ISSN 2712-8008
Том / Volume 26 №1 2026
Домашняя страница журнала: https://ered.pstu.ru/index.php/geo
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.276
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2026

Применение аддитивных технологий при создании аналогов образцов горных пород

Ю.С. Щербакова[1], А.А. Щербаков[1], Дан Ма[2], Лиюань Юй[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)
[2]Китайский университет горного дела и технологий (Китайская Народная Республика, 221116, г. Сюйчжоу, Даксью Роуд, 1)

The use of additive technologies in the creation of rock samples analogues

Iuliia S. Shcherbakova[1], Aleksandr A. Shcherbakov[1], Dan Ma[2], Liyuan Yu[2]

[1]Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)
[2]China University of Mining and Technology (1 Daxue Road, Xuzhou, 221116, China)

Получена / Received: 01.08.2025. Принята / Accepted: 08.12.2025. Опубликована / Published: 12.01.2026

Ключевые слова:
аддитивные технологии, аддитивное производство, 3D-печать, 3DP-модели, SLA-печать, керн, цифровой керн, микро-КТ-сканирование, проницаемость, смачиваемость, геомеханика, исследования керна, фильтрационные исследования керна, сеть трещин, шероховатость, фотоотверждаемые смолы, микромодель, цифровое моделирование.

Горные породы по своей природе неоднородны. Два образца горных пород с идентичными объемными свойствами могут сильно различаться по микроструктуре. Пространственная изменчивость и неоднородность коллекторов обуславливают необходимость приобретения дорогостоящих кернов из разных мест. Лабораторные эксперименты на образцах горных пород предназначены для понимания и характеристики геологических особенностей, количественной оценки потенциальной добычи и настройки моделей потока жидкости в пористых средах. Эти эксперименты являются механически и петрофизически разрушительными и не могут быть повторены или расширены на одном и том же керне. Создание копий образцов керна с помощью инновационной технологии 3D-печати снижает стоимость получения образцов горных пород и обеспечивает повторяемость и расширение экспериментов. 3D-принтеры позволяют многократно создавать геометрию пустотного пространства горных пород как фактических распределений (например, КТ-изображений или фотографий обнажений), так и любых типов геометрических моделей (например, геометрической сети или стохастической неоднородности петрофизических свойств). В данной статье выполнен обзор аддитивных технологий в области создания реплик образцов горных пород, получивших наиболее широкое освещение в международной практике на текущий момент. Создание и использование таких 3DP-моделей открывает новые возможности для исследований всевозможных явлений, наблюдаемых при фильтрации флюидов в пористой среде, сетях трещин, в том числе на микроуровне. Полученные результаты проведенных на сегодняшний день комплексных исследований показывают, что 3D-печатные копии образцов горных пород имеют уверенный потенциал, чтобы стать точными, недорогими и адаптируемыми образцами для лабораторных исследований в нефтегазовом секторе.

Keywords:
additive technologies, additive manufacturing, 3D printing, 3DP models, SLA printing, core, digital core, micro-CT scanning, permeability, wettability, geomechanics, core studies, core filtration studies, fracture network, roughness, photo-curable resins, micromodel, digital modeling.

Rocks are inherently heterogeneous. Two rock samples with identical bulk properties can have significantly different microstructures. Spatial variability and heterogeneity of reservoirs necessitate the acquisition of expensive cores from multiple locations. Laboratory experiments on rock samples are designed to understand and characterize geological features, quantify potential production, and fine-tune fluid flow models in porous media. These experiments are mechanically and petrophysically destructive and cannot be repeated or expanded on the same core. Creating replicas of core samples using innovative 3D printing technology reduces the cost of obtaining rock samples and enables repeatability and scalability of experiments. 3D printers enable the repeated creation of rock void geometry, both actual distributions (e.g., CT images or outcrop photographs) and any type of geometric model (e.g., a geometric network or stochastic heterogeneity of petrophysical properties). This article provides an overview of additive technologies for creating rock specimen replicas, which have received the most extensive international coverage to date. The creation and use of such 3D printed models opens up new possibilities for studying various phenomena observed during fluid flow in porous media and fracture networks, including at the microscale. The results of comprehensive studies conducted to date demonstrate that 3D printed rock specimen replicas have the potential to become accurate, inexpensive, and adaptable samples for laboratory research in the oil and gas sector.

Щербакова Юлия Станиславовна (Author ID in Scopus: 59403959300), e-mail: shch-yu7@yandex.ru.
Щербаков Александр Анатольевич (Author ID in Scopus: 55531112100, ORCID: 0000-0001-6502-970X), e-mail: aashherbakov@pstu.ru. Контактное лицо для переписки.
Дан Ма (Author ID in Scopus: 35339693700, ORCID: 0000-0002-3347-2026) – PhD, e-mail: dan.ma@cumt.edu.cn.
Лиюань Юй (Author ID in Scopus: 35724771100, ORCID: 0000-0002-8973-7476) – PhD, e-mail: yuliyuan@cumt.edu.cn.

Iuliia S. Shcherbakova (Author ID in Scopus: 59403959300), e-mail: shch-yu7@yandex.ru.
Aleksandr A. Shcherbakov (Author ID in Scopus: 55531112100, ORCID: 0000-0001-6502-970X), e-mail: aashherbakov@pstu.ru. The contact person for correspondence.
Dan Ma (Author ID in Scopus: 35339693700, ORCID: 0000-0002-3347-2026) – PhD, e-mail: dan.ma@cumt.edu.cn.
Liyuan Yu (Author ID in Scopus: 35724771100, ORCID: 0000-0002-8973-7476) – PhD, e-mail: yuliyuan@cumt.edu.cn.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Применение аддитивных технологий при создании аналогов образцов горных пород / Ю.С. Щербакова, А.А. Щербаков, Дан Ма, Лиюань Юй // Недропользование. – 2026. – Т.26, №1. – С. 76–8. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.8

Please cite this article in English as:
Shcherbakova Iu.S., Shcherbakov A.A., Dan Ma, Liyuan Yu. The use of additive technologies in the creation of rock samples analogues. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2026, vol.26, no.1, pp. 76-84. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.8

Введение

Неоднородность минералогического состава горных пород нефтегазовых месторождений является причиной многочисленных неопределенностей на всех этапах – от оценки запасов и проектирования разработки до выбора оптимальных технологий добычи, что создает существенные экономические и технологические риски. Количество полученных кернов для лабораторных экспериментов определяет надежность геологической и фильтрационной моделей месторождения и, как следствие, уверенность в выбранной стратегии управления активом. Исходный керновый материал, в свою очередь, дорого стоит, всегда ограничен в объеме и ценен, а лабораторные эксперименты по изучению потока флюидов и геомеханические эксперименты разрушают эти образцы и изменяют их свойства [1]. Для расширения или повторения экспериментов исследователям требуется использовать другие керны [2; 3]. Однако различные керны, даже если они получены из одной и той же скважины и пласта, всегда будут иметь различный минералогический состав и конфигурацию поровой сети, а экспериментальные результаты, полученные из разных кернов, всегда будут отличаться [4]. В таких условиях становится непросто подтвердить теорию и разработать общие модели.

