

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: XURPYG

УДК 67.02

**Application of Additive Technologies  
for the Development  
of Microfluidic Chip Models of Rocks**

**Kirill A. Lukyanenko<sup>a</sup>,  
Andrey I. Pryazhnikov<sup>a</sup>, Dmitriy V. Guzei<sup>a,b</sup>,  
Vladimir A. Zhigarev<sup>a\*</sup> and Andrey V. Minakov<sup>a,b</sup>**

*<sup>a</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS*

*Novosibirsk, Russian Federation*

Received 10.07.2024, received in revised form 01.08.2024, accepted 10.08.2024

**Abstract.** The article presents the results of work on testing the possibility of using modern and affordable additive technologies based on a photopolymer printer for the manufacture of prototypes of microfluidic devices suitable for solving problems in the oil and gas industry. Two methods for creating microfluidic devices using additive technologies have been studied. The first one is the production of a master mold for subsequent casting of PDMS in it, the second is the production of a microfluidic chip with fully three-dimensional channels. A technique has been developed for creating a master mold with channels of the required geometry for pouring PDMS from a photocurable polymer using stereolithographic printing. This technique was successfully tested for the production of a microfluidic chip with channels with a minimum width of 100  $\mu\text{m}$ . A microfluidic chip with a three-dimensional channel structure was designed and fabricated. It was shown that by printing a master mold for subsequent casting of PDMS in it, it is possible to produce microfluidic chips with a channel width of 100  $\mu\text{m}$  and a height of 50  $\mu\text{m}$ . Such devices can find their application in modeling processes of oil displacement from solid rocks.

**Keywords:** microfluidic chip, master molds, additive technologies, process modeling, three-dimensional channels.

**Acknowledgements.** The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23–79–30022, <https://rscf.ru/project/23–79–30022/>

Citation: Lukyanenko K. A., Pryazhnikov A. I., Guzei D. V., Zhigarev V. A., Minakov A. V. Application of additive technologies for the development of microfluidic chip models of rocks. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(5), 550–564. EDN: XURPYG



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [VZhigarev@sfu-kras.ru](mailto:VZhigarev@sfu-kras.ru)

## Применение аддитивных технологий для разработки микрофлюидных чипов-моделей горных пород

К. А. Лукьяненко<sup>а</sup>, А. И. Пряжников<sup>а</sup>,  
Д. В. Гузей<sup>а, б</sup>, В. А. Жигарев<sup>а</sup>, А. В. Минаков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Российская Федерация, Новосибирск

**Аннотация.** В статье представлены результаты работы по апробации возможности применения современных и доступных аддитивных технологий на основе фотополимерного принтера для изготовления прототипов микрофлюидных устройств, пригодных для решения задач нефтегазовой индустрии. Исследовано два способа создания микрофлюидных устройств с помощью аддитивных технологий. Первый – изготовление мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС, второй – изготовление микрофлюидного чипа с полностью трехмерными каналами. Отработана методика создания мастер-формы с каналами необходимой геометрии для заливки ПДМС из фотоотверждаемого полимера методом стереолитографической печати. Данная методика была успешно протестирована на изготовлении микрофлюидного чипа с каналами минимальной ширины 100 мкм. Был спроектирован и изготовлен микрофлюидный чип с трехмерной структурой каналов. Показано, что с помощью печати мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС возможно изготавливать микрофлюидные чипы с шириной канала 100 мкм при высоте 50 мкм. Такие устройства могут найти своё применение при моделировании процессов нефтевытеснения из твёрдых горных пород.

**Ключевые слова:** микрофлюидный чип, мастер-формы, аддитивные технологии, моделирование процессов, трёхмерные каналы.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23–79–30022, [https://rscf.ru/project/23–79–30022/](https://rscf.ru/project/23-79-30022/)

Цитирование: Лукьяненко К.А. Применение аддитивных технологий для разработки микрофлюидных чипов-моделей горных пород / К. А. Лукьяненко, А. И. Пряжников, Д. В. Гузей, В. А. Жигарев, А. В. Минаков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(5). С. 550–564. EDN: XURPYG

### 1. Введение

В настоящее время одним из методов оценки эффективности применения различных вытесняющих агентов является лабораторный метод для определения коэффициента вытеснения. Определение коэффициента вытеснения нефти водой является обязательным этапом при подсчёте извлекаемых запасов, технико-экономическом обосновании коэффициента извлечения нефти и осуществлении контроля разработки месторождений. Для оценки коэффициента вытеснения необходимо проведение лабораторных экспериментов с использованием образцов керна и пластовых флюидов в условиях, моделирующих естественное залегание продуктивных пластов [1]. Для определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях используется оборудование для заводнения образцов керна горных пород, которое даёт информацию о кинетике и количестве извлечённой нефти. Несмотря на то что данный метод является стандартным, у него существует ряд проблем, связанных с тем, что для проведения таких исследований необходимо прокачивать через образцы существенные объёмы флюидов

