	82,94	61,99
2	82,94	61,99
5	44,97	287,52
6	25,79	235,75
8	31,44	209,35

На основе разработанных топологий (рис. 1) были изготовлены микрофлюидные чипы из ПДМС. На рис. 3 для примера представлены готовые чипы, заполненные нефтью и водой.



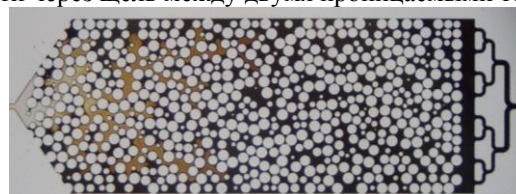
Микрофлюидный чип, моделирующий трещину на границе двух пластов



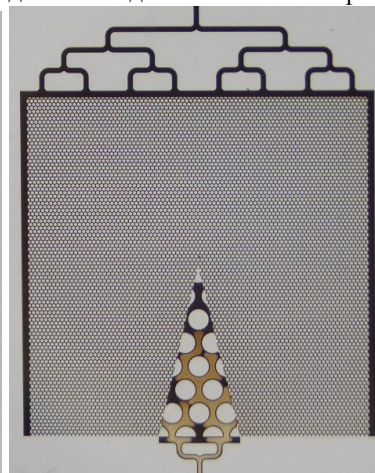
Микрофлюидный чип для моделирования осаждения асфальтенов в прискважинной зоне



Микрофлюидный чип для моделирования вытеснения нефти через щель между двумя проницаемыми телами



Микрофлюидный чип имитации горной породы для исследования задач вытеснения нефти



Микрофлюидные чипы для исследования течений в ГРП

Рис. 3. Изготовленные микрофлюидные чипы из ПДМС

Fig. 3. Fabricated microfluidic chips from polydimethylsiloxane

Заклчение

В качестве основных выводов необходимо выделить следующие:

1. Представлено описание разработки дизайн микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости для задач нефтевытеснения.
2. Созданы расчетные модели разработанных топологий микрофлюидных чипов. С помощью численного моделирования определены фильтрационно-емкостные свойства разрабатываемых микрофлюидных чипов, а также уточнены геометрические характеристики их топологий и подводящих каналов.
3. Предложены и апробированы на практике новые алгоритмы построения искусственных топологий пористых тел с изотропными и анизотропными характеристиками проницаемости, а также адаптирована методика оцифровки натуральных изображений для получения на их основе топологий микрофлюидных чипов.
4. На основе полученных топологий были изготовлены кремниевая и полимерная мастер-

формы методами фотолитографии и стереолитографии для заливки чипов из ПДМС.

5. Создана коллекция готовых к дальнейшим экспериментам микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости. Разработанные топологии рекомендовано использовать при выполнении сравнительных экспериментов для тестирования разрабатываемых математических моделей и верификации численных алгоритмов, а также для лабораторного моделирования физико-химических процессов в приквасинной зоне.