Появление современной 3D-печати предоставило беспрецедентную возможность объединить сильные стороны цифровой и экспериментальной физики горных пород. Использование 3D-печати для копирования образцов горных пород устраняет вышеперечисленные недостатки. Тиражирование образцов керна с помощью инновационной технологии 3D-печати позволяет снизить их стоимость, обеспечить повторяемость и расширение экспериментов, так, например, в исследовании [5] было изготовлено 550 образцов для испытаний на прочность. Создание множества 3DP-моделей с идентичной структурой порового пространства позволяет протестировать интересующую математическую модель неограниченное количество раз и оценить влияние всех возможных граничных условий на конечный результат. Данный подход заполнит обычные пробелы между моделированием и лабораторными экспериментами, так как позволяет использовать идентичные образцы как для моделирования, так и для эксперимента.

На сегодняшний день основные направления исследований с использованием 3D-реплик горных пород сформированы вокруг развития самих аддитивных технологий и решения практических задач нефтегазовой геологии, а именно валидации и калибровки цифровых моделей, исследования петрофизических параметров, многофазного потока жидкости, моделирования трещиноватости.

Целью данной статьи является проведение системного анализа возможностей и ограничений современных методов 3D-печати образцов горных пород и оценка потенциала аддитивных технологий в изготовлении достоверных лабораторных моделей горных пород для применения в физическом моделировании фильтрационных процессов.

Далее в работе выполнен обзор технологий и материалов 3D-печати образцов горных пород, получивших наиболее широкое освещение в мировой практике на сегодняшний день, а также рассмотрен алгоритм печати 3D-модели керна. Сформулированы актуальные ограничения и возможности аддитивных технологий, которые отмечаются по результатам анализа изученного опыта. Отдельно рассмотрены предпочтительность технологий для решения конкретных типов задач, возможности микромасштабного моделирования с использованием технологии μ-SL и перспективы 3D-моделирования сетей трещин. В заключительной части сформулированы выводы, оценивающие достигнутый уровень в моделировании свойств пород методом 3D-печати, и определены перспективы развития аддитивных технологий для создания аналогов образцов горных пород.

Методы 3D-печати реплик горных пород

В стандарте ГОСТ Р 57558-2025 (ISO/ASTM 52900:2021) перечислены семь признанных категорий процессов аддитивного производства: струйное нанесение связующего (binder jetting, BJT), прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition, DED), экструзия материала (material extrusion, MEX), струйное нанесение материала (material jetting, MJT), синтез на подложке (powder bed fusion, PBF), листовая ламинация (sheet lamination, SHL) и фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization, VPP) (табл. 1).

Материалы для аддитивного производства классифицируют на две фундаментальные категории по типу сырья: органические (полимерные смолы и пластики) и неорганические (кварцевый песок, гипс, цемент, керамика).

В процессе создания 3DP-модели керна выделяют три основных этапа: проектирование модели, печать и постобработку.

Проектирование модели. На этапе проектирования цифровая 3D-модель керна может быть создана на основе данных реального керна, собранных с помощью микро-КТ сканирования, разработана в программе автоматизированного проектирования (САПР) либо составлена комбинированным способом.

Процесс создания цифровых 3D-моделей керна по данным КТ-сканирования природных кернов начинается с компьютерной томографии реального образца. Полученное изображение представляет собой трехмерный блок вокселей (3D-пикселей), представляющих уровни серого, полученные из затухания рентгеновского излучения и напрямую связанные с плотностью горной породы. Далее выполняется сегментация вокселей на два класса: поры и твердый объем, подлежащий 3D-печати. Точность сегментации определяет качество и сходство реплики с исходными образцами керна. Сегментация представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Выбор метода сегментации зависит от сложности 3D-изображения с точки зрения распределения уровней серого, и для исключения ошибок, связанных с ручной сегментацией, предлагается использование автоматических подходов [6; 7] и алгоритмов машинного обучения [8]. Результатом сегментации является трехмерное бинарное изображение, обозначающее положения пор и твердой фазы в сканированном образце.

Разработка в программе автоматизированного проектирования (САПР) позволяет создавать любые типы моделей, например, стохастической неоднородности петрофизических свойств, геометрической сети трещин, сгенерированной различными способами [7; 9; 10], или синтетических поверхностей трещин [7].

Комбинированный способ подразумевает следующие варианты подготовки изображения для 3D-печати:

1. Выделение репрезентативного элементарного объема, когда из полной 3D-модели керна извлекается ограниченный, но статистически представительный фрагмент, который будет использован в качестве основы для синтетической реплики.

Таблица 1

Категории процессов аддитивного производства

Технология	Органические (полимерные смолы и пластики: АБС-пластик (ABS) и полилактид (PLA))	Неорганические (кварцевый песок, гипс, цемент, керамика)
Струйное нанесение связующего (BJT)		v
Прямой подвод энергии и материала (DED)		v
Синтез на подложке (PBF)		v
Экструзия материала (MEX)	v	v
Струйное нанесение материала (MJT)	v	
Листовая ламинация (SHL)	v	
Фотополимеризация в ванне (VPP)	v	

Таблица 2

Обзор технологий 3D-печати керна

Технология	Источник энергии	3D-принтер (фирма)	Литературный источник	Вертикальное разрешение печати, мкм
Binder Jet Ttechnology (BTJ)	Струйная печать связующим веществом	Projet-460 Plus (3D Systems)	[13]	150
		Projet 660 (3D Systems)	[8; 17]	от 100
		M-Flex (ExONE)	[17–21]	100, 250
		VX1000 (Voxeljet Technology GmbH)	[22]	300
		ZPrinter 450 (3D Systems)	[2]	87
Stereolithographic (SLA)	Фотополимеризация	Form1 + (Formlabs)	[12]	25
		Form 2 (Formlabs)	[6; 7; 15; 17; 24]	25–100
		NanoArch S130 (BMF)	[26]	5-20
		Objet500 Connex3 (Stratasys)	[9]	16
		–	[11; 25]	2, 10, 14
PolyJet method		J750 (Stratasys)	[16]	100
multijet modeling (MJM)		ProJet HD 3000 Plus (3D Systems)	[12; 26]	16
Multijet printing (MJP)		ProJet MJP 3600 (3D Systems)	[6]	100
SLC (DED)	Селективное лазерное спекание	HRPS-VI (Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co)	[22]	100
Fused Deposition Modeling (FDM)	Экструзия	3D Touch (3D Systems)	[27]	125–500
		Prusa 13 (iPrint Technologies)	[17]	50–200
		Stratasys	[17]	от 127
		Ultimaker 2 +	[28]	100–200
Fused Filament Fabrication (FFF)		Ultimaker	[17]	20–200

2. Обработка двумерных изображений реальных образцов [11].

3. Ввод в имеющуюся цифровую модель-основу искусственных поровых каналов [12] с помощью программных методов.

4. Искусственное включение трещин внутри естественных образцов керна сложно либо невозможно. Точное введение синтетических трещин в цифровую и 3DP-модель позволит расширить количество экспериментов, в том числе разрушительных, направленных на изучение физики потока и напряженно-деформированного геомеханического поведения. При таком подходе также станет также возможным более подробное геометрическое описание системы «матрица/трещина».

Для численного моделирования рекомендуется использовать цифровую модель, полученную путем КТ-сканирования уже напечатанной 3D-модели. Это позволяет учесть остатки материала и артефакты моделирования, в результате для исследования будет предоставлен не идеальный проект, а точная цифровая копия реального физического объекта [9].

