Недропользование. 2025. Т. 25, № 3. С.203-212. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.10

ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №1 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.323
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Исследование влияния неоднородности деформации на проницаемость керна при циклическом нагружении

Е.П. Рябоконь[1], М.А. Гузев[1], Чэнчжи Ци[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)
[2]Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры (Китайская Народная Республика, 100044, г. Пекин, Чжанланьлу Сичэн, 1)

Study of the Influence of Deformation Heterogeneity on Core Permeability under Cyclic Loading

Evgenii P. Riabokon[1], Mikhail A. Guzev[1], Chengzhi Qi[2]

[1]Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)
[2]Beijing University of Civil Engineering and Architecture (1 Zhanlanguan Rd, Xicheng District, Beijing, 100044, People's Republic of China)

Получена / Received: 05.12.2024. Принята / Accepted: 19.09.2025. Опубликована / Published: 24.10.2025

Ключевые слова:
деформации, керн, аддитивные технологии, циклическое нагружение, проницаемость, проводимость, фильтрация, давление, SLA-печать.

Изучение чувствительности фильтрационно-емкостных свойств к давлению является актуальной задачей при планировании и эксплуатации природных резервуаров, в которых неизбежно происходит циклическое изменение порового давления. Среди существующих лабораторных методов исследования чувствительности горных пород к давлению имеется ряд недостатков, приводящих к снижению точности прогнозирования проницаемости, особенно при создании всестороннего давления обжима. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния циклических нагрузок на фильтрационные параметры 3D-аналогов горных пород, изготовленных по SLA-методу печати с заданными параметрами проводимости. Выявлен механизм влияния составной конструкции модели на деформацию канала фильтрации. Возникающий эффект проскальзывания частей 3D-аналогов горных пород приводит к большей степени сужения канала фильтрации в центральной части образца при циклическом приложении нагрузки. Выявлено, что канал, находящийся в центральной части, сжимается в среднем на 60 % больше, чем находящиеся сбоку. Обнаружена зависимость степени деформирования образца от количества циклов нагружения. Выявлено, что при одном цикле нагружения канал, находящийся в центральной части образца, сужается в среднем на 30 % меньше, чем в боковой. При разгрузке каналы в центральной части меньше раскрываются, так как запасенной внутренней упругой энергии недостаточно для преодоления трения и сдвига половинок. Результаты исследования показывают, что составной тип конструкции 3D-аналогов горных пород приводит к превышению деформаций, параллельных площадке соприкосновения над перпендикулярными. Такой тип конструкции имитирует наличие релаксационных трещин, присущих образцам горных пород, извлеченных с больших глубин и подверженных значительным напряжениям в естественных условиях залегания.

Keywords:
deformations, core, additive technologies, cyclic loading, permeability, conductivity, filtration, pressure, SLA printing.

The study of sensitivity of filtration-capacitive properties to pressure is an urgent task in the planning and operation of natural reservoirs, in which cyclic changes in pore pressure inevitably occur. Among the existing laboratory methods for studying the sensitivity of rocks to pressure, there are a number of shortcomings that lead to a decrease in the accuracy of permeability prediction, especially when creating a comprehensive confining pressure. The paper presents the results of experimental studies of the effect of cyclic loads on the filtration parameters of 3D analogs of rocks manufactured by the SLA printing method with specified conductivity parameters. The mechanism of the influence of the composite structure of the model on the deformation of the filtration channel is revealed. The resulting effect of slippage of parts of 3D analogs of rocks leads to a greater narrowing of the filtration channel in the central part of the sample under cyclic application of the load. It was found that the channel located in the central part is compressed on average by 60% more than those located on the sides. The dependence of the degree of deformation of the sample on the number of loading cycles was found. It was found that during one loading cycle, the channel located in the central part of the sample narrows on average by 30% less than in the lateral part. During unloading, the channels in the central part open less, since the stored internal elastic energy is insufficient to overcome friction and shear of the halves. The results of the study show that the composite type of the design of 3D rock analogues leads to an excess of deformations parallel to the contact area over perpendicular ones. This type of design imitates the presence of relaxation cracks inherent in rock samples extracted from great depths and subject to significant stresses in natural conditions of occurrence.

Рябоконь Евгений Павлович – старший научный сотрудник лаборатории природных газовых гидратов (тел.: +007 (342) 219 82 50, e-mail: riabokon@pstu.ru).
Гузев Михаил Александрович – профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории природных газовых гидратов (e-mail: guzev@iam.dvo.ru).
Чэнчжи Ци – доктор физико-математических наук, декан школы подготовки кадров высшей квалификации (e-mail: qichengzhi65@163.com).

Evgenii P. Riabokon (Author ID in Scopus: 56006175100, ORCID: 0000-0003-0555-3977) – Senior Researcher at the Laboratory of Natural Gas Hydrates (tel: +007 (342) 219 82 50; e-mail: riabokon@pstu.ru).
Mikhail A. Guzev (Author ID in Scopus: 55976318100, ORCID: 0000-0001-9344-154X) – Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Chief Researcher of the Laboratory of Natural Gas Hydrates (e-mail: guzev@iam.dvo.ru).
Chengzhi Qi (Author ID in Scopus: 35490194400, ORCID: 0000-0003-1196-3972) – Doctor in Physics and Mathematics, Dean of Graduate School (e-mail: qichengzhi65@163.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Рябоконь, Е.П. Исследование влияния неоднородности деформации на проницаемость керна при циклическом нагружении / Е.П. Рябоконь, М.А. Гузев, Чэнчжи Ци // Недропользование. – 2025. – Т.25, №3. – С. 203–212. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.10

Please cite this article in English as:
Riabokon E.P., Guzev M.A., Qi Chengzhi Study of the Influence of Deformation Heterogeneity on Core Permeability Under Cyclic Loading. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.3, pp. 203-212. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.10

Введение

При эксплуатации природных резервуаров циклическое изменение порового давления приводит к циклическому изменению напряженно-деформированного состояния и связанных с этим свойств породы, в том числе проницаемости. Снижение проницаемости приводит к снижению продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин и обусловливает повышение экономических затрат, связанных с дальнейшей эксплуатацией подземных резервуаров. В связи с этим при планировании и эксплуатации подземных резервуаров актуальной задачей является прогноз чувствительности фильтрационно-емкостных свойств пород к давлению и особенно к циклическому. Для этих целей проводят лабораторные исследования керна при различном всестороннем давлении обжима, имитирующем циклическое изменение порового давления в пластовых условиях. По результатам лабораторных исследований получают экспериментальные зависимости проницаемости от давления, которые описываются степенными уравнениями. Экспонента степенного уравнения общепринято считается коэффициентом чувствительности горной породы к давлению. Такой подход имеет преимущества, заключающиеся в его простоте и в получении релевантных данных к определенной горной формации. Однако основным недостатком данного метода является наличие гистерезиса проницаемости, осложняющего обоснованный выбор коэффициентов чувствительности к давлению. Гистерезис проницаемости вызван постепенным уплотнением образцов или миграцией коллоидов [1–11]. Если миграция коллоидов ощутимо проявляется в высокопроницаемых породах при проницаемости более 50 мД [12], то влияние уплотнения прослеживается во всех типах горных пород, что связано со смыканием релаксационных трещин, которые имеют выраженную направленность – перпендикулярно главному стрессу. Зачастую при проведении экспериментальных исследований реальное направление стресса в пласте не учитывается или игнорируется. В экспериментальных исследованиях вместо ячеек трехосного сжатия чаще используют кернодержатели под цилиндрические образцы [13]. Форма образцов обусловливает круглое равномерное воздействие всестороннего давления и в цилиндрических образцах возникают кольцевые напряжения, не свойственные реальному стрессу в условиях залегания горных пород. Также некорректное приложение стресса может приводить к перестройке внутренней структуры образцов и получению некорректных и невоспроизводимых результатов. Также реальное состояние, присущее условиям залегания, сложно достижимо из-за неоднородности горной породы [14, 15].

