

## Цифровой анализ керна: изменение фильтрационно-емкостных свойств коллектора ПХГ после геомеханического воздействия

В.В. Химуля,<sup>\*</sup> С.О. Барков<sup>†</sup>

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН  
Россия, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, 101*

(Поступила в редакцию 07.06.2024; подписана в печать 08.07.2024)

В статье представлены результаты серии комплексных исследований остаточных изменений фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов подземного хранилища газа, вызванных воздействием неравномерного поля напряжений в ходе моделирования управляемого изменения давления на забое скважины. В рамках цифровых исследований керна материала были получены разномасштабные снимки компьютерной томографии, на базе которых были созданы трехмерные модели порового пространства пород, выполнен анализ однородности структуры и состава породы, после чего проведен геометрический, статистический анализ порового пространства, а также численное моделирование процессов фильтрации в породе для оценки проницаемости до и после механических испытаний. Выполнено измерение пористости пород, проведена оценка распределения пор по размерам, а также анализ фильтрационных свойств коллектора. Построены пространственные распределения скоростей потока фильтрации и изменения градиента давления. В рамках геомеханических испытаний проведено изучение процессов деформирования и фильтрации в горных породах под действием реальных напряжений, возникающих в скважинах при контролируемом изменении давления в скважине. Показана тенденция к незначительному уменьшению значений открытой пористости, проницаемости и изменению геометрии пор после проведенного неравномерного трехосного нагружения. Сделаны выводы об однородности и высокой связности порового пространства рассматриваемых пород. Показано отсутствие существенных необратимых изменений фильтрационно-емкостных свойств пород. Характеристики, полученные в результате цифрового анализа, показали очень хорошее соответствие с результатами полевых и лабораторных измерений. Результаты работы и примененные методики могут быть использованы при создании и корректировке моделей пласта-коллектора, а также разработке эксплуатационной модели ПХГ. Представленная техника анализа данных РКТ позволяет упростить получение данных о характеристиках керна материала, а также расширить результаты лабораторных и натуральных исследований свойств пластов.

PACS: 91.60.-x      УДК: 550.8.053

Ключевые слова: фильтрационно-емкостные свойства, пористость пород-коллекторов, проницаемость горных пород, рентгеновская компьютерная томография (РКТ), цифровой анализ керна, численное моделирование фильтрационных потоков, геометрия порового пространства.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день подземные хранилища газа (ПХГ) активно используются во всем мире для бесперебойного обеспечения газом потребителей и уравнивания сезонного спроса на газ. В основном ПХГ создаются в водоносных пластах, а также в выработанных газовых, нефтяных и газоконденсатных месторождениях. Для пород-коллекторов ПХГ наиболее важным являются высокие значения таких характеристик, как пористость и проницаемость. При этом из-за цикличности в работе ПХГ особого внимания требует изучение изменения данных характеристик в процессе эксплуатации объекта.

В последние десятилетия в ряде экспериментальных, теоретических и численных исследований изучались причины неравномерности распределения фильтрационных свойств в пластах [1]. Согласно мелко-

штабным исследованиям основными причинами, влияющими на проницаемость, считаются ориентация зерен матрицы породы, пор [2] и трещин [3, 4], которые возникают в пласте на стадии формирования породы или под действием существующих полей напряжений [5].

Известно, что неоднородность строения коллектора и распределения фильтрационных свойств в той или иной степени присущи большинству месторождений [6]. Таким образом учет изменения проницаемости пород по всему объему пласта играет важную роль для обеспечения оптимальной разработки новых месторождений и повышения нефте- и газоотдачи месторождений на поздних стадиях эксплуатации. Для построения гидродинамических моделей пластов, подсчета запасов углеводородов и прогнозирования процессов фильтрации также необходимо учитывать пористость пород-коллекторов, обладать информацией о размере, распределении и геометрии пор [7]. Следует отметить, что изменение структуры пустотного пространства пород-коллекторов является одним из основных факторов, влияющих на увеличение степени неоднородности фильтрационных сред [8].