При выполнении физического масштабирования цифровая модель керна увеличивается в 5–30 раз [13–16], а затем изготавливается на 3D-принтере. Это позволяет создать лабораторный образец, сохраняющий геометрическое подобие природного керна, но с увеличенными размерами поровых каналов; так, например, исходный томографический объем 1 мм^3 был увеличен в 10–20–30 раз для печати [15]. Масштабирование применяется для проведения экспериментов по проверке точности воспроизводимых реплик, изучения свойств материалов, используемых для 3D-печати, и для визуализации экспериментов по многофазной фильтрации, то есть для детального изучения механизмов вытеснения флюидов в пористой среде.

Использование 3D-печати позволяет создать образец заданной формы и размера, соответствующих требованиям установки в зависимости от типа эксперимента. Изменение размера образца предпочтительнее выполнять на этапе обработки цифровой модели, такой подход позволяет сохранить оригинальные керны, минимизировать отходы и предотвратить повреждения или даже потерю образца в случае механической обработки.

Построенная цифровая 3D-модель разрезается на последовательность горизонтальных слоев, которые 3D-принтер будет печатать по одному при создании реплики. Для отправки на печать выходные данные формируются в форматах STL или AMF. Формат файлов STL (Standard Triangle Language) описывает форму объекта в виде сетки треугольников, прост и широко поддерживается большинством 3D-принтеров, но не хранит информацию о цвете и текстурах. Более современный формат файлов AMF (Additive Manufacturing File Format) поддерживает данные о цвете, текстуре и материалах.

Печать 3D-модели. К настоящему моменту в зарубежной практике наметились тенденции в области 3D-печати реплик горных пород. По мере накопления опыта малопригодные для данной задачи материалы и методы отходят на второй план, а в фокусе остаются технологии, доказывающие способность достоверно воспроизводить ключевые свойства кернового материала. Далее рассмотрены технологии, получившие наиболее широкое освещение в международной практике на сегодняшний день (табл. 2).

Технология струйной печати связующим веществом (Binder Jet Technology, BJT) заключается в распылении

жидкого связующего вещества на тонкие слои порошка. Каждый слой порошка равномерно распределяется по платформе построения. После нанесения каждого слоя порошка печатающая головка выборочно наносит связующее вещество в соответствии с геометрией цифровой модели, загруженной в программное обеспечение для 3D-печати. Платформа построения опускается после каждого слоя, и новый слой порошка распределяется поверх ранее напечатанного слоя. В зависимости от используемых материалов, к недавно связанному слою может подаваться тепло для улучшения кристаллизации слоя. Процесс постобработки также зависит от используемых материалов порошка и связующего, и может включать удаление сыпучего порошка с внешней поверхности и внутреннего порового пространства, сушку в печи, пропитку клеем [13; 18–20; 23].

В работах [18; 20; 22] в качестве порошка использован кварцевый песок и гипсовый порошок, смешанный с кислотным катализатором, а связующее вещество представляет собой фурфуриловый спирт. В работах [5; 17; 21] в качестве порошка использован кварцевый песок, в работе [8] – гипсовый порошок. В работах [13; 23] использован гипсовый порошок, а связующее вещество представляет собой цианоакрилатный клей.

Геомеханические свойства образца зависят от параметров печати: минералогии и насыщенности связующего вещества и активатора, толщины слоя порошка и размеров зерна, ориентации слоя порошка, а также от процесса нагрева и охлаждения и от температуры отверждения [19; 20; 22; 23].

Технология стереолитографической 3D-печати (Stereolithographic 3D printing, SLA) относится к процессу VPP и основана на послойной печати с использованием фотохимических процессов, при которых ультрафиолетовый лазер отверждает жидкую фотополимерную смолу. Жидкая смола, загруженная в резервуар, отверждается ультрафиолетовым лазером, проходящим через дно резервуара. После затвердевания слоя на рабочей платформе, платформа поднимается на высоту слоя, и следующий слой создается таким же образом до тех пор, пока не будут изготовлены все слои [29].

Технология SLA может подразумевать использование воска для более точной печати небольших поровых пространств. Пустое пространство заполняется воском во время печати, чтобы гарантировать, что неотвержденная смола не заполнит пространство из-за капиллярного эффекта и не затвердеет со временем. На этапе постобработки выполняется удаление воска из порового пространства образцов [12].

Химический состав отверждаемой смолы определяет физические, транспортные и механические свойства получаемой 3DP-модели. Типичная смола для SLA включает олигомеры, мономеры и фотоинициаторы. Полимеризация (затвердевание) смолы происходит, когда лазерный луч проходит через слой жидкой смолы. Помимо состава, механические свойства и точность модели определяют температура, влажность и давление во время полимеризации. Повышение температуры и давления увеличивает прочность и жесткость смолы, а повышение влажности снижает твердость поверхности смолы [15; 30].

Современные достижения в технологии SLA-печати включают химическое покрытие поверхностей для имитации смачиваемости природных карбонатов. В работе [31] поверхность микромодели, покрытая тончайшим слоем кальцита, продемонстрировала значительное изменение свойств: от гидрофобных к гидрофильным. При этом осталась неизменной форма пор и каналов: от больших пор (~2000 мкм) до узких каналов (~400 мкм) и до шероховатости поверхности/кристаллических структур (<10 мкм).

Методы многоструйной печати Multijet Printing, MJP, и Multijet Modeling, MJM, сочетают в себе процессы MJT и VPP и заключаются в нанесении фотоотверждаемых пластиков, смол или литьевых восковых материалов через печатающую головку слой за слоем с использованием широкого источника света, обычно УФ-лампы [6; 12; 26].

В процессе постобработки используемый материал поддержки, как правило мягкий воск, необходимо растворить при определенном диапазоне температур, чтобы не повредить основную затвердевшую структуру [6].

В технологиях 3D-печати FFF (Fused Filament Fabrication) [8; 17] и FDM (Fused Deposition Modeling) [27; 32], относящихся к процессу MEX, толстая нить нагретого до плавления материала выдавливается через сопло слоями. Это сопло управляется системой перемещения для отслеживания деталей объекта. Расплавленный материал оседает и застывает, образуя один за другим слои 3D-печати.

Метод FDM не получил распространения в изготовлении реплик керна, так как данные образцы не способны воспроизводить механические свойства горных пород [27; 32].

Технология селективного лазерного отверждения (selective laser curing, SLC) представляет собой разновидность процесса DED. Лазер, управляемый компьютером, избирательно нагревает связующее вещество, нанесенное на поверхность скрепляемого материала. Таким образом создается слой печати. Затем рабочая платформа перемещается вниз для создания следующего слоя, и процесс избирательного нагрева повторяется слой за слоем [22].

Кажется очевидным, что качество 3D-печати различается в зависимости от технологии, используемых материалов и от параметров принтера [17], в то же время при прочих равных настройках разрешения и технологии печати экспериментальные результаты могут оказаться довольно близкими [6].

Постобработка. Этап постобработки заключается в очистке внутреннего пространства 3DP-моделей от исходного или поддерживающего материала, блокирующего сети пор. Это может быть сыпучий порошковый материал, мягкие смолы или воск. Для целей очистки применяются продувка, нагрев в печи, промывка дистиллированной водой и чистящими (щелочными) растворами, ультразвуковая очистка, пропитка маслами, сушка. Сложный этап очистки может занимать до двух недель [6]. Качество очистки влияет на точность 3DP-модели. К этапу постобработки также относят термическую обработку в печи и пропитку клеем для увеличения прочности. Для проверки качества и точности печати выполняется КТ-сканирование 3DP образцов после процесса очистки и его сравнение с исходной цифровой моделью.