Вследствие некорректного приложения нагрузок чувствительность горной породы к стрессу может быть определена неверно, что снижает точность прогнозирования проницаемости, особенно при циклическом нагружении. Косвенно в лабораторных условиях влияние кольцевого напряжения в образцах проявляется в экспериментах с кислотными обработками, определением коэффициентов вытеснения и по результатам исследований с компьютерной томографией (КТ). При кислотных обработках червоточины в образцах всегда формируются ближе к центру образцов, что обусловлено преимущественным течением кислоты по порам, обладающим наименьшим гидравлическим сопротивлением. Эксперименты по вытеснению с КТ-наблюдением показывают также, что основной фронт вытеснения в образцах под всесторонним давлением происходит преимущественно в центральной части. Эти экспериментальные примеры показывают, что центральная часть керновых образцов более проницаема, так как меньше сжата, а периферия образцов обладает меньшей проницаемостью, так как эта область порового пространства сжата кольцевыми напряжениями от всестороннего давления. Однако, несмотря на качественные признаки, количественно оценить влияние неравномерного напряжения на проницаемость цилиндрических образцов достаточно сложно с использованием реальных горных пород из-за отсутствия референтной базы, так как каждый образец породы является уникальным.

Для повышения достоверности исследований, исключения влияющих факторов и повышения воспроизводимости в последнее время все чаще используют методы исследований, исключающие вероятное влияние факторов, присущих реальным горным породам, путем создания 3D-аналогов кернов и горных пород. На сегодняшний день существуют различные технологии создания 3D-моделей керна. Например, технологии FDM [16, 17] и FFF [18], основанные на послойном наплавлении материала: данный метод позволяет использовать в качестве исходного материала гипсовый порошок [19–21] или кварцевый песок, который скрепляется при помощи специального отвердителя – фурановой кислоты [22–24], цианакрилового клея [25–28], фурфурилового спирта и смол на фенольной основе [29, 30], или смеси цемента, кремнезема и воды [31, 32], что делает модель более похожей на керн, однако данные методы отличаются низкой разрешающей способностью печати и также не позволяют оценить влияние распределение напряжения на проницаемость керна [28].

Стереолитографические методы печати – SLA [33, 34], LCD [35], DLP [36], в которых фотополимерная смола отверждается послойно под воздействием ультрафиолета, обладают более высоким разрешением, но недостаточным для воспроизведения точных копий кернов, на основе микротомографического сканирования [37–45]. Поэтому некоторые исследователи предлагают сплошные модели с проводящими каналами, например спиралевидной формы [46] или в виде трещин [47–50]. Несмотря на явное преимущество стереолитографической печати для создания аналогов кернов, исследования проницаемости этих образцов при циклическом нагружении не проводились. Кроме того, использование 3D-аналогов пород с заданными свойствами позволит оценить степень деформации образцов при всестороннем давлении и кольцевых напряжениях. В работе представлены результаты экспериментальной оценки неоднородности деформаций, возникающих в керновых образцах при всестороннем сжатии при проведении фильтрационных исследований, в том числе с циклическим нагружением. Структура статьи включает в себя методику изготовления образцов и проведения их фильтрационных испытаний, раздел с результатами исследований, обсуждения и выводы.

Методика изготовления

Модели керна изготавливались SLA-методом при помощи 3D-принтера Anycubic Photon Mono X, разрешение печати которого составляет 50 мкм. Принцип SLA-печати показан на рис. 1, *а*. Основным недостатком SLA-печати, снижающим ее разрешение, является наличие эффекта паразитной засветки [51] – нежелательное рассеивание ультрафиолета (рис. 1, *б*), при котором смол полимеризуется вне краев маски.

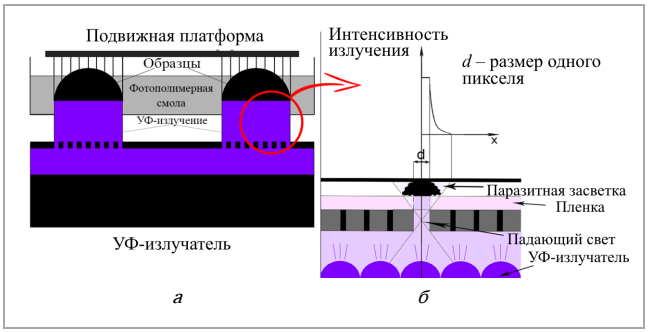


Рис. 1. Принципиальная схема SLA-печати (*а*); эффект паразитной засветки (*б*)

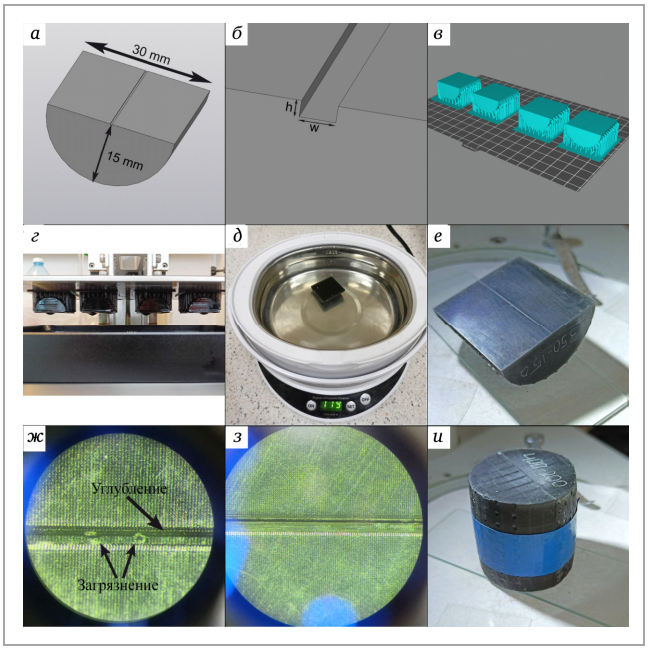


Рис. 2. Методика изготовления модели: *а* – форма и размер цифровой модели; *б* – форма углубления; *в* – подготовка моделей к печати; *г* – результат печати; *д* – очистка в ультразвуковой ванне; *е* – модель после удаления поддержек; *ж* – последствия паразитной засветки; *з* – результат механической отчистки углубления; *и* – образец, готовый к проведению фильтрационных испытаний

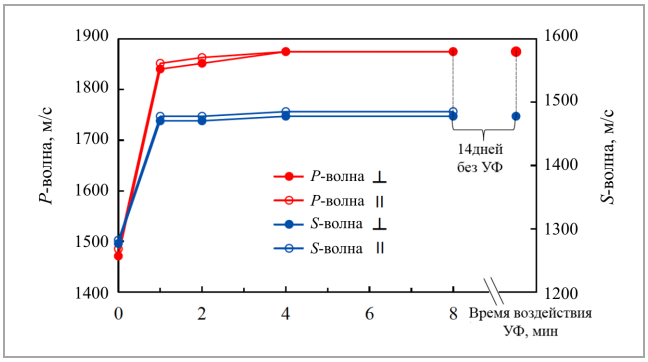


Рис. 3. Зависимость скорости продольных и поперечных волн в образце от времени сушки

С целью изучения характера деформации керна при нагружении была разработана методика с использованием 3D-аналогов керна, состоящих их двух половинок. Одна из половинок является сплошной, а другая имеет углубление на плоскости контакта со второй половинкой (рис. 2, *а*). Форма углубления показана на рис. 2, *б*. По изменению проводимости углубления можно судить о величинах деформаций

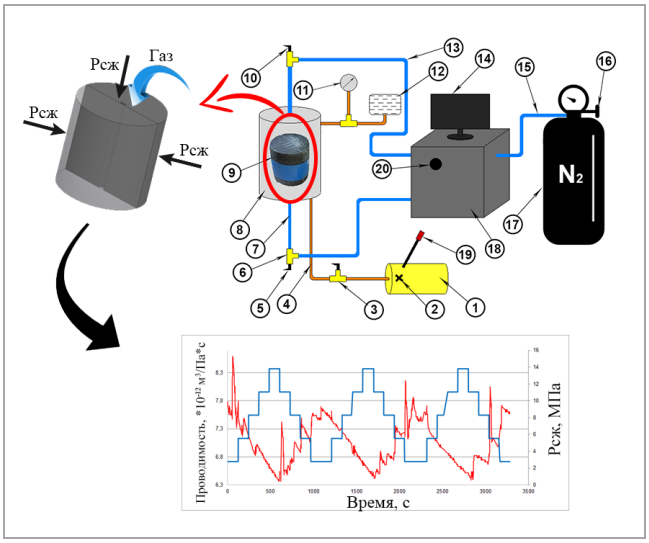


Рис. 4. Установка для проведения фильтрационных испытаний: *1* – гидравлический насос; *2* – клапан сброса давления масла; *3*, *5*, *10* – запорные устройства; *4* – масляная магистраль; *6* – тройник с отверстием для сброса давления; *7* – газоотводящая магистраль; *8* – кернодержатель; *9* – испытуемый образец; *11* – манометр контроля давления обжима; *12* – расширительная емкость для масла; *13* – магистраль подачи газа; *14* – монитор; *15* – трубка подачи газа; *16* – регулятор подачи газа на баллоне; *17* – баллон с газом; *18* – цифровой модуль для измерения газопроницаемости; *19* – рукоятка гидравлического насоса; *20* – регулятор подачи газа

в зависимости от их расположения в образцах по площади контакта.