с определённой скоростью для поддержания требуемого режима течения жидкости в поровом пространстве. В связи с этим на каждое исследование затрачивается достаточно много времени. Кроме того, отсутствует возможность визуального контроля движения фронта жидкости в системе пор из-за непрозрачной природы горных пород, что ведёт к тому, что эксперименты не выявляют ответственных механизмов нефтеотдачи и не обладают достаточной воспроизводимостью за счёт неоднородности образцов горной породы. Микромоделли пористой среды (микрочипы, имитирующие горные породы) стали активно использоваться для визуализации поведения многофазных потоков в микромасштабе, а именно для изучения методов увеличения нефтеотдачи, в задачах нефтяной отрасли [2–4]. Для понимания механизма извлечения нефти из отдельных пор горной породы, течения многофазных жидкостей, образования эмульсий в процессе фильтрации воды через поры, заполненной нефтью, стали активно применять микромоделли пористой среды [5, 6]. В отличие от стандартного метода исследования по заводнению образца керна горной породы, применение микрофлюидного оборудования возможно в сочетании с комплексом фото- и видеофиксации за счёт оптической прозрачности микрочипов. Такой подход позволяет получать как статические, так и динамические данные по визуализации вытеснения нефти из модели пористой породы. Данная особенность микрофлюидного оборудования ведёт к развитию и совершенствованию аналитических методов по определению коэффициента вытеснения нефти как в пределах одного структурного элемента (поры), так и в системе пор и трещин. Характерный размер каналов такой системы в микрофлюидных чипах при существующих технологиях изготовления составляет от нескольких единиц до сотен микрон. Подобные модели микрофлюидных чипов стали широко использовать в исследованиях по разработке и подбору оптимального состава вытесняющих жидкостей, применяемых в качестве третичных методов увеличения нефтеотдачи при заводнении пласта. Кроме этого, на микрофлюидных чипах проводятся эксперименты по изучению относительных фазовых проницаемостей, определению зависимости влияния состава нефти, свойств пластовых флюидов и капиллярных сил на процесс извлечения нефти из пористой среды, а также решение проблемы закупорки твёрдыми отложениями прискваженной зоны нефтяного коллектора [7–9]. В связи с тем, что для изготовления микрофлюидных чипов применяются разные методы формирования пористой структуры как упорядоченной, так и произвольной сложной формы, при изготовлении чипов из натуральных материалов горных пород, таких как размельчённая горная порода, шлифы керна материала, возможно моделирование в таких чипах процессов обработки пласта различными кислотными составами [10].

Применение аддитивных технологий для изготовления микрофлюидных чипов в последнее время привлекает большое внимание в научном сообществе [11, 12], в том числе и в нефтегазовой индустрии [13, 14]. Основными преимуществами аддитивных технологий (FDM, LCD, SLA, DLP) перед фотолитографией при производстве микрофлюидных чипов являются возможность получать трехмерные дизайны, минимальные трудозатраты при необходимости скорректировать дизайн каналов чипа, а также возможность организации производства больших партий изделий. К недостаткам такой технологии можно отнести меньшую разрешающую способность по сравнению с фотолитографией. Типичный размер внутренних микроструктур в каналах при использовании коммерческих принтеров и смол обычно составляет  $>200$  мкм, однако при использовании специально разработанных для экспериментов проецирующих

устройств и специально изготовленных смол этот размер может достигать и 10 мкм [12]. Кроме того, перспективным является намечающийся тренд по совмещению технологии 3D-печати с другими более традиционными способами изготовления чипов, позволяющий получать гибридные устройства, которые используют преимущества сразу нескольких типов технологий [15, 16].

В данной работе была апробирована возможность применимости современных и доступных аддитивных технологий на основе LCD 3D-принтера для изготовления прототипов микрофлюидных устройств, пригодных для решения задач нефтегазовой индустрии. Для этого было исследовано два способа создания микрофлюидных устройств с помощью аддитивных технологий. Первый – изготовление мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС, второй – изготовление чипа с полностью трёхмерными каналами.

## 2. Описание методики изготовления микрофлюидных чипов

С помощью аддитивных технологий было изготовлено две топологии микрофлюидных чипов. Первая топология представляла собой набор трехмерных полостей, последовательно связанных между собой микроканалами различной ширины (рис. 1). Эта топология призвана моделировать кавернозно-трещиноватую структуру горной породы и в дальнейшем будет использована нами для тестирования разрабатываемого расчетного алгоритма. Для ее изготовления был использован первый способ изготовления микрофлюидного чипа – печать мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС. Данная методика изготовления во многом основана на принципах, предложенных в работе [17].

Дизайн каналов микрофлюидного чипа (рис. 1а) был спроектирован в программе Компас 3D (Аскон, Россия). Процесс изготовления чипа разделялся на четыре этапа: 1) фотополимерная печать мастер-формы с каналами необходимой геометрии, 2) обработка поверхности мастер-формы, 3) заполнение мастер-формы силиконовым компаундом и его отверждение, 4) герметизация микрофлюидного чипа.

Мастер-форму (рис. 1б) изготавливали на фотополимерном принтере Sonic Mini 8K (Phrozen, Тайвань). Данный принтер для засветки фотополимера использует LCD-экран на основе светодиодов с длиной волны излучения 405 нм с плотностью точек на дюйм равным 1152, что составляет размер одного пикселя 22 мкм. В работе использовали смолу TR 250LV High Temp Resin (Phrozen, Тайвань), печать осуществляли со следующими параметрами: высота слоя – 50 мкм, время засветки полимера – 2,5 с, время отдыха после опускания платформы – 5 с. После завершения печати мастер-форму промывали 10 мин в изопропиловом спирте (Одунчик, Россия) для удаления остатков незасветленной смолы. После этого проводили дозасветку мастер-формы для того, чтобы модель набрала полную прочность. Для этого мастер-форму помещали под УФ-лампу ОУФБ-04 (Солнышко, Россия) на 10 мин.

Чип изготавливали из полидиметилсилоксана – ПДМС Sylgard 184 (Dow Corning, США). Для этого двухкомпонентный ПДМС смешивали в пропорции 2:1 по массе, тщательно перемешивали и заполняли мастер-форму. Далее проводили в течение 10 мин дегазацию ПДМС в мастер-форме, которую помещали в изолированный сосуд с подключенным вакуумным насосом Edwards RV5 (Edwards, США). После этого мастер-форму выдерживали 4 часа при 80 °С в сушильном шкафу (Memmert, Германия) для отверждения ПДМС.