Актуальные ограничения 3D-печати реплик горных пород

Для успешного применения печатные аналоги кернов должны достоверно имитировать природные прототипы. На текущий момент отмечаются следующие основные проблемы известных способов изготовления реплик горных пород и методов их изучения:

1. Недостаточная разрешающая способность методов получения исходной цифровой модели. Разрешение изображений горных пород постоянно улучшается, позволяя фиксировать все более мелкие детали пород, вплоть до нанопор [33]. Проблема отмечается в части анализа цифровых моделей горных пород: из-за того, что размер пикселя или вокселя изображения может скрывать границы между элементами породы, затрудняется их идентификация. Для повышения точности сегментации привлекаются методы автоматизации и машинного обучения [8].

2. Низкое разрешение печати, не позволяющее повторить реальную структуру порового пространства. Значительная часть исследований на текущий момент находится в крупном микрофлюидном масштабе (100–500 мкм) (см. табл. 2). Однако благодаря быстрому развитию технологии микро-3D-печати уже имеются примеры с гораздо более высоким разрешением печати (до 14 [11], 10 и 2 мкм [25; 31]) методом микро-стереолитографии (μ-SL).

3. Ограниченный выбор материалов, чье поведение при моделировании пластовых процессов сопоставимо с поведением природного керна. Вполне естественно, что в настоящее время не существует универсального печатного материала, который бы одновременно и достоверно воспроизводил весь комплекс свойств природной породы: фильтрационно-емкостные свойства, механические параметры, упругопластическое поведение, смачиваемость, химическую инертность и реакционную способность. Одни материалы, например, фотополимерные смолы, демонстрируют высокую точность в воспроизведении геометрии порового пространства и сложной внутренней структуры, однако их механические свойства и смачиваемость часто отличаются от природных. Другие материалы, например, кварцевые порошки, лучше имитируют смачиваемость, но не способны воспроизводить модели с высоким разрешением (2 мкм). Таким образом, исследователь вынужден делать компромиссный выбор, определяя, какое свойство является приоритетным для конкретного эксперимента. В результате изготовленный образец всегда является аналогом с допущениями, точно воспроизводя одни аспекты поведения керна, но упрощающим или искажающим другие.

Это фундаментальное ограничение означает, что, несмотря на интенсивное развитие технологий в данной области, идеальный «цифровой двойник» горной породы, полностью эквивалентный природному образцу по всем параметрам, на текущем этапе развития аддитивных технологий и материаловедения недостижим. Каждое исследование с использованием 3D-печатных аналогов должно начинаться с тщательной верификации тех конкретных свойств, которые критичны для моделируемого процесса, и явного указания на принятые допущения.

4. Отсутствие возможности многокомпонентной печати. На данный момент аналоги горных пород, напечатанные на 3D-принтере, представляют собой простые однокомпонентные (пластики и смолы) или двухкомпонентные смеси (кварцевый или гипсовый порошок и связующий материал). Для имитации природных горных пород с неоднородной текстурой исследователями отмечается необходимость расширения разнообразия химического состава пористой среды и разработки технологий с возможностью синтеза двух или более методов 3D-печати [10; 17].

Актуальные возможности 3D-печати реплик горных пород

Сравнительный анализ петрофизических свойств реплик и исходных образцов горных пород. Достоверность 3D-печатных копий, используемых в исследованиях нефти и газа, в первую очередь должна подтверждаться сходством петрофизических свойств с природными образцами горных пород.

Эксперименты с использованием песчаника, гипса и смол в качестве материалов для моделирования в целом показывают хорошее соответствие фильтрационно-емкостных свойств (пористость и проницаемость) реплик и исходных образцов горных пород [8; 17]. Использование пластмасс (PLA и ABS) привело к пониженной проницаемости в некоторых экспериментах, поскольку в процессе печати пластиковый печатный материал закупорил поры [17]. В нескольких опытах с фотореактивными смолами (SLA) отмечаются отклонения, связанные с трудностями при очистке, вызванными ограничениями разрешения 3D-печати [6; 12], а при моделировании методом BJT отмечается недостаточная очистка от гипсового порошка при постобработке, что в конечном счете влияет на снижение пористости и проницаемости [13].

Минералогический состав кернового образца играет важную роль в экспериментах по определению коэффициентов вытеснения. Преимуществом использования кварцевого песка является его сходство с зернами природных горных пород, в результате чего ожидается, что шероховатость и смачиваемость поверхности 3DP-моделей будет ближе к естественным. Результаты экспериментов [18] показали, что не только исходный кварцевый песок, но и связующее вещество, и его количество оказывают влияние на предпочтение смачиваемости образца. Кварцевый песок обладает преимущественно гидрофильными свойствами, а более высокие концентрации связующего вещества приводили к более сильным предпочтениям смачиваемости нефтью. Сами 3D-печатные песчаники в результате имели смешанные характеристики смачивания [18], что помещает этот аналоговый материал в относительно распространенное состояние среди природных пород. В свою очередь, однородность исходного гипсового материала отлична от сложного минералогического состава природного образца керна, и это оказало влияние на более высокие значения коэффициента нефтеотдачи 3DP-копии при закачке углекислого газа [8]. Гипсовые реплики являются преимущественно гидрофильными и обладают отталкивающей поверхностью по отношению к углеводородам, что делает их пригодными для экспериментальных исследований в случае, когда требуется минимальное взаимодействие между породой и углеводородами. Смолы, используемые в SLA-печати реплик горных пород, преимущественно являются гидрофильными. Соответствие определенному диапазону краевых углов смачивания можно достигнуть изменением химического состава смолы, либо химическим покрытием с целью изменения поверхности.

Эксперименты показывают, что наиболее подходящими материалами и технологиями для имитации механического поведения и упругих свойств горных пород являются кварцевый песок [21] и полимерные смолы, напечатанные с помощью стереолитографии (SLA) [34]; в меньшей степени воспроизводит механические свойства гипсовый порошок [23]. По показателю предельной прочности 3DP-реплики горных пород в настоящее время

уступают природным горным породам [21; 22]. Не способны воспроизводить механические свойства горных пород реплики керна из PLA и ABS-пластиков [27; 32].

3D-печать уже позволяет создавать физические образцы горных пород с заранее заданной и воспроизводимой геометрией поровых каналов и предоставляет широкие возможности проведения контролируемого лабораторного эксперимента по изучению связи между структурой пустотного пространства и изменением ФЕС при упругом нагружении, дополнив тем самым имеющиеся математические модели [35–38] реальными экспериментальными данными.

Наблюдение трехмерного поведения вытеснения воды и нефти в трехмерных поровых структурах с учетом влияния деформации пор с помощью традиционных экспериментальных методов крайне сложно либо даже невозможно. Позитивным фактором является то, что единичные эксперименты с использованием 3DP-моделей в данной области уже проводятся. По имеющимся результатам отмечается, что размер области вытеснения водой быстро увеличивается по мере увеличения деформации пор, вызванной давлением, а изменение структуры пор оказывает более доминирующее влияние на коэффициент вытеснения, чем изменение объема пор [16].