Цифровые модели с прямоугольными углублениями различной ширины и глубины перед печатью в специализированном программном продукте разбивались по слоям, также устанавливались поддержки, предназначенные для предотвращения деформации модели во время печати (рис. 2, *в*). Печать осуществлялась плоскостью контакта вниз (рис. 2, *г*). Напечатанные модели отчищались от остатков смолы в ультразвуковой ванне с изопропиловым спиртом (рис. 2, *д*). Очищенный образец сушился в специальной ультрафиолетовой камере (рис. 2, *е*). В углублениях после печати могли находиться нежелательные включения полимеризованной смолы (рис. 2, *ж*), которые дополнительно удалялись с использование щетки с мягким ворсом (рис. 2, *з*). Готовый к фильтрационным испытаниям образец, соединялся из сплошной половинки и половинки с углублением (рис. 2, *и*).

Контроль анизотропии образцов

Для оценки анизотропии напечатанных образцов использовался метод ультразвукового исследования, который основывается на регистрации скорости прохождения продольных и поперечных волн через образец. Необходимость данного исследования обусловлена тем, что 3D-печать, основанная на послойном отвердении, склонна к слоистой неоднородности, свойства образца могут изменяться от направления приложения нагрузки. Кроме того, на свойства материала влияет время сушки в ультрафиолетовой камере после печати. Результаты ультразвукового исследования показали, что свойства материала параллельно и перпендикулярно направлению слоев одинаковые и данный материал является изотропным (рис. 3). Установлено, что для стабилизации свойств материала образцов достаточно 4 мин сушки, а хранение в течение 14 суток не приводит к изменению свойств образцов.

Методика исследований

Исследования проводились на фильтрационной установке UltraPoroPerm-500 (рис. 4) при установившемся течении азота через образец. Модель керна помещалась в кернодержатель, создающий одинаковое осевое и радиальное давление. После чего происходила закачка чистого азота. На выходе из образца расход газа регистрировался при атмосферном давлении. Фильтрация происходила при постоянном градиенте давления, обеспечивающем линейный закон фильтрации. Особенность исследований заключалась в ступенчатом нагружении образца путем увеличения давления обжима от 2,76 до 13,8 МПа с шагом 2,76 МПа и последующей разгрузке до первоначального значения с тем же шагом. Измерения на каждой ступени давления обжима производились в течение 2 мин. Помимо циклических испытаний, были проведены испытания в один цикл нагрузки/разгружения для разных типов образцов со смазанной площадью контакта двух половинок моделей.

Исследованные модели не обладают пористостью, а течение газа происходит исключительно по каналу, ограниченному непроницаемой матрицей, поэтому параметром, характеризующим его проводящую способность, принято считать не проницаемость, а проводимость, которая определяется как отношение расхода газа к градиенту давления через образец с учетом сжимаемости газа:

$$C = \frac{Q}{(P_{вх}^2 - P_{вых}^2) \Big/ P_{вых} \cdot L}, \quad (1)$$

где Q – расход газа, м^3/с; $P_{вх}$ – давление на входе в образец, Па; $P_{вых}$ – давление на выходе из образца, Па; L – длина образца, м;

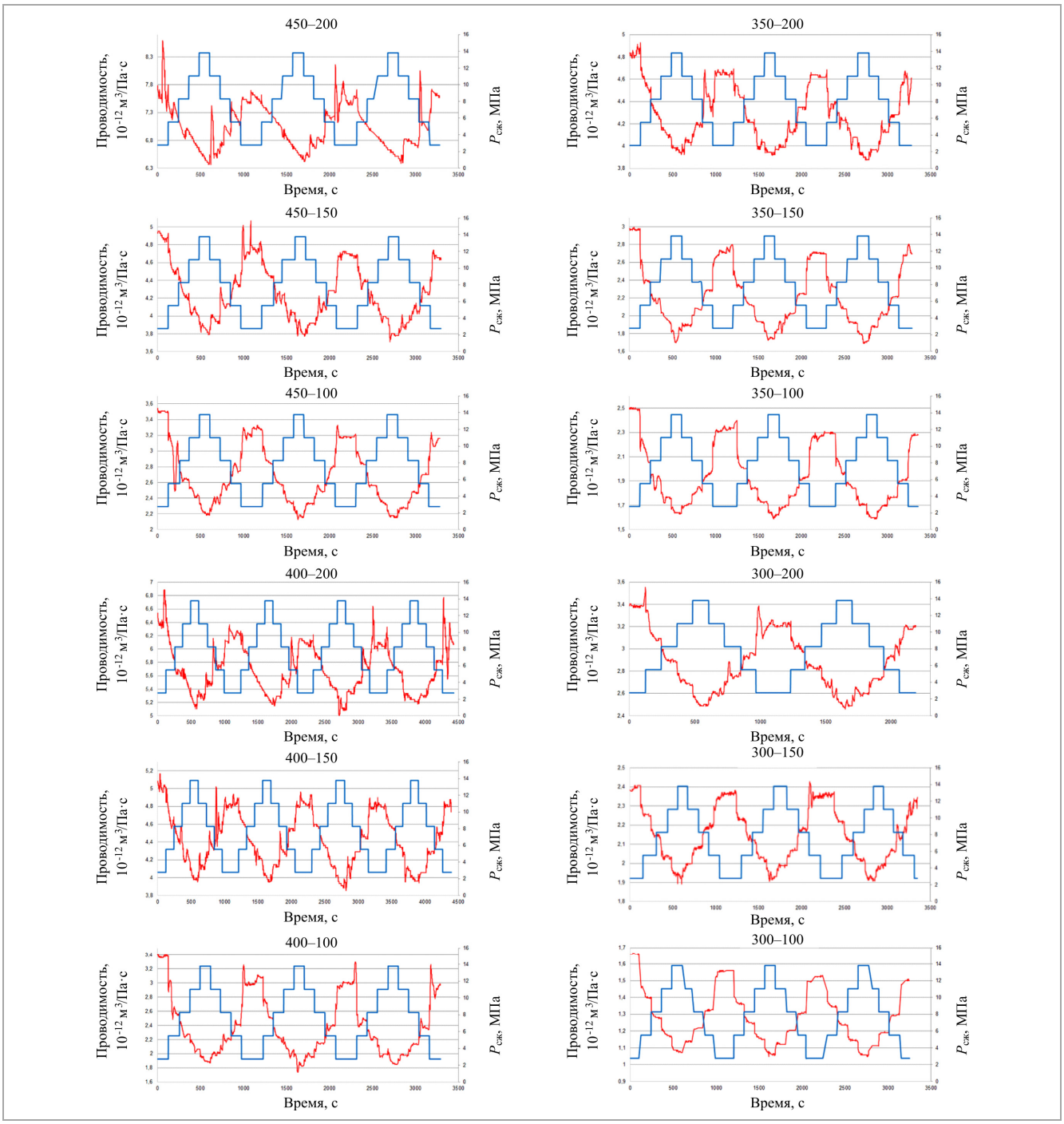


Рис. 5. Динамика проводимости от давления обжима для образцов с углубление по центру с разными размерами канавки

Результаты

По результатам исследований получена динамика проводимости образцов по времени и от циклического давления обжима (рис. 5). Графики данного типа были построены для каждого из образцов с различными размерами и расположением углубления. Обозначение образцов сводится к виду: $w \times h$, где w – ширина углубления, h – глубина.

Далее на основании графиков были выделены максимальные и минимальные значения проводимостей за весь период испытаний. По отношению полученных значений сделан анализ о степени деформации канала фильтрации, произошедшей в процессе испытаний, а именно, насколько в процентном соотношении изменилась проводимость образца. По полученным данным были построены соответствующие зависимости (рис. 6).

На графике для образцов с углублением по центру приведен анализ зависимости амплитуды изменения проводимости от размеров углубления образцов с углублением по центру. В ходе анализа выявлено, что наибольшим изменениям в ходе нагружения подвержены образцы с глубиной углубления 100 мкм (исключением является образец 350–150, имеющий также высокие показатели).