Для герметизации микрофлюидного чипа сперва вырезали нужную область из затвердевшего в мастер-форме ПДМС. Далее поверхность чипа модифицировалась с помощью плазменной активации в оригинальной установке для плазменной обработки чипов [18]. Для этого чип из ПДМС и предметное стекло обрабатывались в плазме в течение 120 с для образования на поверхности силанольных групп. После чего обработанные поверхности прикладывались друг к другу так, чтобы произошло адгезионное слипание. Далее чип выдерживался в течение 15 мин при температуре 125 °С в сушильном шкафу для катализа образования силоксановых связей между молекулами ПДМС и стекла. Процесс изготовления микрофлюидного чипа представлен на рис. 1.

В результате было показано, что с помощью печати мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС возможно изготавливать микрофлюидные чипы с шириной канала 100 мкм при высоте 50 мкм. Причём за счёт дальнейшей оптимизации параметров печати или применения других смол потенциально возможно изготовление и более тонких каналов шириной вплоть до 50 мкм на основе печати мастер-форм. При этом было отмечено, что тонкие структуры меньше 500 мкм шириной могут иметь погрешность около 13 % в сторону увеличения ширины после печати, а более крупные элементы размером от 500 мкм имеют размеры в соответствии с размерами модели. Вопрос о максимальном разрешении внутренних структур в таких каналах (пассивные перемешиватели, ловушки, клапаны и пр.) требует дополнительного исследования.

Кроме того, при изготовлении микрофлюидных моделей горных пород большой интерес представляет создание топологий порового пространства с трёхмерной структурой. Для решения данной задачи была опробована технология 3D-фотополимерной печати, а именно разработан дизайн и изготовлен микрофлюидный чип с трёхмерной структурой каналов для моделирования процессов нефтевытеснения.

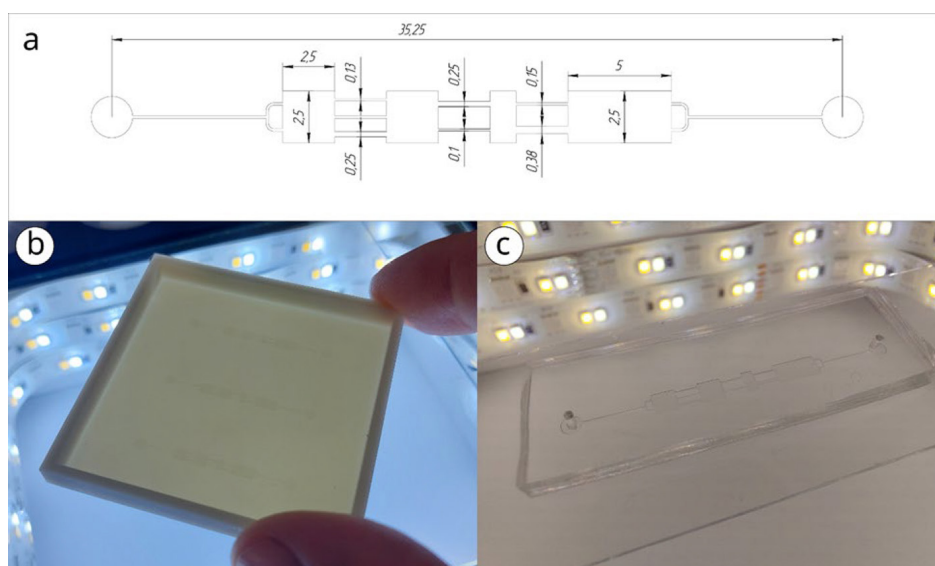


Рис. 1. Чертеж (а), мастер-форма (b) и готовый образец (с) разработанного микрофлюидного чипа  
Fig. 1. Drawing (a), master mold (b) and finished sample (c) of the developed microfluidic chip

Модель чипа (рис. 2с) была спроектирована в программе Компас 3D (Аскон, Россия). Печать производили на фотополимерном принтере Sonic Mini 8K (Phrozen, Тайвань). Поскольку в данной работе была важна светопроницаемость материала, использовали прозрачную смолу Water-Wash Resin+ (Anycubic, Китай). Печать осуществляли со следующими параметрами: высота слоя – 50 мкм, время засветки полимера – 6 с, время отдыха после опускания платформы – 5 с. После завершения печати остатки смолы промывали водой. Для промывки каналов использовали воду, набранную в шприц. После этого чип просушивали сжатым воздухом из компрессора АС-450–100–OFS (Кратон, Россия) и проводили дозасветку чипа, помещая его под УФ-лампу ОУФБ-04 (Солнышко, Россия) на 10 мин с верхней и нижней сторон.

Изготовленный микрофлюидный чип (рис. 2d) обладал тремя уровнями каналов (верхним, средним и нижним) с расстоянием по высоте 1 мм между уровнями (рис. 2b). Верхний и нижний каналы были отдалены от стенки по высоте также на 1 мм. Поток проникал через средний уровень, затем расходился на все три уровня, вновь соединяясь в среднем уровне перед выходом из чипа.

Одной из выявленных в ходе работы особенностей было помутнение поверхности чипа после печати. Возможно, это было связано с тем, что чип печатался под углом  $45^\circ$  по отношению к плоскости платформы, в результате чего на поверхности формировалась ступенька из слоёв, которые искажали ход световых лучей. Для устранения этого эффекта проводили последовательное мокрое шлифование лицевой и задней поверхностей микрофлюидного чипа с помощью шлифовальной бумаги (БАЗ, Россия) различной степени зернистости: P80, P400, P800, P1500 и P2500. Результаты шлифовки представлены на рис. 3.