Возможности микромоделирования. Проведение исследований на микромоделях, получивших название технологии «лаборатория на чипе» (lab-on-a-chip), позволяет осуществить прямое наблюдение потока с целью выявления фундаментального механизма микромасштабной межфазной динамики, где доминируют капиллярные силы и поверхностное натяжение. Последние эксперименты выполняются на прозрачных моделях, напечатанных из фотополимерных смол методом SLA. Можно отметить, что вертикального разрешения принтера 25 мкм оказывается недостаточно для точного воспроизведения геометрии микромоделей [24]. Современные разработки позволяют воспроизводить модели с толщиной слоя 16, 14, 10 и даже 2 мкм. Для изучения многофазного потока требуется воспроизведение смачиваемости путем воссоздания шероховатости поверхности и химического состава. Разрешение печати в 14 мкм позволило выполнить верификацию цифровой модели фильтрации, которая показала хорошую сходимость методов при изучении влияния гетерогенности структуры на особенности механизма вытеснения [11]. На моделях с вертикальным разрешением 2 мкм выявлены четыре разных механизма защемления капель нефти в порах среды и зависимости распределения остаточной нефти от смачиваемости пористой среды [25], и реализован процесс имитации смачиваемости природных карбонатов путем химического покрытия поверхности микро-3DP-модели, выполненной из смолы [31].

На текущий момент такие исследования выполняются на квазитрехмерных моделях, то есть на двумерных моделях структуры пор. Очевидным ограничением таких квазитрехмерных моделей является инвариантность структуры пор в третьем измерении, что упрощает морфологию пор и ограничивает характеристики потока жидкости в направлении глубины. Для того чтобы снизить эту неопределенность, выполняется сравнение поведения вытеснения воды нефтью на масштабированных 2D- и 3D-моделях. Результаты показывают, что поведение вытеснения воды нефтью демонстрирует различные особенности с точки зрения эффекта образования языков обводнения (fingering): 3D-система пор обеспечивает лучшую связь пустот для высокой эффективности вытеснения, а остаточная насыщенность нефтью оказывается переоценена в 2D-системе пор [16].

В упрощенных моделях трещин для снижения вычислительной сложности принимается допущение об идеально гладких стенках, что исключает из рассмотрения влияние их шероховатости на фильтрационные характеристики. Такой подход снижает прогностические возможности моделей. Технология микромоделирования с вертикальным разрешением 16 мкм позволяет воспроизводить на 3D-печатные трещины с контролируемой шероховатостью поверхности [7].

Отмечается, что печатный материал должен быть прозрачным для осуществления наблюдения динамики проникновения жидкости на 3DP-микромоделях. Наблюдение за процессами микромасштабного уровня происходит с помощью оптических и электронных сканирующих микроскопов. В связи с этим предъявляются дополнительные требования к оптическим свойствам материала для печати, а именно к показателям преломления печатного материала и его светопоглощающей способности, кроме этого, к толщине стенки, поскольку очень толстая стенка будет блокировать свет, и к шероховатости поверхности, которая может привести к рассеянию или искажению света [25].

Моделирование сетей трещин. В реальных горных породах множество трещин образуют сложные трехмерные сети. Сами трещины имеют сложную форму и значительную изменчивость свойств, а их множественные пересечения обуславливают сложный поток в разнообразных по виду и свойствам сетях. В связи с этим эффективная подготовка экспериментальных и численных моделей сети трещин с реалистичной и измеримой геометрией пустот, на основе которых можно было бы точно оценить нелинейное поведение потока [39–41], остается сложной задачей. А сложные модели потоков для сетей трещин вовсе могут быть нереалистичны по той причине, что большое количество сложных факторов и моделирование мультифизического поведения делают вычислительные затраты чрезвычайно высокими [26]. Так, например, в силу ограниченности вычислительных мощностей, существующие сети DFN (дискретные сети трещин) имеют небольшие размеры и содержат максимум десять трещин [9].

Отмечается, что технология 3D-печати позволяет хорошо воспроизводить геометрические характеристики отдельных трещин в шероховатых стенках горных пород, однако точность печати снижается при подготовке моделей с множественными трещинами и пересечениями, то есть при создании сложных сетей трещин, из-за остатков поддерживающего материала в узких местах, ошибок печати в местах пересечения трещин и накапливающейся погрешности. Подчеркивается важность КТ-сканирования для использования реальной напечатанной геометрии в численном моделировании, так как результаты численного моделирования такой модели совпадают с результатами эксперимента для любого числа трещин [9].

Для моделирования шероховатости поверхностей трещин использовались методы SLA [7; 9] и MJM [26].

Так как естественные трещины демонстрируют большую степень неоднородности по сравнению с 3DP-аналогами, особенно с точки зрения свойств материала, необходимо понимать, что аналоги не являются идентичными и нельзя игнорировать

различие в гидромеханических реакциях. Тем не менее, при понимании имеющихся ограничений, 3DP-трещины могут давать разумные приближения к естественным трещинам. Особенно ценным является возможность многократного исследования сложной геометрии, что недостижимо при проведении экспериментов с натуральными кернами [42–45].

Путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на 3D-печатных моделях керна, выполняется верификация численных моделей и оценка адекватности реплики. Модель решеточных уравнений Больцмана для исследования вытеснения нефти водой в неоднородных поровых структурах продемонстрировала хорошую сходимость с экспериментальными результатами, а также показала высокую степень зависимости вычислительной точности от разрешения сетки [11]. Полученные высокоточные численные модели дают результаты, согласующиеся с результатами исследования потока жидкости при решении уравнений Навье-Стокса [9; 26]. Отмечается, что модель вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) имела очень высокую стоимость, и ожидалось, что модель эквивалентной проницаемости снизит затраты, однако кубический закон, который является простейшей моделью потока через трещину в породе и исключает нелинейный член из уравнения Навье-Стокса, показал расхождение с экспериментальным результатом [26]. Ни одна из используемых в исследовании [7] простых эмпирических моделей не смогла точно предсказать значение проницаемости во всем диапазоне напряжений, вместе с тем полученные данные предлагается использовать для уточнения численных моделей. Таким образом, можно заключить, что сравнение численного моделирования и результатов экспериментов на 3DP-моделях с использованием одних и тех же исходных данных помогает прояснить применимость или ограниченность теорий и обеспечивает глубокое понимание происходящих процессов в поровом масштабе.

Заключение

На основе проведенного обзора можно сформулировать следующие ключевые выводы о текущем состоянии, возможностях и ограничениях применения аддитивных технологий (3D-печати) для создания лабораторных аналогов кернов горных пород:

1. 3D-печать утвердилась как жизнеспособный и многообещающий метод для физического моделирования. Технология доказала свою принципиальную способность воспроизводить сложную геометрию пустотного пространства пород как на основе реальных данных (микро-КТ сканирования), так и синтетических моделей. Это открывает беспрецедентные возможности для проведения повторяемых, масштабируемых и неразрушающих экспериментов на геометрически идентичных образцах, что невозможно при работе с уникальными природными кернами.

2. Достигнут значительный прогресс в точности воспроизведения петрофизических свойств. Сравнительные исследования показывают, что 3D-печатные реплики на основе определенных материалов могут демонстрировать хорошее соответствие природным образцам по ключевым фильтрационно-емкостным свойствам (пористость, проницаемость). Технологии стереолитографической 3D-печати (SLA) с использованием фотоотверждаемых смол и струйного нанесения связующего (BJT) с использованием кварцевого песка или гипса стали основными рабочими инструментами. Смолы (SLA) обеспечивают высокое разрешение и точность геометрии пор, а песчаные/гипсовые аналоги (BJT) лучше воспроизводят смачиваемость и шероховатость поверхности, приближенные к природным.

3. Технология стала мощным мостом между физическими и цифровыми экспериментами. Верификация отпечатанного образца через КТ-сканирование позволяет устранить разрыв между теорией и практикой. Использование КТ-сканов уже напечатанных моделей учитывает все артефакты печати и постобработки, благодаря чему позволяет уточнить численные расчеты.