Кроме того, среди представленных образцов имеются те, чьи площади поперечного сечения углубления совпадают. К таковым относятся образцы 450–100 и 300–150, а также 400–150 и 300–200. Из них более подвержены деформации 450–100 и 300–200. Стоит заметить, что образец 450–100 имеет более прямоугольную форму углубления, то есть сечение углубления более вытянуто вдоль линии контакта половинок образца, а образец 300–200 имеет углубление, форма поперечного сечения которого более приближена к форме квадрата.

На графике для образцов с углублением сбоку также приведен аналогичный анализ, в ходе чего было выявлено, что наибольшим изменениям в ходе нагружения подвержены образцы с глубиной углубления 100 мкм.

Кроме того, среди представленных образцов имеются те, чьи площади поперечного сечения углубления совпадают. К таковым относятся образцы 450–100 и 300–150, а также 400–150 и 300–200. Из них более подвержены деформации 300–150 (менее вытянутая форма) и 300–200 (менее вытянутая форма). Для понимания, почему так происходит, обратимся к рисункам. Та часть, которая находится ближе к боковой поверхности образца, более подвержена к деформации, нежели центральная часть, поскольку сила, приложенная к боковой поверхности, в первую очередь действует на нее.

Если рассмотреть схему деформации образцов с углублением по центру и принять во внимание, что деформации, направленные вдоль линии соединения половинок, то можно объяснить почему образцы с формой углубления, более приближенной к квадратной, оказались более чувствительны к деформации. Если сравнивать прямоугольную и квадратную форму углубления, то при приложении одинаковых нагрузок у образцов с квадратной формой углубления происходит большее уменьшение полезной площади поперечного сечения углубления, нежели при прямоугольной форме. Для большего понимания процесса обратимся к схемам на рис. 7.

Деформации, направленные вдоль линии соединения двух половинок образцов, превосходят по величине перпендикулярные им, потому что с уменьшением глубины углубления увеличивается амплитуда изменения проводимости.

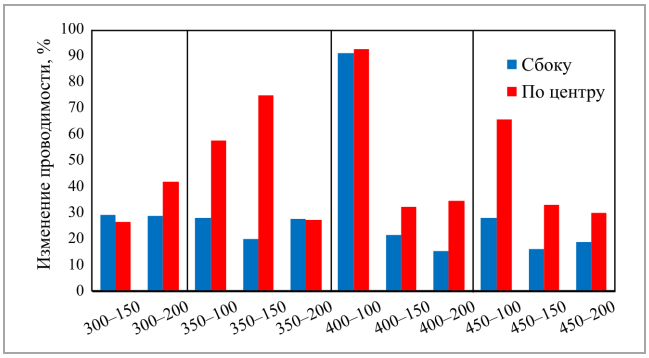


Рис. 6. Сравнение степени деформирования канала фильтрации для образцов при циклическом нагружении/разгрузке

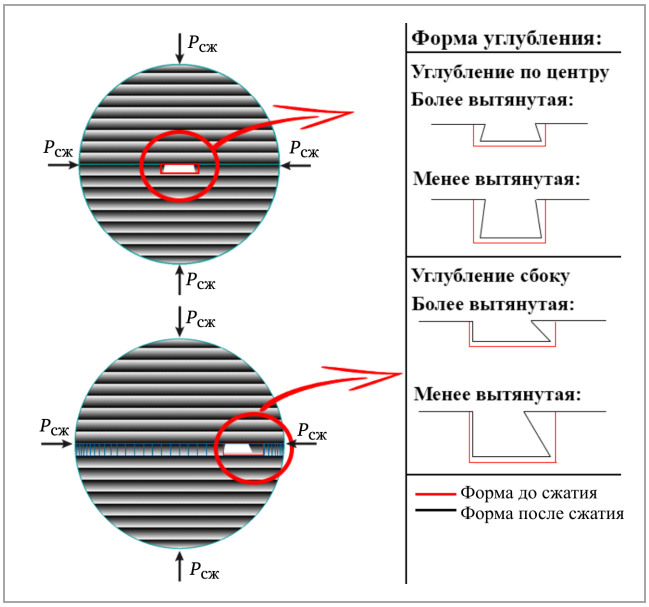


Рис. 7. Схематическое изображение деформирования углубления с различным расположением относительно образца

Изменение формы углубления с наименьшей глубиной в меньшей степени зависит от нагрузок, направленных перпендикулярно линии соединения половинок модели, следовательно, и величина общей деформации в первую очередь зависит от нагрузок, направленных параллельно линии соединения. Если сравнивать углубления с формой, более вытянутой вдоль линии соединения и менее вытянутой, то можно заметить, что для моделей с более вытянутой формой происходит большее уменьшение полезной площади относительно первоначальной формы.

Релаксация

Помимо испытаний при циклических нагрузках были проведены испытания при одном цикле нагружения/разгрузки с отслеживанием полноты восстановления первоначального состояния. Грфики динамики изменения проводимости при одном цикле нагружения/разгрузки приведены на рис. 8.

По данным рис. 9 видим, что при проведении одного цикла нагрузки/разгрузки деформации канала фильтрации более подвержены образцы с боковым расположением углубления. Связанно это с тем, что приложенная нагрузка оказывает большее влияние на внешнюю часть образца, а внутренняя часть, ближе к центру образца, менее подвержена деформации.

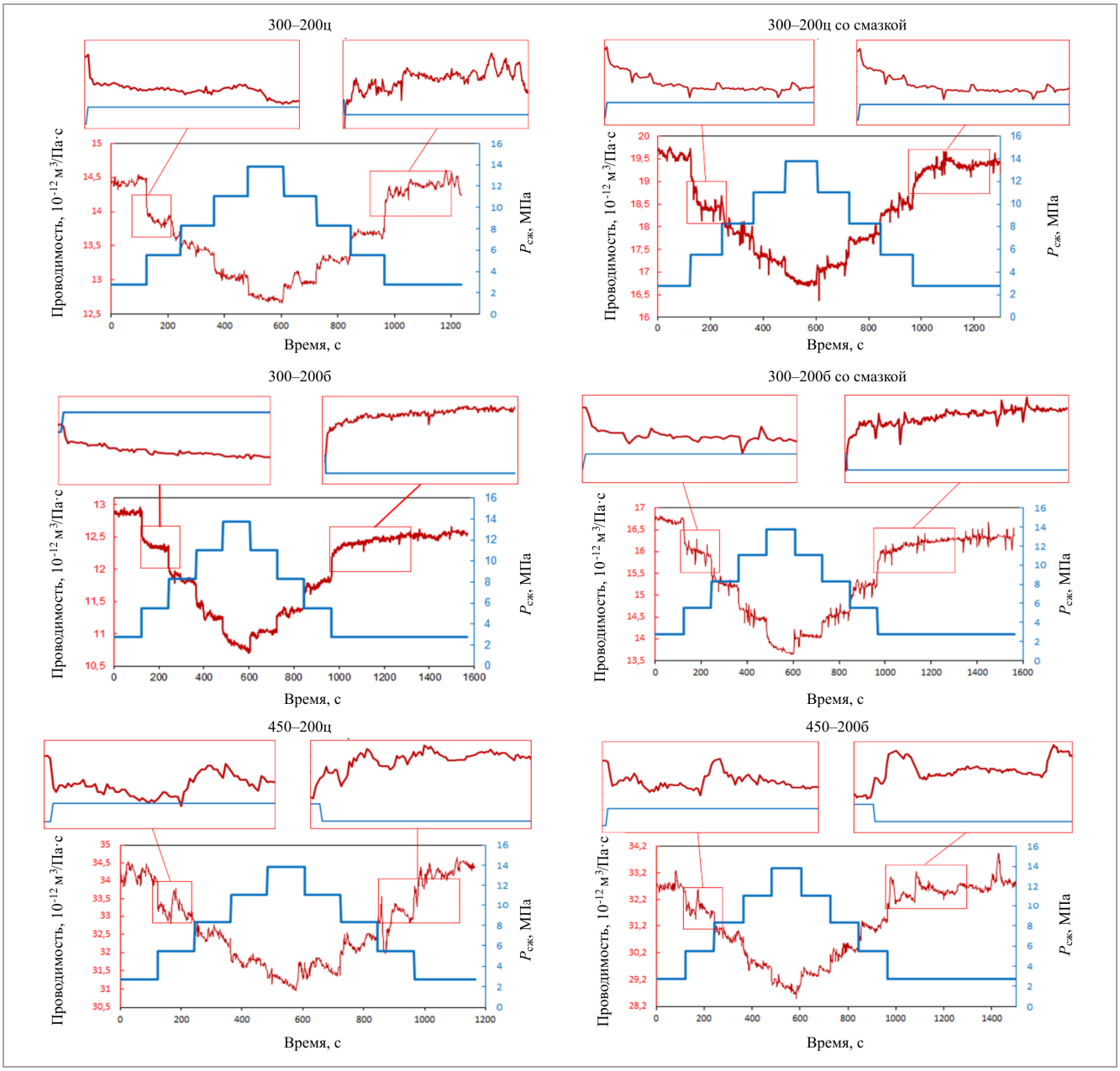


Рис. 8. Динамика изменения проводимости для образцов при одном цикле испытаний со смазкой и без

Испытания, проведенные со смазанной площадью контакта половинок образца, показали, что это влечет за собой большую деформацию канала фильтрации вне зависимости от его расположения, по сравнению с сухой площадью контакта. Это связано с тем, что слой смазочного материала позволяет снизить трение между двумя половинками, что, в свою очередь, способствует большей деформации образца, так как меньше противодействующих сил силе нагружения.