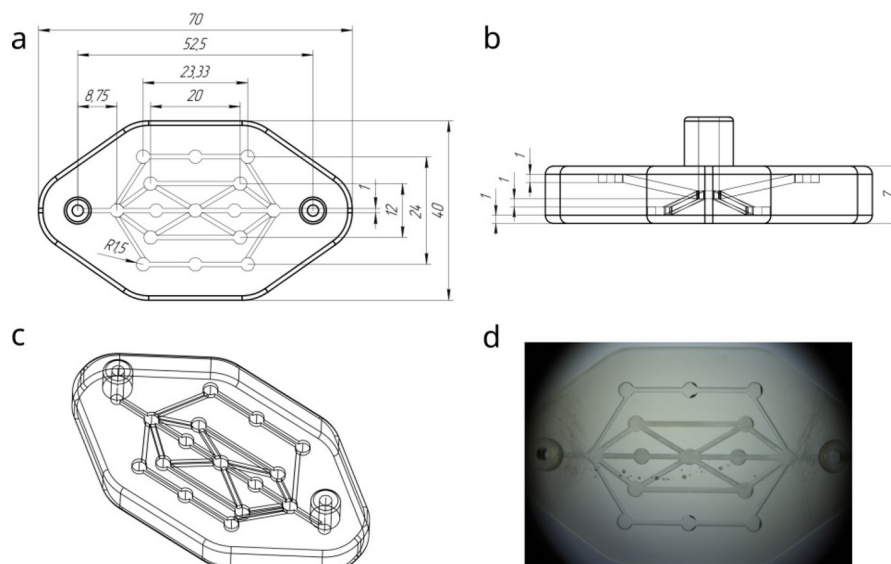


Рис. 2. Микрофлюидный чип с трехмерными каналами, расположенными на разной высоте: чертёж (а), вид каналов сбоку (b), изометрический вид модели (с), фотография изготовленного чипа (d)

Fig. 2. Microfluidic chip with three-dimensional channels located at different heights: drawing (a), side view of the channels (b), isometric view of the model (c), photograph of the fabricated chip (d)

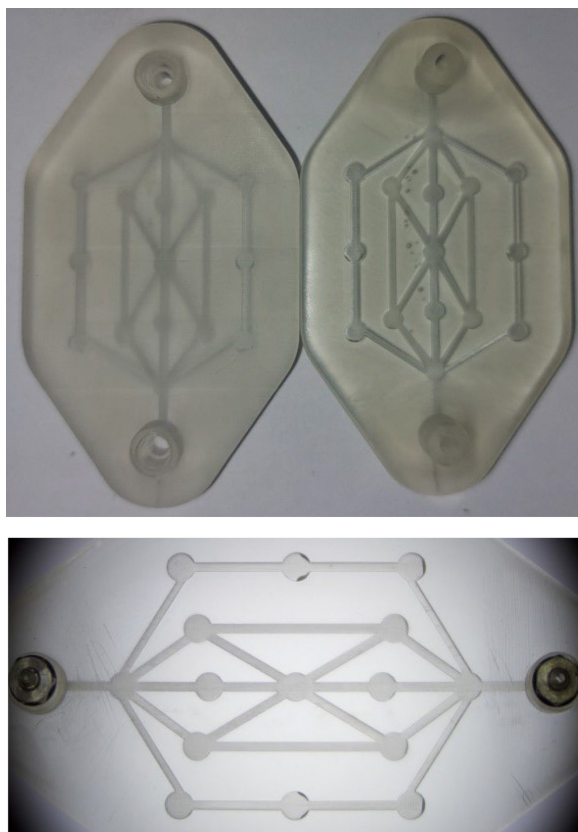


Рис. 3. Фотография микрофлюидных чипов с трёхмерными каналами. Верхнее изображение: слева – до обработки поверхности, справа – после обработки поверхности методом мокрого шлифования. Нижнее изображение: отшлифованный чип, размещённый на предметном столике микроскопа

Fig. 3. Photograph of microfluidic chips with 3D channels. Top image: left – before surface treatment, right – after surface treatment by wet grinding. Bottom image: A ground chip placed on a microscope stage

В результате было показано, что использование смолы Water-Wash Resin+ в сочетании с доступным фотополимерным LCD 3D-принтером позволяет создавать микрофлюидные чипы с трёхмерными каналами квадратным сечением вплоть до 1 мм. Такой размер каналов уже может быть использован для моделирования различных параметров нефтевытеснения.

Таким образом, в ходе работы была проведена оценка применимости доступных аддитивных технологий для изготовления прототипов микрофлюидных устройств, пригодных для решения задач нефтегазовой индустрии. Было показано, что в случае необходимости создания достаточно тонких каналов <500 мкм необходимо использовать способ печати мастер-формы для последующей отливки микрофлюидного чипа из ПДМС. Изготовление трёхмерных моделей устройств в таком случае также возможно, если проводить склеивание между собой нескольких слоёв ПДМС из разных мастер-форм. Печать трёхмерных каналов с использованием прозрачной смолы Water-Wash Resin+ показала свою эффективность вплоть до размеров канала 1 мм, что в то же время значительно превышает заявляемое разрешение используемого 3D-принтера в 22 мкм на пиксель. В связи с этим требуется проведение дальнейших исследова-

ний как по подбору более подходящей смолы, так и дальнейшей оптимизации параметров печати. Тем не менее приведённые в данной работе материалы и параметры их печати могут найти своё применение при решении задач нефтывытеснения, экспериментального подтверждения результатов численных расчётов потоков в микрофлюидных чипах, моделирования структуры кернов и нефтеносных пластов.

### 3. Описание методики проведения микрофлюидных экспериментов для апробации изготовленных чипов

Для экспериментальной апробации изготовленных микрофлюидных чипов проведено исследование режимов течения подкрашенной воды в изготовленных микрофлюидных чипах. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Управление потоком вытесняющей жидкости осуществлялось с помощью шприцевого насоса SPLab02 (SPLab, Китай), погрешность  $\pm 0,5\%$ , максимальная продольная сила 10 кгс, объем инфузии на микрошаг 0,078 мкл, скорость продольного движения от 5 мкм/мин до 132 мм/мин. Использовался шприц Hamilton объёмом 1 мл с LT (Luer Tip) – соединение типа Луер, с эталонным расходом от 0,083 мкл/мин до 2,203 мл/мин.