В целом микрофлюидные чипы, имитирующие горные породы, широко используются в научно-исследовательских задачах нефтегазовой индустрии. Представленная в работе методика разработки микрофлюидных чипов позволяет создать уникальные, различные по своей структуре топологии чипов, с помощью которых становится возможным изучение множества различных физико-химических процессов, понимание и изучение которых необходимо для разработки новых эффективных методов увеличения нефтеотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение микрофлюидики для оптимизации технологий разработки нефтегазовых месторождений / Д.И. Перепонов, А. Щербакова, В.В. Казаку, М.Э. Гаджиев, М.А. Тархов, Е.Д. Шилов, А.Н. Черемисин // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2023. – Т. 5. – № 1. – С. 57–73. DOI: 10.54859/kjogi108639.
2. Стулов П.А., Егоров А.А., Гавриленко Т.В. Современные технологии создания модели порового пространства горных пород // Вестник кибернетики. – 2019. – № 1. – С. 47–54.
3. Application of microfluidics in chemical oil recovery: a review / Mahmoud Fani, Peyman Pourafshari, Peyman Mostaghimi, Nader Mosawat // Fuel. – 2022. – Vol. 315.
4. Review of microfluidic devices and imaging techniques for studying fluid flow in porous geomaterials / A. Jahanbakhsh, Ch.L. Włodarczyk, D.P. Hand, R.R.J. Mayer, M.M. Maroto-Valer // Sensors. – 2020. – Vol. 20 – P. 20–14.
5. A microfluidic approach to water-rock interactions using thin rock sections: Pb and U sorption on thin sections of shale and granite / Young Soo Oh, Ho Young Jo, Ji-Hun Ryu, Geon-Young Kim // Hazardous Materials Log. – 2017. – Vol. 324. – P. 373–381.
6. Jerry Joseph, Naga Shiva Kumar Gunda, Sushanta K. Mitra. Porous media on chip: porosity and permeability measurements // Chemical-technological science. – 2013. – Vol. 99. – P. 274–283.
7. Massimani A. Methodology, validation, etc. Design, fabrication and experimental validation of microfluidic devices for studying pore phenomena in underground gas storage systems // Micromachines (Basel). – 2023. – Vol. 14. – № 2. – P. 2–14.
8. Songqi Li, Yuetian Liu et al. Experimental study on the pore mechanism for improving displacement efficiency by low salinity water flooding using reservoir on a chip // ASU Omega. – 2021. – Vol. 6. – Т. 32. – P. 20984–20991.
9. 2D microfluidic devices for studying pore phenomena: a review / A. Massimiani, F. Panini, S.L. Marasso, M. Cocuzza, M. Quaglio, C.F. Pirri, F. Verga, D. Viberti // MDPI. Water. – 2023. – Vol. 15. – № 6. – P. 2–19.
10. Filimonov S., Pryazhnikov M., Pryazhnikov A. Network modeling of two-phase flows in a microfluidic chip // E3S Conference Network. – 2023. – Vol. 397. – P. 01007.
11. Olaywola Saheed, Dejam M. A comprehensive review of low salinity nanoparticle interactions with surfactants for enhanced oil recovery in sandstone and carbonate reservoirs // Fuel. – 2019. – Vol. 241 – P. 1045–1507.
12. Fabrication and application of microfluidic devices: a review / A.-G. Niculescu, C. Kirkov, A.C. Birca, A.M. Grumezescu // Int J Mol Sci. – 2021. – Vol. 22. – № 4. – P. 1045–1057.
13. Conn S.A. et al. Visualization of oil displacement by foam in a microfluidic device with permeability contrast // Laboratory on a chip. – 2014. – Vol. 14. – № 20. – P. 3968–3977.
14. Kelly S.A., Torres-Verdin K., Balhoff M.T. From surface to substrate: two-scale micro/nanofluidic networks for studying transport anomalies in dense porous media // Laboratory on a chip. – 2016. – Vol. 16. – P. 2829–2839.
15. Mark D., Heberle S., Roth G. Microfluidic «labs on a chip»: requirements, characteristics and applications // Chemical Society Reviews. – 2010. – Vol. 39 – P. 1153–1182.
16. Pagan Pagan N.M. et al. Physico-chemical characterization of asphaltenes using microfluidic analysis // Chemical Reviews. – 2022. – Vol. 122. – № 7. – P. 7205–7235.
17. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs / Z.X. Xu, S.Y. Li, B.F. Li et al // Pet Sci. – 2020. – Vol. 17. – № 4. – P. 990–1013. DOI: 10.1007/s12182-020-00467-5.
18. Petrostep ME-2. Flowback aid. URL: https://www.stepan.com/content/dam/stepan-dot-com/webdam/website-product-documents/literature/oilfield/Copy-of-Copy-of-ME-2_Final.pdf (дата обращения 15.05.2024).