Рассматривая графики динамики изменения проводимости во время испытания, отчетливо видно такое явление, как возникновение волны деформации, – не мгновенное изменение параметров фильтрации, а скачки волнообразного характера. По этим данным мы можем судить о механике протекания процесса. В данном случае происходит скольжение двух половинок цилиндра друг относительно друга, причем это скольжение происходит не единовременно, а короткими промежутками, что и вызывает данное явление (рис. 10). Для подтверждения этого были проведены испытания при смазанной площади контакта половинок, результаты показали сглаживание линии волны деформации на графике, а также снижение амплитуды волны, что подтверждает мысль о именно таком механизме деформации.

Извилистость

Также с применением 3D-моделей были проведены исследования зависимости проводимости образца от извилистости канала фильтрации. Для этого были изготовлены образцы с размером углубления 400×200 мкм с различным коэффициентом извилистости (рис. 11).

По результатам фильтрационных испытаний были построены графики динамики изменения проводимости с течением всего времени поведения испытаний. Далее были выделены максимальные и минимальные значение проводимостей за весь период испытаний и построена зависимость этих значений от величины коэффициента извилистости.

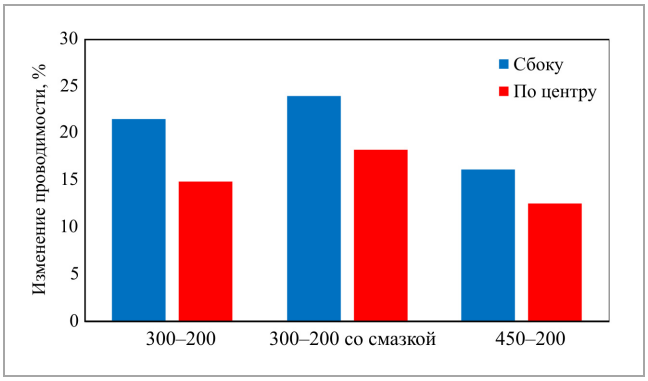


Рис. 9. Сравнение степени деформирования канала фильтрации для образцов при одном цикле нагружения/разгрузки

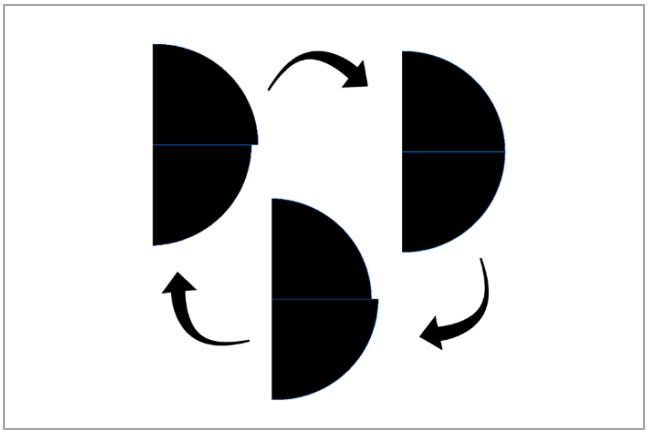


Рис. 10. Механизм деформации образцов с проскальзыванием половинок

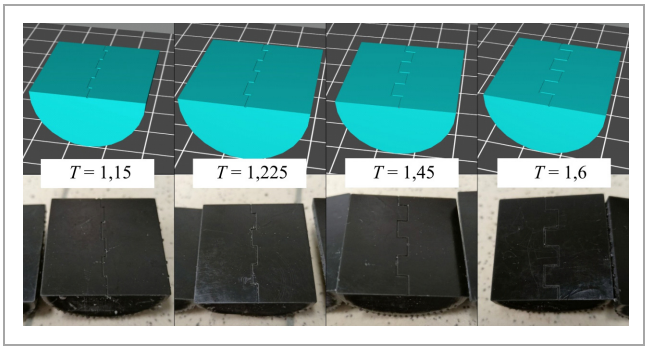


Рис. 11. Модели с различным значением коэффициента извилистости T

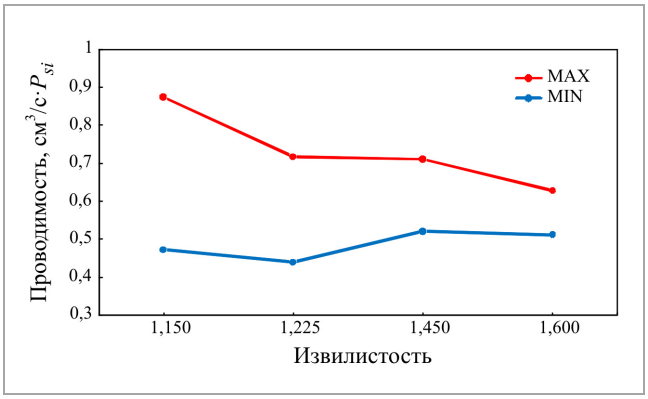


Рис. 12. Зависимость проводимости образцов 400–200 от коэффициента извилистости

По графику для образца 400–200 (рис. 12) можно видеть заметное снижение проводимости с увеличением коэффициента извилистости, что связано с возрастанием длины канала фильтрации. Также отмечается, что с увеличением коэффициента извилистости уменьшается степень деформации канала фильтрации, это можно заметить по разнице значений максимальной и минимальной проводимости для каждого из образцов. Данное явление подтверждает то, что канал фильтрации, находящийся в центре образца, более подвержен деформации, чем канал, размещенный ближе к боковой поверхности образца: если посмотреть на рисунок и обратить внимание на то, как расположены фильтрационные каналы, то можно заметить, что с увеличением коэффициента извилистости их часть смещается ближе к боковой поверхности.

Обсуждение

По итогам проведенных исследований можно заметить, что характер деформирования канала фильтрации, выполненного в виде углубления на одной из половинок цилиндра, зависит от формы его поперечного сечения и от расположения относительно оси цилиндра. Зависимость от расположения говорит нам об упругости материал: при боковом расположении углубления оно деформируется только с одной стороны – со стороны, ближайшей к боковой поверхности образца, а с противоположной стороны, вследствие большого расстояния до боковой поверхности, приложенная нагрузка компенсируется упругостью материала. При центральном расположении деформация происходит одинаково с обоих сторон углубления, но не в такой большой степени, как при боковом расположении. Поэтому деформации канала фильтрации при боковом расположении превосходят деформации при центральном расположении. Исключением является случай, когда нагружение/разгрузка проводились в один цикл: при меньшем времени нагружения прикладываемая нагрузка оказывает большее влияние на боковую часть образца.

Зависимость от формы говорит нам о том, что деформации в различных направлениях варьируются по их величине, несмотря на изотропный характер материала. Данное явление связано с наличием плоскости соприкосновения двух половинок цилиндра, что приводит к возникновению в данной области контактного трения и приводит к тому, что радиальные деформации, направленные параллельно линии соприкосновения, превосходят деформации, направленные перпендикулярно. Кроме того, наличие трения между половинками цилиндра приводит к неравномерному характеру деформирования углубления во времени. Данное явление связанно с тем, что смещение половинок друг относительно друга происходит в случае преодоление силы нагружения над силой трения, возникающей между ними, что объясняет скачкообразный характер графиков динамики деформирования. Такого рода явления могут встречаться и в массиве горных пород, и следует принимать во внимание, что процесс происходит не равномерно, а именно в виде ступенчатых изменений.