Датчик расхода и микрофлюидный чип были соединены трубкой PTFE 1/16" OD, микрофлюидный чип располагался горизонтально на предметном стекле. Использовался сенсор расхода MFS 4, работающий в диапазоне от 0,03 до 1000 мкл/мин с точностью  $\pm 5\%$  от измеряемой величины, общий внутренний объём 25 мкл, время отклика сенсора до 70 мс. Все данные с датчика записывались и считывались с помощью «Модуля считывания», который позволяет контролировать до 4 датчиков одновременно.

Для проведения эксперимента по визуализации течения с краской использовались следующие красители: метил оранжевый и синие чернила на водной основе, эти красители в пробирке фалькон 50 мл показаны на рис. 5.

Вначале была проведена серия экспериментов с подкрашенной водой для визуализации течения в микрочипе, имитирующем трещиновато-кавернозную структуру горных пород. Были рассмотрены три расхода жидкости: 5 мкл/мин, 50 мкл/мин и 200 мкл/мин. В начальный

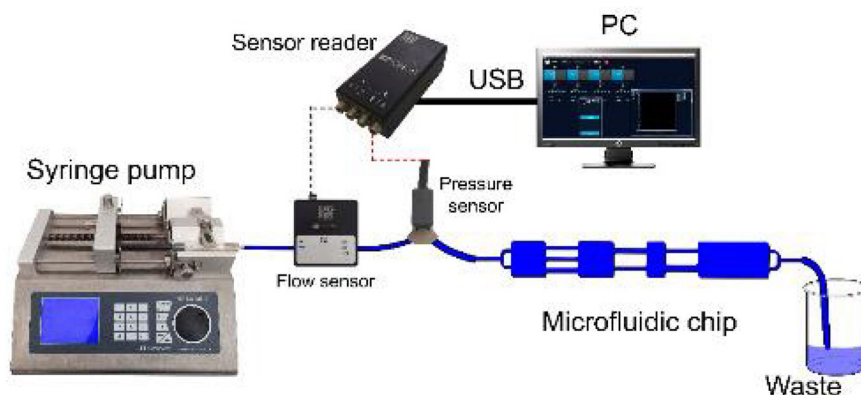


Рис. 4. Схема экспериментальной микрофлюидной установки

Fig. 4. Scheme of the experimental microfluidic setup





Рис. 5. Фотографии красителей в пробирке

Fig. 5. Photos of dyes in a test tube

момент времени чип был полностью заполнен оранжевой краской. Далее на вход с заданным значением расхода подавалась подкрашенная синим цветом вода. На рис. 6–8 показана в динамике концентрация краски в микрочипе для рассмотренных значений расхода. Как видно, распределение концентрации краски в процессе заполнения существенно зависит от значения расхода. Фактически рассматривается диффузионно-конвективное течение, характеристики, перемешивания которого определяются значением диффузионного числа Пекле. Диффузионное число Пекле определяется как  $Pe = Ud/D$ , где  $U$  – среднерасходная скорость на входе,  $d$  – гидравлический диаметр канала,  $D$  – коэффициент диффузии. Другим важным параметром, характеризующим течение, является число Рейнольдса  $Re = \rho Ud/\mu$ , где  $\rho$ ,  $\mu$  – плотность и вязкость. В рассмотренном диапазоне расходов значения чисел Рейнольдса и Пекле варьировались следующим образом:  $Re = 0.75–30$ ,  $Pe = 1900–76000$ . В работах [19,20] было показано, что интенсивность перемешивания для безвихревого течения не зависит от числа  $Re$ , а определяется значением числа  $Pe$ . Было показано, что с увеличением числа Пекле эффективность перемешивания снижается. Это хорошо подтверждается данными, приведёнными на рис. 6–8. Как видно, при малых значениях расхода синяя краска равномерно заполняет микрофлюидный чип. Визуально граница раздела между двумя цветами практически отсутствует. Перемешивание идёт преимущественно в диффузионном режиме. На рис. 6 видно, как плавно меняется цвет от жёлтого к синему. При этом по всему чипу в процессе вытеснения наблюдается практически однородный цвет от входа и до выхода. Весь процесс смены одного цвета на другой занял примерно 690 с.

С увеличением числа Пекле картина смешения меняется. На рис. 8 мы наблюдаем преимущественно конвективный режим смешения. При этом хорошо видна структура течения в самом чипе. Поток из полости в полость движется по наиболее широким каналам, имеющим минимальное гидродинамическое сопротивление. При расходе 50 мкл/мин на 11-й секунде начинают появляться очертания синей краски, видно, как подкрашенная вода идёт по широким каналам, проходя большие области между ними. Время, которое понадобилось для смены цвета от оранжевого до синего, составило около 45 с, а для расхода 200 мкл/мин – примерно 15 с.