19. Perdignes F. Lab-on-PCB and flow driving: a critical review // *Micromachines* (Basel). – 2021 Feb 10. – Vol. 12 (2):175. DOI: 10.3390/mi12020175
20. Lab-on-PCB review for biomedical applications / W. Zhao, S. Tian, L. Huang, K. Liu, L. Dong // *Electrophoresis*. – 2020. – Vol. 41. – P. 1433–1445.
21. Применение микрофлюидики для оптимизации технологий разработки нефтегазовых месторождений / Д.И. Препонов, А. Щербакова, В.В. Казаку, М.Э. Гаджиев, М.А. Тархов, Е.Д. Шилов, А.Н. Черемисин // *Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана*. – 2023. – № 1. – С. 57–73.
22. Low-Cost Accessible Fabrication Methods for Microfluidics Research in Low-Resource Settings / Hoang-Tuan Nguyen, Ha Thach, Emmanuel Roy et al. // *Micromachines*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–10. DOI: 10.3390/mi9090461.
23. Ríos Á., Zougagh M., Avila M. Miniaturization through lab-on-a-chip: Utopia or reality for routine laboratories. A review // *Analytica Chimica Acta*. – 2012. – Vol. 740. – P. 1–11.
24. Lab-on-a-chip devices: how to close and plug the lab / Y. Temiz, R.D. Lovchik, G.V. Kaigala, E. Delamarche // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – Vol. 132. – P. 156–175. DOI: 10.1016/j.mee.2014.10.013.
25. Особенности формирования микроструктур с высоким аспектным соотношением при изготовлении полимерных микрофлюидных чипов для исследования единичных живых клеток in vitro / А.С. Букатин, И.С. Мухин, Е.И. Малышев, И.В. Кухтевич, А.А. Евстапов, М.В. Дубина // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86. – № 10. – С. 125–130.
26. Research of replication accuracy in some elastomer materials with different Young's modulus / N.N. Germash, N.A. Esikova, P.K. Afonicheva, A.A. Evstrapov // *International Conference PhysicA*. – St Petersburg, 18–22 October 2021. – Vol. 2103. – № 012054. – P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012054.
27. Микрофлюидные чипы из полиметилметакрилата: метод лазерной абляции и термического связывания / А.А. Евстапов, Т.А. Лукашенко, С.Г. Горный, К.В. Юдин // *Научное приборостроение*. – 2005. – Т. 15. – № 2. – С. 72–81.
28. Свободно распространяемый программный комплекс SIGMA_FW для моделирования гидродинамики и теплообмена / А.А. Дектерев, К.Ю. Литвинцев, А.А. Гаврилов, Е.Б. Харламов, С.А. Филимонов // *Журнал Сибирского федерального университета*. – 2017. – Т. 10. – № 4. – С. 534–542.
29. Минаков А.В., Лобасов А.С., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 481–488.
30. Micro-LIF and numerical investigation of mixing in microchannel / Minakov A.V., Yagodnitsina A.A., Lobasov A.S., Rudyak V.Y., Bilsky A.V. // *Журнал СВУ*, серия: техника и технологии. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 15–27.
31. Рудяк В.Я., Минаков А.В. Современные проблемы микро- и нанофлюидики. – Новосибирск: Наука, 2016. – 296 с.
32. Плазменная камера для активации поверхности микрофлюидных чипов и их последующей герметизации: пат. № 2814689, Российская федерация, С1; заявл. 06.10.2023, опублик. 04.03.2024. Бюл. № 7. – 11 с.