Эксперименты, проведенные с использованием моделей с каналами фильтрации с разными коэффициентами извилистости, также показали, что деформации в центральной части образца превосходят деформации в более отдаленной части.

На основании проведенных исследований для каждого из образцов были выделены максимальные

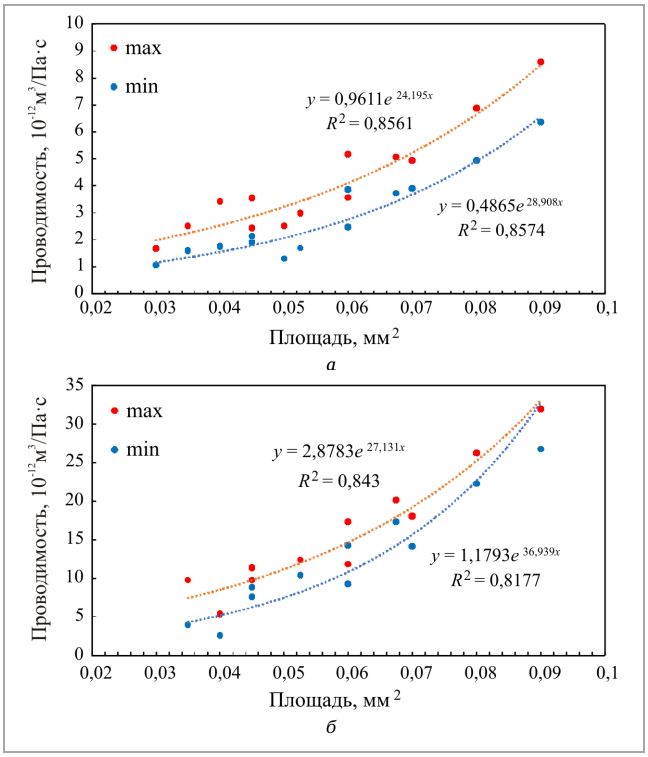


Рис. 13. Графики зависимости проводимости и проницаемости от площади углубления (углубление по центру): *а* – образцы с углубление по центру, *б* – образцы с углубление сбоку

и минимальные значения проводимостей за весь период испытания. По этим данным были построены графики зависимостей максимальных и минимальных значений от площади сечения углубления.

Графики, представленные на рис. 13, показывают, что данная методика исследования деформационного поведения материала позволяет судить о протекании процессов деформации образцов на основании данных фильтрационных исследований. Полученные зависимость могут быть использованы для интерпретации данных фильтрационных исследований в данные о деформации материала.

Заключение

Предложенный метод с использованием 3D-аналогов горных пород позволяет достоверно и с высокой точностью оценить деформацию в цилиндрических керновых образцах при воздействии всестороннего давления, так как материал образцов обладает изотропными свойствами, а фильтрационные каналы с регулируемыми размерами являются индикаторами деформаций.

По результатам экспериментальных исследований 3D-аналогов горных пород количественно оценено влияние неравномерного распределения напряжения на проводимость. При циклических нагрузках канал, находящийся по центру, сжимается в среднем на 60 % больше, чем находящийся сбоку. При одном же цикле нагружения значения сжимаемости канала по центру на 30 % меньше, чем канала сбоку.

На степень деформирования образца большее влияние оказывает количество циклов нагружения, поскольку при одном цикле нагружения деформации более повержена боковая часть образца.

При циклическом приложении нагрузки центральная часть образцов более подвержена деформации, поскольку с каждым последующим циклом нагружения происходит сужение канала фильтрации за счет проскальзывания половинок между собой. При разгрузке каналы в центральной части меньше раскрываются, так как запасенной внутренней упругой энергии недостаточно для преодоления трения и сдвига половинок.

Составная конструкция 3D-аналогов горных пород обусловливает превышение параллельно площадке соприкосновения деформаций над перпендикулярными. Такой тип конструкции имитирует наличие релаксационных трещин, присущих образцам горных пород, извлеченных с больших глубин и подверженных значительным напряжениям в естественных условиях залегания.

Библиографический список

1. Effect of fines migration on oil recovery from carbonate rocks / A. Almutairi [et al.] // Advances in Geo-Energy Research. – 2023. – Vol. 8, № 1. – P. 61–70.
2. Coal fines migration: A holistic review of influencing factors / F.U.R. Awan [et al.] // Adv Colloid Interface Sci. – 2022. – Vol. 301. – P. 102595.
3. Slow migration of mobilised fines during flow in reservoir rocks: Laboratory study / M.A. Oliveira [et al.] // J Pet Sci Eng. – 2014. – Vol. 122. – P. 534–541.
4. Effect of fines migration on oil–water relative permeability during two-phase flow in porous media / A. Zeinijahromi [et al.] // Fuel. – 2016. – Vol. 176. – P. 222–236.
5. Apparent Permeability Evolution Due to Colloid Migration Under Cyclic Confining Pressure: On the Example of Porous Limestone / E.V. Kozhevnikov [et al.] // Transp Porous Media. – 2023.
6. Cyclic confining pressure and rock permeability: Mechanical compaction or fines migration / E.V. Kozhevnikov [et al.] // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, № 11. – P. e21600.
7. Gas Permeability and Porosity Evolution of a Porous Sandstone Under Repeated Loading and Unloading Conditions / H.L. Wang [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2017. – Vol. 50, № 8. – P. 2071–2083.
8. Nair, V.V. A triple continuum transport model for colloid migration in fractured formations / V.V. Nair, S.G. Thampi // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 16, № 3. – P. 293–297.
9. Rock permeability evolution during cyclic loading and colloid migration after saturation and drying / E. Kozhevnikov [et al.] // Advances in Geo-Energy Research. – 2024. – Vol. 11, № 3. – P. 208–219.
10. The mechanism of porous reservoir permeability deterioration due to pore pressure decrease / E. Kozhevnikov [et al.] // Advances in Geo-Energy Research. – 2024. – Vol. 13, № 2. – P. 96–105.
11. Shcherbakova, I.S. The migration of Colloids as a Cause of Deterioration of Permeability in Porous Sandstones during Laboratory Investigations / I.S. Shcherbakova, E.V. Kozhevnikov, A.A. Shcherbakov // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. – 2024. - Т. 24, № 4. - P. 219–230. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.6
12. Cyclic loading and transport properties of porous rocks: experimental studies / E.V. Kozhevnikov, E.A. Gladkikh, M.A. Guzev [et al.] // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. - 2025. - Т. 25, № 1. - P. 27–35. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.1.4
13. Investigating the Influence of Reservoir Pressure on Porous Media Permeability: A Case Study of Fields in the Perm Region / E.V. Kozhevnikov, M.S. Turbakov, E.P. Riabokon [et al.] // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. - 2024. - Т. 24, № 2. - P. 78–85. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.5
14. Investigation of the Influence of Grain-Scale Heterogeneity on Strainburst Proneness Using Rock-Like Material / A. Klammer [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2023. – Vol. 56, № 1. – P. 407–425.
15. Schepp, L.L. Evidence for the Heterogeneity of the Pore Structure of Rocks from Comparing the Results of Various Techniques for Measuring Hydraulic Properties / L.L. Schepp, J. Renner // Transp Porous Media. – 2021. – Vol. 136, № 1. – P. 217–243.
16. Kerr, T. FDM 3D Printing / T. Kerr. – 2022. – P. 35–44.
17. Modeling rock specimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects / Q. Jiang [et al.] // Acta Mechanica Sinica. – 2016. – Vol. 32, № 1. – P. 101–111.
18. Comprehensive characterization of mechanical and physical properties of PLA structures printed by FFF-3D-printing process in different directions / G. Morettini [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 7, № 5. – P. 1111–1122.
19. Multifractal Characteristics of MIP-Based Pore Size Distribution of 3D-Printed Powder-Based Rocks: A Study of Post-Processing Effect / L. Kong [et al.] // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 599–618.
20. A New Way to Replicate the Highly Stressed Soft Rock: 3D Printing Exploration / Z. Wu [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2020. – Vol. 53, № 1. – P. 467–476.
21. LPore characterization of 3D-printed gypsum rocks: a comprehensive approach /. Kong [et al.] // J Mater Sci. – 2018. – Vol. 53, № 7. – P. 5063–5078.
22. Experimental Investigation into the Mechanical Behavior of Jointed Soft Rock Using Sand Powder 3D Printing / Y. Zhao [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2023. – Vol. 56, № 7. – P. 5383–5404.