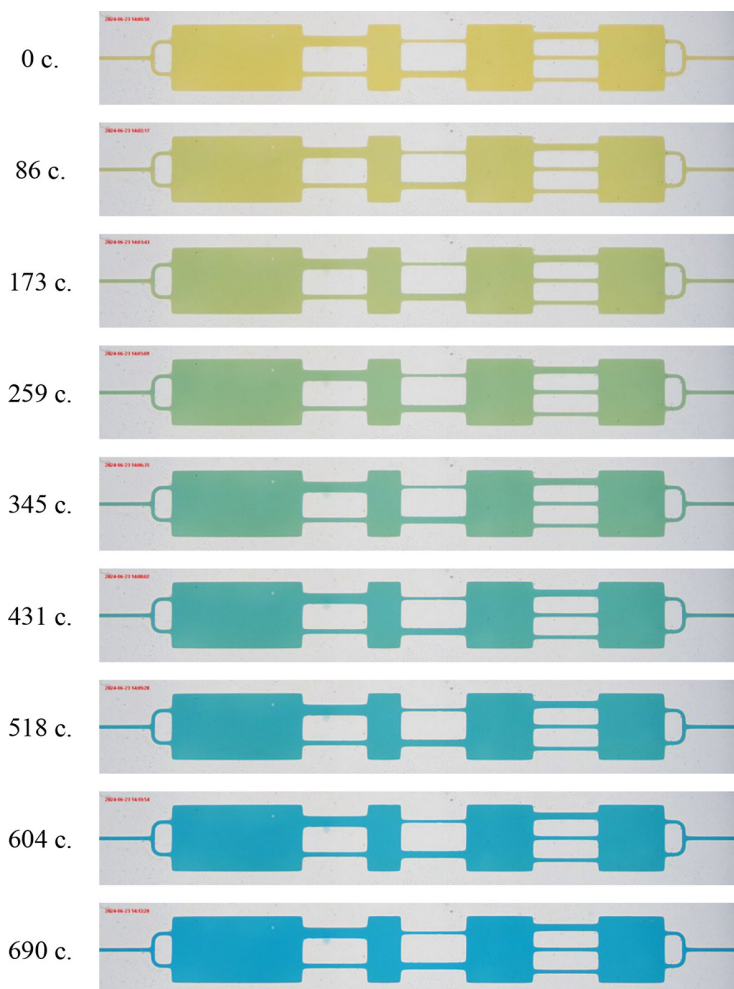


Рис. 6. Фотографии картины течения при расходе 5 мкл/мин

Fig. 6. Photographs of the flow pattern at a flow rate of 5  $\mu\text{l}/\text{min}$ 

Можно оценить характерные времена для данной задачи. Так, характерное время перемешивания будет определяться коэффициентом диффузии жидкости  $D$  и по порядку величин составлять  $\tau_m \sim d^2/D$ . При этом если канал, в котором происходит смешение, имеет длину  $L$ , то время пребывания жидкости в нем будет порядка  $\tau_L \sim L/U$ . Эффективность перемешивания в этом случае определяется соотношением этих двух времён:

$$\frac{\tau_m}{\tau_L} \sim \frac{d^2 U}{DL} \sim \frac{d}{L} Pe \quad (1)$$

Поэтому с увеличением числа Пекле, несмотря на то, что общее время перемешивания уменьшается, отношение времени перемешивания ко времени пребывания жидкости в канале увеличивается. Это говорит о падении эффективности смешения и хорошо подтверждается данными на рис. 6–8.

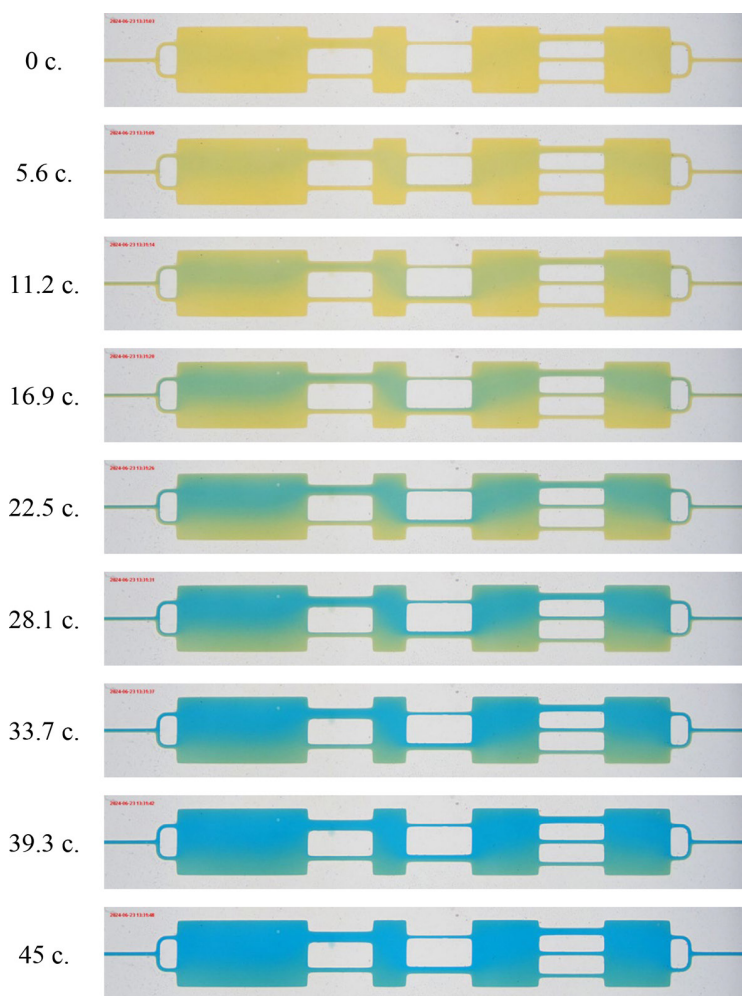


Рис. 7. Фотографии картины течения при расходе 50 мкл/мин

Fig. 7. Photographs of the flow pattern at a flow rate of 50  $\mu\text{l}/\text{min}$

Далее аналогичная визуализация течения была выполнена для чипа, моделирующего трёхмерную сеть микроканалов. Постановка эксперимента здесь была аналогичная. Вначале микрофлюидный чип полностью заполнялся краской одного цвета, потом с помощью шприцевого насоса SPLab осуществлялась подача краски другого цвета. Записывалось видео процесса перемешивания. На рис. 9 для примера проиллюстрирован процесс смешения краски для расхода жидкости 1 мкл/мин. Здесь синяя краска подаётся справа. Различие в цветовой палитре с результатами визуализации для предыдущего микрочипа и различия с цветами исходных красителей в большом объёме (рис. 5) являются особенностью микрофлюидной визуализации. Толщина канала в предыдущем чипе составляла 40 мкм, при такой толщине слоя цвета краски отличаются от их цвета в большом объёме.