4. Отмечается углубление микромасштабных исследований и их визуализация. Развитие микро-стереолитографии (μ-SL) с разрешением печати до 2–14 мкм позволяет создавать прозрачные микромодели («лаборатория на чипе»). Это дает возможность прямого оптического наблюдения за механизмами многофазной фильтрации, защемления флюидов, влияния шероховатости и смачиваемости в масштабе отдельных пор. Химическое модифицирование поверхностей таких моделей тонкими минеральными покрытиями позволяет управлять их смачиваемостью, приближая ее к природным аналогам.

5. Появились перспективные направления в моделировании сложных сред. 3D-печать успешно применяется для создания моделей дискретных сетей трещин (DFN) с контролируемой шероховатостью стенок, что критически важно для изучения нелинейных эффектов течения. Несмотря на текущие ограничения по точности печати сложных пересечений, технология уже позволяет проводить параметрические исследования влияния геометрии трещин на фильтрацию, что крайне сложно сделать на натуральных образцах.

6. Несмотря на прогресс, сохраняются базовые технологические ограничения, касающиеся ограниченного разрешения печати, проблемы выбора материала, отсутствия универсального материала, недостаточных механических свойств.

7. Область находится в активном развитии, и ее потенциал дает основания для оптимизма. Интенсивные исследования направлены:

– на разработку новых функциональных и композитных материалов с программируемыми свойствами;

– повышение разрешения и скорости печати;

– создание гибридных и мультиматериальных методов печати для имитации неоднородности минерального состава.

Аддитивные технологии для создания аналогов кернов уже переходят в стадию практического инструментария для решения конкретных научных и инженерных задач. Они не являются и, вероятно, не станут в обозримом будущем идеальной заменой природного керна во всем спектре свойств, однако уже сейчас представляют значимое дополнение лабораторных исследований и цифрового моделирования. Их главная ценность заключается в обеспечении контроля, повторяемости и наглядности экспериментов, что позволяет глубже понять фундаментальные физические процессы в пористых средах и трещинах, уточнить численные модели и, в конечном счете, снижать риски при разработке месторождений.

Библиографический список

1. Colloidal-induced permeability degradation assessment of porous media / E.V. Kozhevnikov, M.S. Turbakov, E.A. Gladkikh [et al.] // Géotechnique Letters. – 2022. – No. 12. – P. 217–224. DOI: 10.1680/jgele.22.00017
2. Permeability evolution of porous sandstone in the initial period of oil production: comparison of well test and coreflooding data / M.S. Turbakov, E.V. Kozhevnikov, E.P. Riabokon [et al.] // Energies (Basel). – 2022. – No. 15. – P. 6137. DOI: 10.3390/en15176137
3. Study of the influence of nonlinear dynamic loads on elastic modulus of carbonate reservoir rocks / E. Riabokon, M. Turbakov, N. Popov [et al.] // Energies (Basel). – 2021. – No. 14. – P. 8559. DOI: 10.3390/en14248559
4. Experimental studies of the influence of dynamic loading on the elastic properties of sandstone / M. Guzev, E. Kozhevnikov, M. Turbakov [et al.] // Energies (Basel). – 2020. – No. 13. – P. 6195. DOI: 10.3390/en13236195
5. Testing impact load cell calculations of material fracture toughness and strength using 3D printed sandstone / K. Barbosa, R. Chalaturnyk, B. Bonfils [et al.] // Geotech Geol Eng. – 2020. – No. 38. – P. 1065–1096. DOI: 10.1007/s10706-019-01073-y
6. Simulation and validation of porosity and permeability of synthetic and real rock models using three-dimensional printing and digital rock physics / E.R. Ibrahim, M.S. Jouini, F. Bouchaala, J. Gomes // ACS Omega. – 2021. – No. 6 (47). – P. 31775–31781. DOI: 10.1021/acsomega.1c04429
7. A systematic investigation into the control of roughness on the flow properties of 3D printed fractures / T. Phillips, T. Bultreys, K. Bisdom [et al.] // Water Resources Research. – 2021. – No. 57 (4). DOI: 10.1029/2020WR028671
8. Almetwally, A.G. Experimental investigation of 3D printed rock samples replicas / A.G. Almetwally, H. Jabbari // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – No. 76. – P. 103192. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103192
9. Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks: Insights from 3D printing, CT scanning, and high-resolution numerical simulations / B. Li, J. Wang, R. Liu, Y. Jiang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – No. 13 (5). – P. 1020–1032. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.007
10. Fracture network created by 3D printer and its validation using CT images / A. Suzuki, N. Watanabe, K. Li, R.N. Horne // Water Resour. Res. – 2017. – No. 53. – P. 6330–6339. DOI: 10.1002/2017WR021032
11. Ju, Y. Characterization of immiscible phase displacement in heterogeneous pore structures: Parallel multicomponent lattice Boltzmann simulation and experimental validation using three-dimensional printing technology / Y. Ju, W. Gong, J. Zheng // International Journal of Multiphase Flow. – 2019. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.20
12. Head, D. Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3D printing investigation / D. Head, T. Vanorio // Geophys. Res. Lett. – 2016. – No. 43. – P. 7494–7502. DOI: 10.1002/2016GL069334
13. Resurrection of a reservoir sandstone from tomographic data using three-dimensional printing // Bulletin. – 2017. – No. 101 (09). – P. 1425–1443. DOI: 10.1306/11111616038
14. Upscaling strategy to simulate permeability in a carbonate sample using machine learning and 3D printing // IEEE. – 2021. – No. 1–1. – P. 99. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091772
15. Ishutov, S. Establishing framework for 3D printing porous rock models in curable resins / S. Ishutov // Transport in Porous Media. – 2019. – No. 129 (2). – P. 431–448. DOI: 10.1007/s11242-019-01297-9
16. Study on three-dimensional immiscible water – Oil two-phase displacement and trapping in deformed pore structures subjected to varying geostress via in situ computed tomography scanning and additively printed models / Y. Ju, C. Xi, J. Zheng [et al.] // International Journal of Engineering Science. – 2022. – No. 171. – P. 103615. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103615