23. An improved sand 3D printing method for better reproduction of high-strength and high-brittleness rock mechanical properties is proposed / K. Zhang [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 5037–5054.
24. Zhang, K. A new method to replicate high-porosity weak rocks subjected to cyclic freezing-thawing: Sand 3D printing and digital image correlation explorations / K. Zhang, N. Li // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2022. – Vol. 157. – P. 105174.
25. Sharafisafa, M. Experimental Investigation of Dynamic Fracture Patterns of 3D Printed Rock-like Material Under Impact with Digital Image Correlation / M. Sharafisafa, L. Shen // Rock Mech Rock Eng. – 2020. – Vol. 53, № 8. – P. 3589–3607.
26. Sharafisafa, M. Characterisation of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation / M. Sharafisafa, L. Shen, Q. Xu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 112. – P. 122–138.
27. Hasiuk, F.J. Testing Bulk Properties of Powder-Based 3D-Printed Reservoir Rock Proxies / F.J. Hasiuk // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 501–520.
28. Gomez, J.S. Experimental Investigation of the Mechanical Behavior and Permeability of 3D Printed Sandstone Analogues Under Triaxial Conditions / J.S. Gomez, R.J. Chalaturnyk, G. Zambrano-Narvaez // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 541–557.
29. Ardila, N. Wettability Measurements on 3D Printed Sandstone Analogues and Its Implications for Fluid Transport Phenomena / N. Ardila, G. Zambrano-Narvaez, R.J. Chalaturnyk // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 521–539.
30. A Comprehensive Experimental Study on Mechanical Behavior, Microstructure and Transport Properties of 3D-printed Rock Analogs / R. Song [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2020. – Vol. 53, № 12. – P. 5745–5765.
31. Strength test of 3D printed artificial rock mass with pre-existing fracture / Y. Wang [et al.] // Underground Space. – 2021. – Vol. 6, № 5. – P. 492–505.
32. Size Effect of Fractured Rock Mass Based on 3D Printed Model Testing / Y. Wang [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2022. – Vol. 55, № 11. – P. 7005–7020.
33. A computational model for stereolithography apparatus (SLA) 3D printing / N. Vidhu [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2023.
34. Ishutov, S. Establishing Framework for 3D Printing Porous Rock Models in Curable Resins / S. Ishutov // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 431–448.
35. A Systematic Investigation Into the Control of Roughness on the Flow Properties of 3D-Printed Fractures / T. Phillips [et al.] // Water Resour Res. – 2021. – Vol. 57, № 4.
36. Liquid Crystal Display (LCD) Printing: A Novel System for Polymer Hybrids Printing / L. Saitta [et al.] // Macromol Symp. – 2021. – Vol. 395, № 1.
37. High-accuracy DLP 3D printing of closed microfluidic channels based on a mask option strategy / Z. Yu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 127, № 7–8. – P. 4001–4012.
38. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography / J.B. Zhu [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 106. – P. 198–212.
39. Almetwally, A.G. 3D-Printing Replication of Porous Media for Lab-Scale Characterization Research / A.G. Almetwally, H. Jabbari // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6, № 4. – P. 2655–2664.
40. The Strength and Macro-mesoscopic Fracture Characteristics of 3D-printed Rock-like Specimens with Internal Parallel Joints / B. Wang [et al.] // Geotechnical and Geological Engineering. – 2022. – Vol. 40, № 6. – P. 3307–3324.
41. Numerical and Experimental Studies of Particle Settling in Real Fracture Geometries / P. Roy [et al.] // Rock Mech Rock Eng. – 2016. – Vol. 49, № 11. – P. 4557–4569.
42. Li, H. Imaging and characterizing fluid invasion in micro-3D printed porous devices with variable surface wettability / H. Li, T. Zhang // Soft Matter. – 2019. – Vol. 15, № 35. – P. 6978–6987.
43. Li, H. Imaging micro-scale multiphase flow in 3D-printed porous micromodels / H. Li, A. Raza, T. Zhang // RDPETRO 2018: Research and Development Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 9–10 May 2018. American Association of Petroleum Geologists, Society of Exploration Geophysicists, European Association of Geoscientists and Engineers, and Society of Petroleum Engineers, 2018. – P. 1–3.
44. Bacher, M. Three-Dimensional Printing of Macropore Networks of an Undisturbed Soil Sample / M. Bacher, A. Schwen, J. Koestel // Vadose Zone Journal. – 2015. – Vol. 14, № 2. – P. 1–10.
45. Manufacture of Bonded Granular Soil Using X-Ray CT Scanning and 3D Printing / S. Matsumura [et al.] // Geotechnical Testing Journal. – 2017. – Vol. 40, № 6. – P. 1000–1010.
46. Simulation and Validation of Porosity and Permeability of Synthetic and Real Rock Models Using Three-Dimensional Printing and Digital Rock Physics / E.R. Ibrahim [et al.] // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6, № 47. – P. 31775–31781.
47. Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks: Insights from 3D-printing, CT-scanning, and high-resolution numerical simulations / B. Li [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 13, № 5. – P. 1020–1032.
48. Contributions of 3D Printed Fracture Networks to Development of Flow and Transport Models / A. Suzuki [et al.] // Transp Porous Media. – 2019. – Vol. 129, № 2. – P. 485–500.
49. Size effects in the uniaxial compressive properties of 3D printed models of rocks: an experimental investigation / H. Wu [et al.] // Int J Coal Sci Technol. – 2022. – Vol. 9, № 1. – P. 83.
50. Effect of Load Vector Orientation on Uniaxial Compressive Strength of 3D Photoresin / E. Kozhevnikov [et al.] // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9, № 1. – P. 23.
51. Mitigating Scattering Effects in Light-Based Three-Dimensional Printing Using Machine Learning / S. You [et al.] // J Manuf Sci Eng. – 2020. – Vol. 142, № 8.

References

1. Almutairi A. et al. Effect of fines migration on oil recovery from carbonate rocks. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 61-70. DOI: 10.46690/ager.2023.04.06
2. Awan F.U.R. et al. Coal fines migration: A holistic review of influencing factors. *Adv Colloid Interface Sci.*, 2022, vol. 301, 102595 p. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102595
3. Oliveira M.A. et al. Slow migration of mobilised fines during flow in reservoir rocks: Laboratory study. *J Pet Sci Eng.*, 2014, vol. 122, pp. 534-541. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.08.019
4. Zeinijahromi A. et al. Effect of fines migration on oil-water relative permeability during two-phase flow in porous media. *Fuel*, 2016, vol. 176, pp. 222-236. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.066
5. Kozhevnikov E.V. et al. Apparent Permeability Evolution Due to Colloid Migration Under Cyclic Confining Pressure: On the Example of Porous Limestone. *Transp Porous Media*, 2023. DOI: 10.1007/s11242-023-01979-5
6. Kozhevnikov E.V. et al. Cyclic confining pressure and rock permeability: Mechanical compaction or fines migration. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 11, e21600 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21600
7. Wang H.L. et al. Gas Permeability and Porosity Evolution of a Porous Sandstone Under Repeated Loading and Unloading Conditions. *Rock Mech Rock Eng.*, 2017, vol. 50, no. 8, pp. 2071-2083. DOI: 10.1007/s00603-017-1215-1
8. Nair V.V., Thampi S.G. A triple continuum transport model for colloid migration in fractured formations. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 293-297. DOI: 10.1007/s12205-012-1336-8
9. Kozhevnikov E. et al. Rock permeability evolution during cyclic loading and colloid migration after saturation and drying. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 208-219. DOI: 10.46690/ager.2024.03.05
10. Kozhevnikov E. et al. The mechanism of porous reservoir permeability deterioration due to pore pressure decrease. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, vol. 13, no. 2, pp. 96-105. DOI: 10.46690/ager.2024.08.04
11. Shcherbakova I.S. I, Kozhevnikov E.V., Shcherbakov A.A. The migration of Colloids as a Cause of Deterioration of Permeability in Porous Sandstones during Laboratory Investigations. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 219-230. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.6
12. Kozhevnikov E.V., Gladkikh E.A., Guzev M.A. et al. Cyclic loading and transport properties of porous rocks: experimental studies. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 27-35. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.1.4
13. Kozhevnikov E.V., Turbakov M.S., Riabokon E.P. et al. Investigating the Influence of Reservoir Pressure on Porous Media Permeability: A Case Study of Fields in the Perm Region. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 78-85. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.5
14. Klammer A. et al. Investigation of the Influence of Grain-Scale Heterogeneity on Strainburst Proneness Using Rock-Like Material. *Rock Mech Rock Eng.*, 2023, vol. 56, no. 1, pp. 407-425. DOI: 10.1007/s00603-022-03078-1
15. Schepp L.L., Renner J. Evidence for the Heterogeneity of the Pore Structure of Rocks from Comparing the Results of Various Techniques for Measuring Hydraulic Properties. *Transp Porous Media*, 2021, vol. 136, no. 1, pp. 217-243. DOI: 10.1007/s11242-020-01508-8
16. Kerr T. FDM 3D Printing, 2022, pp. 35-44.
17. Jiang Q. et al. Modeling rock specimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, vol. 32, no. 1, pp. 101-111. DOI: 10.1007/s10409-015-0524-4
18. Morettini G. et al. Comprehensive characterization of mechanical and physical properties of PLA structures printed by FFF-3D-printing process in different directions. *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, vol. 7, no. 5, pp. 1111-1122. DOI: 10.1007/s40964-022-00285-8
19. Kong L. et al. Multifractal Characteristics of MIP-Based Pore Size Distribution of 3D-Printed Powder-Based Rocks: A Study of Post-Processing Effect. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 599-618. DOI: 10.1007/s11242-018-1152-9
20. Wu Z. et al. A New Way to Replicate the Highly Stressed Soft Rock: 3D Printing Exploration. *Rock Mech Rock Eng.*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 467-476. DOI: 10.1007/s00603-019-01926-1
21. Kong L. et al. Pore characterization of 3D-printed gypsum rocks: a comprehensive approach. *J Mater Sci.*, 2018, vol. 53, no. 7, pp. 5063-5078. DOI: 10.1007/s10853-017-1953-1
22. Zhao Y. et al. Experimental Investigation into the Mechanical Behavior of Jointed Soft Rock Using Sand Powder 3D Printing. *Rock Mech Rock Eng.*, 2023, vol. 56, no. 7, pp. 5383-5404. DOI: 10.1007/s00603-023-03346-8
23. K Zhang. et al. An improved sand 3D printing method for better reproduction of high-strength and high-brittleness rock mechanical properties is proposed. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 5037-5054. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.204
24. Zhang K., Li N. A new method to replicate high-porosity weak rocks subjected to cyclic freezing-thawing: Sand 3D printing and digital image correlation explorations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, vol. 157, 105174 p. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105174