Выполненный анализ структуры потока в рассматриваемом микрочипе показал, что краска вначале распространяется по центральным каналам чипа. Далее с течением времени краска

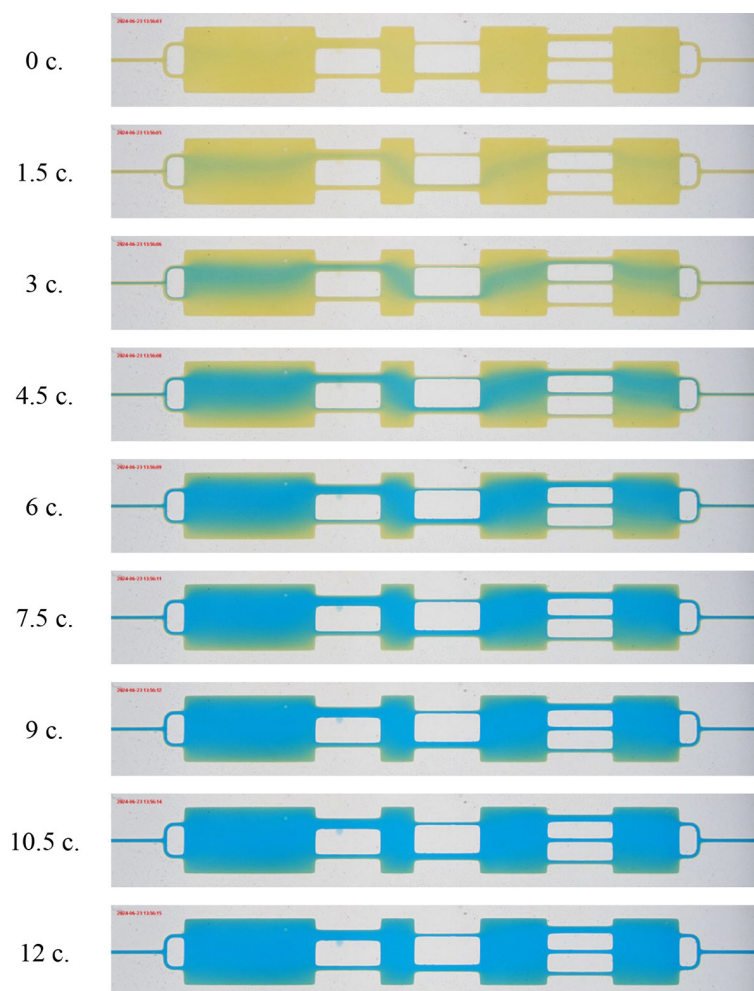


Рис. 8. Фотографии картины течения при расходе 200 мкл/мин

Fig. 8. Photographs of the flow pattern at a flow rate of 200  $\mu\text{l}/\text{min}$

начинает заполнять периферийные каналы. Таким образом, все микроканалы в трёхмерном микрочипе, изготовленном методом фотополимерной печати, являются проточными.

#### 4. Заключение

Проведены работы по апробации возможности применения современных и доступных аддитивных технологий на основе фотополимерного принтера с LCD-экраном для изготовления прототипов микрофлюидных устройств, пригодных для решения задач нефтегазовой индустрии. Для этого было исследовано два способа создания микрофлюидных устройств с помощью аддитивных технологий. Первый – изготовление мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС, второй – изготовление микрофлюидного чипа с полностью трёхмерными каналами. В рамках первой задачи была отработана методика создания мастер-формы с каналами необходимой геометрии для заливки ПДМС из фотоотверждаемого полимера методом

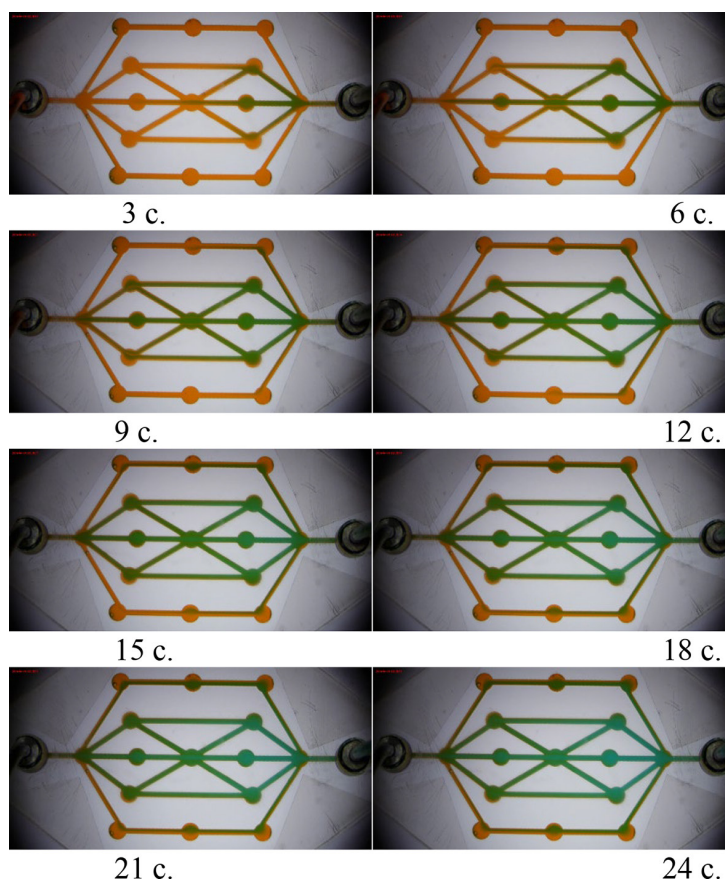


Рис. 9. Фотографии процесса смешения в различные моменты времени

Fig. 9. Photos of the mixing process at various points in time

стереолитографической печати. Данная методика была успешно протестирована на изготовлении микрофлюидного чипа с каналами минимальной ширины 100 мкм. В рамках второй задачи был спроектирован и изготовлен микрофлюидный чип с трёхмерной структурой каналов. В результате было показано, что с помощью печати мастер-формы для последующей отливки в ней ПДМС возможно изготавливать микрофлюидные чипы с шириной канала 100 мкм при высоте 50 мкм. Причём за счёт дальнейшей оптимизации параметров печати или применения других смол потенциально возможно изготовление и более тонких каналов шириной вплоть до 50 мкм на основе печати мастер-форм. Такие устройства могут найти своё применение при моделировании процессов нефтевытеснения из твёрдых горных пород.