17. Almetwally, A.G. 3D-printing replication of porous media for lab-scale characterization research / A.G. Almetwally, H. Jabbari // ACS Omega. – 2021. – No. 6 (4). – P. 2655–2664. DOI: 10.1021/acsomega.0c04825
18. Ardila, N. Wettability measurements on 3D printed sandstone analogues and its implications for fluid transport phenomena / N. Ardila, G. Zambrano-Narvaez, R.J. Chalaturnyk // Transport in Porous Media. – 2018. DOI: 10.1007/s11242-018-1176-1
19. Binder jetting of a complex-shaped metal partial denture framework / A. Mostafaei, E.L. Stevens, J.J. Ference [et al.] // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 63–68. DOI: 10.1016/j.addma.2018.02.014
20. 3D printed sandstone strength: curing of furfuryl alcohol resin-based sandstones // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2017. – No. 4 (3). – P. 149. DOI: 10.1089/3dp.2017.0032
21. Reservoir geomechanical properties characterization of 3D printed sandstone. – 2017. DOI: 10.1061/9780784480779.118
22. A comprehensive experimental study on mechanical behavior, microstructure and transport properties of 3D printed rock analogs / R. Song, Y. Wang, S. Ishutov [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2020. – No. 53. – P. 5745–5765. DOI: 10.1007/s00603-020-02239-4
23. Fereshtenejad, S. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics / S. Fereshtenejad, J.J. Song // Rock Mech Rock Eng. – 2016. – No. 49. – P. 2065–2074. DOI: 10.1007/s00603-015-0904-x
24. Comparison of flow and transport experiments on 3D printed micromodels with direct numerical simulations / F. Watson, J. Maes, S. Geiger [et al.] // Transp Porous Med. – 2019. – No. 129. – P. 449–466. DOI: 10.1007/s11242-018-1136-9
25. Li, H. Imaging and characterizing fluid invasion in micro-3D printed porous devices with variable surface wettability / H. Li, T. Zhang // Soft Matter. – 2019. DOI: 10.1039/c9sm01182j
26. Contributions of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models / A. Suzuki, J.M. Minto, N. Watanabe [et al.] // Transport in Porous Media. – 2019. – No. 129 (2). – P. 485–500. DOI: 10.1007/s11242-018-1154-7
27. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics // Rock Mech Rock Eng. – 2014. – No. 48 (3). DOI: 10.1007/s00603-014-0612-y
28. Dynamic characterization of 3D printed mechanical metamaterials with tunable elastic properties. – 2021. – No. 118 (21). – P. 211901. DOI:10.1063/5.0047617
29. Effect of load vector orientation on uniaxial compressive strength of 3D photoresin / E. Kozhevnikov, M. Turbakov, E. Riabokon [et al.] // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – No. 9. – P. 23. DOI: 10.3390/jmmp9010023
30. The emerging role of 3D printing in the fabrication of detection systems / E. Carrasco-Correa, E. Simó-Alfonso, J.M. Herrero-Martínez, M. Miró // TrAC, Trends Anal. Chem. – 2021. – No. 136. – P. 0165 – 9936. DOI: 10.1016/j.trac.2020.116177
31. Empowering microfluidics by micro-3D printing and solution-based mineral coating / H. Li, A. Raza, Q. Ge [et al.]. DOI: 10.1039/D0SM00958J
32. Experimental study on mechanical properties of single- and dual-material 3D printed products / H. Kim, E. Park, S. Kim [et al.]. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.076
33. Nelson, P.H. Pore-throat sizes in sandstones, tightsandstones, and shales: AAPG / P.H. Nelson // Bulletin. – 2009. – Vol. 93, no. 3. – P. 329–340. DOI: 10.1306/10240808059
34. Nonlinear flow behavior through rough-walled rock fractures: The effect of contact area / F. Xiong, Q. Jiang, Z. Ye, X. Zhang // Computers and Geotechnics. – 2018. – No. 102. – P. 179–195. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.06.006
35. Вирц, Р.А. Численное решение двумерной задачи фильтрации жидкости в деформируемой пористой среде / Р.А. Вирц // Известия Алтайского государственного университета. – 2021. – № 1 (117). – С. 88–92. DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-14
36. Invasion patterns during two-phase flow in deformable porous media. DOI: 10.3389/fphy.2015.00081
37. Burnashev, V.F.nMathematical modeling of multi-phase filtration in a deformable porous medium / V.F. Burnashev, K.K. Viswanathan, Z.D. Kaytarov // Computation. – 2023. – No. 11. – P. 112. DOI: 10.3390/computation11060112
38. Flow-induced compaction of a deformable porous medium // Physical Review E. – 2016. – No. 93 (2). DOI: 10.1103/PhysRevE.93.023116
39. Bisdom, K. The impact of different aperture distribution models and critical stress criteria on equivalent permeability in fractured rocks / K. Bisdom, G. Bertotti, H.M. Nick. – 2016. DOI: 10.1002/2015JB012657
40. Trapping zones: The effect of fracture roughness on the directional anisotropy of fluid flow and colloid transport in a single fracture /D.F. Bou, G. Grasselli, J.T. Fredrich [et al.]. – 2006. DOI: 10.1029/2006GL027275
41. Bryan, S.B. Numerical modeling of the effects of roughness on flow and eddy formation in fractures / S.B. Bryan, W.K. Brent, E. Sleep. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.08.004
42. Rock permeability evolution during cyclic loading and colloid migration after saturation and drying / E. Kozhevnikov, M. Turbakov, E. Riabokon [et al.] // Advances in Geo-Energy Research. – 2024. – No. 11. – P. 208–219. DOI: 10.46690/ager.2024.03.05
43. Experimental investigation of the change of elastic moduli of clastic rocks under nonlinear loading / M.A. Guzev, E. Kozhevnikov, M.S. Turbakov [et al.] // International Journal of Engineering. – 2021. – No. 34 (3). – P. 750–755. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.03C.21
44. Рябоконь, Е.П. Исследование влияния неоднородности деформации на проницаемость керна при циклическом нагружении / Е.П. Рябоконь, М.А. Гузев, Ч. Ци // Недропользование. – 2025. – Т.25, № 3. – С. 203–212. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.10
45. Size Effect of fractured rock mass based on 3D printed model testing / Y. Wang [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2022. – Vol. 55, no. 11. P. 7005–7020. DOI: 10.1007/s00603-022-03013-4