25. Sharafisafa M., Shen L. Experimental Investigation of Dynamic Fracture Patterns of 3D Printed Rock-like Material Under Impact with Digital Image Correlation. *Rock Mech Rock Eng.*, 2020, vol. 53, no. 8, pp. 3589-3607. DOI: 10.1007/s00603-020-02115-1
26. Sharafisafa M., Shen L., Xu Q. Characterisation of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 112, pp. 122-138. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.012
27. Hasiuk F.J. Testing Bulk Properties of Powder-Based 3D-Printed Reservoir Rock Proxies. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 501-520. DOI: 10.1007/s11242-018-1221-0
28. Gomez J.S., Chalaturnyk R.J., Zambrano-Narvaez G. Experimental Investigation of the Mechanical Behavior and Permeability of 3D Printed Sandstone Analogues Under Triaxial Conditions. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 541-557. DOI: 10.1007/s11242-018-1177-0
29. Ardila N., Zambrano-Narvaez G., Chalaturnyk R.J. Wettability Measurements on 3D Printed Sandstone Analogues and Its Implications for Fluid Transport Phenomena. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 521-539. DOI: 10.1007/s11242-018-1176-1
30. Song R. et al. A Comprehensive Experimental Study on Mechanical Behavior, Microstructure and Transport Properties of 3D-printed Rock Analogs. *Rock Mech Rock Eng.*, 2020, vol. 53, no. 12, pp. 5745-5765. DOI: 10.1007/s00603-020-02239-4
31. Wang Y. et al. Strength test of 3D printed artificial rock mass with pre-existing fracture. *Underground Space*, 2021, vol. 6, no. 5, pp. 492-505. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.05.007
32. Wang Y. et al. Size Effect of Fractured Rock Mass Based on 3D Printed Model Testing. *Rock Mech Rock Eng.*, 2022, vol. 55, no. 11, pp. 7005-7020. DOI: 10.1007/s00603-022-03013-4
33. Vidhu N. et al. A computational model for stereolithography apparatus (SLA) 3D printing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2023, Vol. 9, pp 1605-1619. DOI: 10.1007/s40964-023-00525-5
34. Ishutov S. Establishing Framework for 3D Printing Porous Rock Models in Curable Resins. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 431-448. DOI: 10.1007/s11242-019-01297-9
35. Phillips T. et al. A Systematic Investigation Into the Control of Roughness on the Flow Properties of 3D-Printed Fractures. *Water Resour Res.*, 2021, vol. 57, no. 4. DOI: 10.1029/2020WR028671
36. Saitta L. et al. Liquid Crystal Display (LCD) Printing: A Novel System for Polymer Hybrids Printing. *Macromol Symp.*, 2021, vol. 395, no. 1. DOI: 10.1002/masy.202000254
37. Yu Z. et al. High-accuracy DLP 3D printing of closed microfluidic channels based on a mask option strategy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 127, no. 7-8, pp. 4001-4012. DOI: 10.1007/s00170-023-11769-4
38. Zhu J.B. et al. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 106, pp. 198-212. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.022
39. Almetwally A.G., Jabbari H. 3D-Printing Replication of Porous Media for Lab-Scale Characterization Research. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 2655-2664. DOI: 10.1021/acsomega.0c04825
40. Wang B. et al. The Strength and Macro-mesoscopic Fracture Characteristics of 3D-printed Rock-like Specimens with Internal Parallel Joints. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, vol. 40, no. 6, pp. 3307-3324. DOI: 10.1007/s10706-022-02094-w
41. Roy P. et al. Numerical and Experimental Studies of Particle Settling in Real Fracture Geometries. *Rock Mech Rock Eng.*, 2016, vol. 49, no. 11, pp. 4557-4569. DOI: 10.1007/s00603-016-1100-3
42. Li H., Zhang T. Imaging and characterizing fluid invasion in micro-3D printed porous devices with variable surface wettability. *Soft Matter*, 2019, vol. 15, no. 35, pp. 6978-6987. DOI: 10.1039/C9SM01182J
43. Li H., Raza A., Zhang T. Imaging micro-scale multiphase flow in 3D-printed porous micromodels. *RDPETRO 2018: Research and Development Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 9-10 May 2018. American Association of Petroleum Geologists, Society of Exploration Geophysicists, European Association of Geoscientists and Engineers, and Society of Petroleum Engineers*, 2018, pp. 1-3. DOI: 10.1190/RDP2018-41682309.1
44. Bacher M., Schwen A., Koestel J. Three-Dimensional Printing of Macropore Networks of an Undisturbed Soil Sample. *Vadose Zone Journal*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 1-10. DOI: 10.2136/vzj2014.08.0111
45. Matsumura S. et al. Manufacture of Bonded Granular Soil Using X-Ray CT Scanning and 3D Printing. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, vol. 40, no. 6, pp. 1000-1010. DOI: 10.1520/GTJ20160273
46. Ibrahim E.R. et al. Simulation and Validation of Porosity and Permeability of Synthetic and Real Rock Models Using Three-Dimensional Printing and Digital Rock Physics. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, no. 47, pp. 31775-31781. DOI: 10.1021/acsomega.1c04429
47. Li B. et al. 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, vol. 13, no. 5, pp. 1020-1032. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.007
48. Suzuki A. et al. Contributions of 3D Printed Fracture Networks to Development of Flow and Transport Models. *Transp Porous Media*, 2019, vol. 129, no. 2, pp. 485-500. DOI: 10.1007/s11242-018-1154-7
49. Wu H. et al. Size effects in the uniaxial compressive properties of 3D printed models of rocks: an experimental investigation. *Int J Coal Sci Technol.*, 2022, vol. 9, no. 1, 83 p. DOI: 10.1007/s40789-022-00556-3
50. Kozhevnikov E. et al. Effect of Load Vector Orientation on Uniaxial Compressive Strength of 3D Photoresin. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, vol. 9, no. 1, 23 p. DOI: 10.3390/jmmp9010023
51. You S. et al. Mitigating Scattering Effects in Light-Based Three-Dimensional Printing Using Machine Learning. *J Manuf Sci Eng.*, 2020, vol. 142, no. 8. DOI: 10.1115/1.4046986

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края (проект № СЭД-26-08-08-28).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.