#### Список литературы / References

[1] Гладких Е.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И., Попов Н.А. Способ оценки коэффициента вытеснения нефти на основе стандартных исследований керна, *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 2017, 16(3), 225–237 [Gladkikh E. A., Khizhnyak G. P., Galkin V. I., Popov N. A. A method for estimating the oil displacement coefficient based on standard core studies, *Vestnik PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2017, 16(3), 225–237 (in Rus.)].

- [2] Lifton V. Microfluidics an enabling screening technology for enhanced oil recovery (EOR), *Lab Chip*, 2016, 16, 1–43.
- [3] Bazazi P., Sanati-Nezhad A., Hejazi S.H. Role of chemical additives on water-based heavy oil mobilization: A microfluidic approach *Fuel*, 2019, 241, 1195–1202.
- [4] Yang Y.Q., Sanati Nezhad A., Hejazi S.H. Geo-material surface modification of microchips using layer-by-layer (LbL) assembly for subsurface energy and environmental applications, *Lab Chip*, 2016, 18(2), 285–295.
- [5] Saadat M., Yang J., Dudek M., Øye G., Tsai P.A. Microfluidic investigation of enhanced oil recovery: The effect of aqueous floods and network wettability, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, 203, 108647.
- [6] Fuwei Y., Hanqiao J., Xu F., Zhen F., Hang S., Li J. New insights into flow physics in the EOR process based on 2.5D reservoir, micromodels, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, 181, 106214.
- [7] Das A., Mohanty K., Nguyen Q. A pore-scale study of foam-microemulsion interaction during low tension gas flooding using micro- fluidics – Tertiary recovery, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, 203, 108569.
- [8] Elyaderani S.M.G., Jafari A. Microfluidics experimental study in porous media applied for nanosilica/alkalineflooding, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, 173, 1289–1303.
- [9] Lin Y.J., He P., Tavakkoli M., Mathew N., Yap Y.F., Chai J.C., Goharzadeh A., Vargas F.M., Biswal S.L Examining asphaltene solubility on deposition in model porous media, *Langmuir*, 2016, 32(34), 8729–8734.
- [10] Martyushev D.A., Vinogradov J. Development and application of a double action acidic emulsion for improved oil well performance: laboratory tests and field trials, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2021, 612, 125998.
- [11] Au A., Huynh W., Horowitz L. F., Folch A. 3D printed microfluidics, *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 2020, 13, 3460–3467.
- [12] Su R., Wang F., McAlpine M. C. 3D printed microfluidics: advances in strategies, integration, and applications, *Lab Chip*, 2023, 23(5), 1279–1299.
- [13] Kataoka É.M., Murer R.C., Santos J.M., Carvalho R.M., Eberlin M.N., Augusto F., Poppi R.J., Gobbi A.L., Hantao L.W. 3D-printed microfluidic systems for sample preparation of petroleum, *Anal. Chem.*, 2017, 89(6), 3460–3467.
- [14] Mousavi S. M., Sadeghnejad S., Ostadhassan M. Evaluation of 3D printed microfluidic networks to study fluid flow in rocks, *Oil & Gas Science and Technology –Rev. IFP Energies nouvelles*, 2021, 76(4), 50.
- [15] Behroodi E., Latifi H., Bagheri Z., Ermis E., Roshani S., Moghaddam M. S. A combined 3D printing/CNC micro-milling method to fabricate a large-scale microfluidic device with the small size 3D architectures: an application for tumor spheroid production, *Sci. Rep.*, 2020, 10(2), 22171.
- [16] Carrell C., McCord C., Wydallis R.M., Henry C.S Sealing 3D-printed parts to poly (dimethylsiloxane) for simple fabrication of microfluidic devices, *Anal. Chim. Acta*, 2020, 1124, 78–84.
- [17] Otroshchenko A., Zyuzin M. V. A simple and accessible approach for processing photopolymer master molds for the fabrication of microfluidic polydimethylsiloxane devices, *Phys. Fluids*, 2022, 34(11), 112015.
- [18] Якимов АС, Пряжников АН, Пряжников МН, Скоробогатова АД, Лукьяненко КА; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». Плазменная камера для активации поверхности

микрофлюидных чипов и их последующей герметизации. Патент № 2814689 РФ, H05H1/24 C 23C 16/44 H01J37/32. № 99126135/14; Заявл.06.10.23; Оpubл. 04.03.24, Бюл.№ 7 [Yakimov AS, Pryazhnikov AN, Pryazhnikov MN, Skorobogatova AD, Lukyanenko KA; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Siberian Federal University”. Plasma chamber for activating the surface of microfluidic chips and their subsequent sealing. Patent No. 2814689 RF, H05H1/24 C 23C 16/44 H01J37/32. No. 99126135/14; Application 06.10.23; Publ. 04.03.24, Bulletin No. 7 (in Rus.)].

[19] Minakov A.V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A.A On optimization of mixing process of liquids in microchannels, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2010, 3(2), 146–156.

[20] Минаков А.В., Рудяк В.Я., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Смешение в микромиксере Т-типа при умеренных числах Рейнольдса, *Теплофизика и аэромеханика*, 2012, 19(5), 577–587 [Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. Mixing in a T-type micromixer at moderate Reynolds numbers, *Thermophys. Aeromech.*, 2012, 19(5), 577–587 (in Rus.)].