Информация об авторах

Антон Сергеевич Якимов, младший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. asyakimov@gmail.com; <https://orcid.org/000-0003-4919-9877>

Виктория Дмитриевна Мешкова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Vredel@sfu-kras.ru

Дмитрий Викторович Гузей, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. gudimas@yandex.ru

Андрей Иванович Пряжников, младший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. arrivent@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6124-037X>

Андрей Викторович Минаков, доктор физико-математических наук, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. tov-andrey@yandex.ru

Поступила в редакцию: 13.06.2024

Поступила после рецензирования: 05.09.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Pereponov D.I., Shcherbakova A., Kazaku V.V., Gadzhiev M.E., Tarkhov M.A., Shilov E.D., Cheremisin A.N. Application of microfluidics to optimize oil and gas field development technologies. *Bulletin of the oil and gas industry of Kazakhstan*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 57–73. (In Russ.) DOI: 10.54859/kjogi108639.
2. Stulov P.A., Egorov A.A., Gavrilenko T.V. Modern technologies for creating models of rock pore space. *Bulletin of cybernetics*, 2019, vol. 1, no. 33, pp. 47–54. (In Russ.)
3. Mahmoud Fani, Peyman Pourafshari, Peyman Mostaghimi, Nader Mosawat. Application of microfluidics in chemical oil recovery: a review. *Fuel*, 2022, vol. 315, pp. 1–10.
4. Jahanbakhsh A., Wlodarczyk Ch.L., Hand D.P., Mayer R.R.J., Maroto-Valer M.M. A review of microfluidic devices and imaging techniques for studying fluid flow in porous geomaterials. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 14, pp. 20–14.