References

1. Kozhevnikov E.V., Turbakov M.S., Gladkikh E.A. et al. Colloidal-induced permeability degradation assessment of porous media. *Géotechnique Letters*, 2022, no. 12, pp. 217-224. DOI: 10.1680/jgele.22.00017
2. Turbakov M.S., Kozhevnikov E.V., Riabokon E.P. et al. Permeability evolution of porous sandstone in the initial period of oil production: comparison of well test and coreflooding data. *Energies (Basel)*, 2022, no. 15, 6137 p. DOI: 10.3390/en15176137
3. Riabokon E., Turbakov M., Popov N. et al. Study of the influence of nonlinear dynamic loads on elastic modulus of carbonate reservoir rocks. *Energies (Basel)*, 2021, no. 14, 8559 p. DOI: 10.3390/en14248559
4. Guzev M., Kozhevnikov E., Turbakov M. et al. Experimental studies of the influence of dynamic loading on the elastic properties of sandstone. *Energies (Basel)*, 2020, no. 13, 6195 p. DOI: 10.3390/en13236195

5. Barbosa K., Chalaturnyk R., Bonfils B. et al. Testing impact load cell calculations of material fracture toughness and strength using 3D printed sandstone. *Geotech. Geol. Eng.*, 2020, no. 38, pp. 1065-1096. DOI: 10.1007/s10706-019-01073-y
6. Ibrahim E.R., Jouini M.S., Bouchaala F., Gomes J. Simulation and validation of porosity and permeability of synthetic and real rock models using three-dimensional printing and digital rock physics. *ACS Omega*, 2021, no. 6 (47), pp. 31775-31781. DOI: 10.1021/acsomega.1c04429
7. Phillips T., Bultreys T., Bisdom K. et al. A systematic investigation into the control of roughness on the flow properties of 3D printed fractures. *Water Resources Research*, 2021, no. 57 (4). DOI: 10.1029/2020WR028671
8. Almetwally A.G., Jabbari H. Experimental investigation of 3D printed rock samples replicas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, no. 76, 103192 p. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103192
9. Li B., Wang J., Liu R., Jiang Y. Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks: Insights from 3D printing, CT scanning, and high-resolution numerical simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, no. 13 (5), pp. 1020-1032. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.007
10. Suzuki A., Watanabe N., Li K., Horne R.N. Fracture network created by 3D printer and its validation using CT images. *Water Resour. Res.*, 2017, no. 53, pp. 6330-6339. DOI: 10.1002/2017WR021032
11. Ju Y., Gong W., Zheng J. Characterization of immiscible phase displacement in heterogeneous pore structures: Parallel multicomponent lattice Boltzmann simulation and experimental validation using three-dimensional printing technology. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.20
12. Head D., Vanorio T. Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3D printing investigation. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, no. 43, pp. 7494-7502. DOI: 10.1002/2016GL069334
13. Resurrection of a reservoir sandstone from tomographic data using three-dimensional printing. *Bulletin*, 2017, no. 101 (09), pp. 1425-1443. DOI: 10.1306/11111616038
14. Upscaling strategy to simulate permeability in a carbonate sample using machine learning and 3D printing. *IEEE*, 2021, no. 1-1, 99 p. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091772
15. Ishutov S. Establishing framework for 3D printing porous rock models in curable resins. *Transport in Porous Media*, 2019, no. 129 (2), pp. 431-448. DOI: 10.1007/s11242-019-01297-9
16. Ju Y., Xi C., Zheng J. et al. Study on three-dimensional immiscible water - Oil two-phase displacement and trapping in deformed pore structures subjected to varying geostress via in situ computed tomography scanning and additively printed models. *International Journal of Engineering Science*, 2022, no. 171, 103615 p. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103615
17. Almetwally A.G., Jabbari H. 3D-printing replication of porous media for lab-scale characterization research. *ACS Omega*, 2021, no. 6 (4), pp. 2655-2664. DOI: 10.1021/acsomega.0c04825
18. Ardila N., Zambrano-Narvaez G., Chalaturnyk R.J. Wettability measurements on 3D printed sandstone analogues and its implications for fluid transport phenomena. *Transport in Porous Media*, 2018. DOI: 10.1007/s11242-018-1176-1
19. Mostafaei A., Stevens E.L., Ference J.J. et al. Binder jetting of a complex-shaped metal partial denture framework. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 63-68. DOI: 10.1016/j.addma.2018.02.014
20. 3D printed sandstone strength: curing of furfuryl alcohol resin-based sandstones. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2017, no. 4 (3), 149 p. DOI: 10.1089/3dp.2017.0032
21. Reservoir geomechanical properties characterization of 3D printed sandstone, 2017. DOI: 10.1061/9780784480779.118
22. Song R., Wang Y., Ishutov S. et al. A comprehensive experimental study on mechanical behavior, microstructure and transport properties of 3D printed rock analogs. *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2020, no. 53, pp. 5745-5765. DOI: 10.1007/s00603-020-02239-4
23. Fereshtenejad S., Song J.J. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics. *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2016, no. 49, pp. 2065-2074. DOI: 10.1007/s00603-015-0904-x
24. Watson F., Maes J., Geiger S. et al. Comparison of flow and transport experiments on 3D printed micromodels with direct numerical simulations. *Transport in Porous Media*, 2019, no. 129, pp. 449-466. DOI: 10.1007/s11242-018-1136-9
25. Li H., Zhang T. Imaging and characterizing fluid invasion in micro-3D printed porous devices with variable surface wettability. *Soft Matter*, 2019. DOI: 10.1039/c9sm01182j
26. Suzuki A., Minto J.M., Watanabe N. et al. Contributions of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models. *Transport in Porous Media*, 2019, no. 129 (2), pp. 485-500. DOI: 10.1007/s11242-018-1154-7
27. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics. *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2014, no. 48 (3). DOI: 10.1007/s00603-014-0612-y
28. Dynamic characterization of 3D printed mechanical metamaterials with tunable elastic properties, 2021, no. 118 (21), 211901 p. DOI: 10.1063/5.0047617
29. Kozhevnikov E., Turbakov M., Riabokon E. et al. Effect of load vector orientation on uniaxial compressive strength of 3D photoresin. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, no. 9, 23 p. DOI: 10.3390/jmmp9010023
30. Carrasco-Correa E., Simó-Alfonso E., Herrero-Martínez J.M., Miró M. The emerging role of 3D printing in the fabrication of detection systems. *TrAC, Trends Anal. Chem*, 2021, no. 136, pp. 0165-9936. DOI: 10.1016/j.trac.2020.116177
31. Li H., Raza A., Ge Q. et al. Empowering microfluidics by micro-3D printing and solution-based mineral coating. DOI: 10.1039/D0SM00958J
32. Kim H., Park E., Kim S. et al. Experimental study on mechanical properties of single- and dual-material 3D printed products. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.076
33. Nelson P.H. Pore-throat sizes in sandstones, tightsandstones, and shales: AAPG. *Bulletin*, 2009, vol. 93, no. 3, pp. 329-340. DOI: 10.1306/10240808059
34. Xiong F., Jiang Q., Ye Z., Zhang X. Nonlinear flow behavior through rough-walled rock fractures: The effect of contact area. *Computers and Geotechnics*, 2018, no. 102, pp. 179-195. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.06.006
35. Virts R.A. Chislennoe reshenie dvumernoi zadachi fil'tratsii zhidkosti v deformiruemoi poristoi srede [Numerical Solution of a Two-Dimensional Problem of Fluid Filtration in a Deformable Porous Medium]. *Izvestiia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1 (117), pp. 88-92. DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-14
36. Invasion patterns during two-phase flow in deformable porous media. DOI: 10.3389/fphy.2015.00081
37. Burnashev V.F., Viswanathan K.K., Kaytarov Z.D. Mathematical modeling of multi-phase filtration in a deformable porous medium. *Computation*, 2023, no. 11, 112 p. DOI: 10.3390/computation11060112
38. Flow-induced compaction of a deformable porous medium. *Physical Review E*, 2016, no. 93 (2). DOI: 10.1103/PhysRevE.93.023116
39. Bisdom K., Bertotti G., Nick H.M. The impact of different aperture distribution models and critical stress criteria on equivalent permeability in fractured rocks, 2016. DOI: 10.1002/2015JB012657
40. Bou D.F., Grasselli G., Fredrich J.T. et al. Trapping zones: The effect of fracture roughness on the directional anisotropy of fluid flow and colloid transport in a single fracture, 2006. DOI: 10.1029/2006GL027275
41. Bryan S.B., Brent W.K., Sleep E. Numerical modeling of the effects of roughness on flow and eddy formation in fractures. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.08.004
42. Kozhevnikov E., Turbakov M., Riabokon E. et al. Rock permeability evolution during cyclic loading and colloid migration after saturation and drying. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, no. 11, pp. 208-219. DOI: 10.46690/ager.2024.03.05
43. Guzev M.A., Kozhevnikov E., Turbakov M.S. et al. Experimental investigation of the change of elastic moduli of clastic rocks under nonlinear loading. *International Journal of Engineering*, 2021, no. 34 (3), pp. 750-755. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.03C.21
44. Riabokon' E.P., Guzev M.A., Tsi Ch. Issledovanie vliianiia neodnorodnosti deformatsii na pronitsaemost' kerna pri tsiklicheskom nagruzhenii [Study of the Influence of Deformation Heterogeneity on Core Permeability Under Cyclic Loading]. *Nedropol'zovanie*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 203-212. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.10
45. Wang Y. et al. Size Effect of fractured rock mass based on 3D printed model testing. *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2022, vol. 55, no. 11, pp. 7005-7020. DOI: 10.1007/s00603-022-03013-4

Финансирование. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0008).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.