5. Young Soo Oh, Ho Young Jo, Ji-Hun Ryu, Geon-Young Kim. A microfluidic approach to water-rock interactions using thin rock sections: Pb and U sorption on thin sections of shale and granite. *Hazardous Materials Log*, 2017, vol. 324, pp. 373–381.
6. Jerry Joseph, Naga Shiva Kumar Gunda, Sushanta K. Mitra. Porous media on chip: porosity and permeability measurements. *Chemical-technological science*, 2013, vol. 99, pp. 274–283.
7. Massimani A. Methodology, validation, etc. Design, fabrication and experimental validation of microfluidic devices for studying pore phenomena in underground gas storage systems. *Micromachines (Basel)*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 2–14.
8. Songqi Li, Yuetian Liu. Experimental study on the pore mechanism for improving displacement efficiency by low salinity water flooding using reservoir on a chip. *ASU Omega*, 2021, vol. 6, no. 32, pp. 20984–20991.
9. Massimani A., Panini F., Marasso S.L. 2D microfluidic devices for studying pore phenomena: a review. *MDPI. Water*, 2023, vol. 15, no. 6, 1222.
10. Filimonov S., Pryazhnikov M., Pryazhnikov A. Network modeling of two-phase flows in a microfluidic chip. *E3S Conference Network*, 2023, vol. 397, 01007.
11. Olaywola Saheed, Dejam M. A comprehensive review of low salinity nanoparticle interactions with surfactants for enhanced oil recovery in sandstone and carbonate reservoirs. *Fuel*, 2019, vol. 241, pp. 1045–1507.
12. Niculescu A.-G., Kirkov C., Birca A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and application of microfluidic devices: a review. *Int J Mol Sci*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 2–26.
13. Conn S.A. Visualization of oil displacement by foam in a microfluidic device with permeability contrast. *Laboratory on a chip*, 2014, vol. 14, pp. 3968–3977.
14. Kelly S.A., Torres-Verdin K., Balhoff M.T. From surface to substrate: two-scale micro/nanofluidic networks for studying transport anomalies in dense porous media. *Laboratory on a chip*, 2016, vol. 16, no. 15, pp. 2829–2839.
15. Mark D., Heberle S., Roth G. Microfluidic “labs on a chip”: requirements, characteristics and applications. *Chemical Society Reviews*, 2010, vol. 39, pp. 1153–1182.
16. Nataira M. Pagan Pagan. Physico-chemical characterization of asphaltenes using microfluidic analysis. *Chemical Reviews*, 2022, vol. 122, no. 7, pp. 7205–7235.
17. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs. *Pet Sci.*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 990–1013. DOI: 10.1007/s12182-020-00467-5.
18. *Petrostep ME-2. Flowback aid*. Available at: https://www.stepan.com/content/dam/stepan-dot-com/webdam/website-product-documents/literature/oilfield/Copy-of-Copy-of-ME-2_Final.pdf. Accessed 12/10/2023 (accessed 15 May 2024).
19. Perdignes F. Lab-on-PCB and flow driving: a critical review. *Micromachines (Basel)*, 2021 Feb 10, vol. 12(2):175. DOI: 10.3390/mi12020175
20. Zhao W., Tian S., Huang L., Liu K., Dong L. Lab-on-PCB review for biomedical applications. *Electrophoresis*, 2020, vol. 41, pp. 1433–1445.
21. Preponov D.I., Shcherbakova A., Kazaku V.V., Gadzhiev M.E., Tarkhov M.A., Shilov E.D., Cheremisin A.N. Application of microfluidics for optimization of oil and gas field development technologies. *Bulletin of the oil and gas industry of Kazakhstan*, 2023, vol. 1, pp. 57–73. (In Russ.)
22. Hoang-Tuan Nguyen, Ha Thach, Emmanuel Roy. Low-cost accessible fabrication methods for microfluidics research in low-resource settings. *Micromachines*, 2018, vol. 9, pp. 1–10. DOI: 10.3390/mi9090461.
23. Ríos Á., Zougagh M., Avila M. Miniaturization through lab-on-a-chip: Utopia or reality for routine laboratories. A review. *Analytica Chimica Acta*, 2012, vol. 740, pp. 1–11.
24. Temiz Y., Lovchik R.D., Kaigala G.V., Delamarche E. Lab-on-a-chip devices: how to close and plug the lab. *Microelectronic Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 156–175.
25. Bukatin A.S., Mukhin I.S., Malyshev E.I., Kukhtevich I.V., Evstrapov A.A., Dubina M.V. Features of the formation of microstructures with a high aspect ratio in the manufacture of polymer microfluidic chips for the study of single living cells in vitro. *Journal of Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 10, pp. 125–130. (In Russ.)
26. Germash N.N., Esikova N.A., Afonicheva P.K., Evstrapov A.A. Research of replication accuracy in some elastomer materials with different Young’s modulus. *International Conference Physica*. Saint Petersburg, Russia, 18–22 October 2021. Vol. 2103, no. 012054, pp. 1–7.
27. Evstrapov A.A., Lukashenko T.A., Gorny S.G., Yudin K.V. Microfluidic chips made of polymethyl methacrylate: laser ablation and thermal bonding method. *Scientific Instrument-making*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 72–81. (In Russ.)
28. Dekterev A.A., Litvinsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Filimonov S.A. Freely distributed software package SIGMA_FW for modeling hydrodynamics and heat transfer. *Journal of the Siberian Federal University*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 534–542. (In Russ.)
29. Minakov A.V., Lobasov A.S., Dekterev A.A. Modeling of hydrodynamics and convective heat transfer in microchannels. *Computational mechanics of continuous media*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 481–488. (In Russ.)
30. Minakov A.V., Yagodnitsina A.A., Lobasov A.S., Rudyak V.Y., Bilsky A.V. Micro-LIF and numerical investigation of mixing in microchannel. *Journal SFU, series: equipment and technology*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 15–27.
31. Rudyak V.Ya., Minakov A.V. *Modern problems of micro- and nanofluidics*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2016. 296 p. (In Russ.)
32. Yakimov A. *Plasma chamber for activation of the surface of microfluidic chips and their subsequent sealing*. Patent RF no. 2814689, 2024. (In Russ.)

Information about the authors

Anton S. Yakimov, Junior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. asyakimov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4919-9877>.

Victoria D. Meshkova, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. Vredel@sfu-kras.ru

Dmitry V. Guzey, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. gudimas@yandex.ru

Andrey I. Pryazhnikov, Junior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. arrivent@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6124-037X>

Andrey V. Minakov, Dr. Sc., Director of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. tov-andrey@yandex.ru

Received: 13.06.2024

Revised: 05.09.2024

Accepted: 02.04.2025