\* khim@ipmnet.ru

† barkov.sviat@yandex.ru

До недавнего времени проницаемость горных пород определялась по результатам лабораторных исследований или косвенно по корреляции с другими свойствами пород, в том числе с пористостью [9]. Сегодня одним из наиболее перспективных подходов к изучению фильтрационно-емкостных свойств горных пород является численное моделирование процессов фильтрации на трехмерных цифровых структурах, полученных с помощью рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) [10]. В совокупности с развитием вычислительных методов, это позволило напрямую моделировать течение флюидов через реальное пустотное пространство в пористой среде [11]. Для этого используется ряд различных решателей, каждый из которых имеет свои преимущества для различных типов сред, требует определенных вычислительных мощностей, которые обеспечивают необходимую скорость расчётов. Использование методов РКТ существенно дополняет прямые лабораторные исследования и не нарушает целостность и внутреннюю структуру образцов горных пород, что особенно актуально в условиях постоянной ограниченности количества кернового материала для исследований. Визуализация пустотного пространства горных пород в сочетании с моделированием фильтрационных процессов является важным инструментом, используемым в нефтегазовой промышленности для прогнозирования пористости и проницаемости пород-коллекторов, а также их распределения в продуктивных пластах нефтегазовых месторождений [12, 13].

Одной из основных проблем при эксплуатации ПХГ [14] является изменение фильтрационных свойств пласта при периодических циклах закачки и отбора газа, что приводит к периодическому изменению пластового давления. Такой режим работы приводит к изменению напряженно-деформированного состояния пласта, что оказывает влияние на его фильтрационные свойства. При циклической эксплуатации ПХГ в окколесквинной зоне также может происходить ухудшение фильтрационных свойств, вызванное закупориванием фильтрационных каналов мельчайшими частицами породы и капельками масла, содержащимися в закачиваемом газе [15], что приводит к образованию песчаных пробок. Изучение фильтрационных свойств пород-коллекторов и их зависимости от поля напряжений в призабойной зоне может стать ключевым шагом к обеспечению безопасной и эффективной эксплуатации ПХГ.

В данной работе представлены результаты исследований остаточных изменений фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов ПХГ после проведения на них экспериментов по прямому физическому моделированию напряженно-деформированных состояний, реально возникающих в окрестности скважин в ходе изменения давления на забое. Для реализации данного исследования были выполнены крупно- и мелкомасштабные томографические сканирования пород-коллекторов ПХГ при помощи высоко разрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray

СТ-MINI ИПМех РАН [16] до и после проведения геомеханических испытаний. На основе данных компьютерной томографии созданы 3D-модели исследуемых пород, выполнен цифровой анализ порового пространства, включающий определение неоднородностей структуры, измерение пористости, а также численное моделирование потока фильтрации флюида для оценки изменений проницаемости пород. В работе [17] представлено подробное описание первого этапа исследований, включающего серию геомеханических испытаний на уникальной установке истинно трехосного нагружения ИСТНН для экспериментального изучения процессов фильтрации, деформирования и разрушения пород под действием реальных напряжений, возникающих в скважинах при контролируемом понижении забойного давления.

## 1. ОБОРУДОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Исследуемое ПХГ расположено в пределах Восточно-Европейской платформы. По литологическому составу коллектор относится к песчано-алевритовым отложениям с редкими включениями глинистых пород. Согласно имеющимся данным натурных исследований, пласт-коллектор очень неоднороден по фильтрационно-емкостным свойствам. По данным локальной гидроразведки и каротажа скважин, открытая пористость пласта изменяется по всем скважинам месторождения от 13 до 30% и в среднем составляет 25.3%, а проницаемость существенно различается по глубине и площади и колеблется в интервале от приблизительно 0 до 8.7 Д.

В данной работе изучался керновый материал из высокопроницаемых пластов-коллекторов, представляющих основной интерес для разработки и эксплуатации объекта. Исследовались породы водоносного горизонта с глубиной залегания около 1200 м. Образцы представлены однородным, высокопористым, крупнозернистым, слабосцементированным песчаником с низкой прочностью (рис. 1). По данным каротажа, пористость коллектора на данной глубине варьируется от 24 до 27.4%. По данным предварительных исследований пористость была также оценена классическими методами с созданием в образцах порового давления до 13 МПа и составила от 21.4 до 29.4% для данного интервала из разных скважин.

Из кернового материала были изготовлены образцы для геомеханических и томографических исследований. Для томографических исследований высоко разрешающего предпочтительно использовать образцы наименьшего размера. Поэтому для предварительного сканирования были отобраны части керна произвольной формы с линейными размерами 5–20 мм. Для сканирования после испытаний использовались отдельные части испытанных образцов.

Для проведения исследований на основе методов рентгеновской компьютерной томографии использовал-



Рис. 1. Кубические образцы исследуемого ПХГ, изготовленные из кофейного материала

ся высокоразрешающий рентгеновский микротомограф ProCon X-Ray CT-MINI Института проблем механики РАН. Рентгеновская трубка данного томографа имеет регулируемый диапазон выходного напряжения от 20 кВ до 90 кВ и регулируемый диапазон тока от 10 мкА до 160 мкА. Максимальная выходная мощность трубки составляет 8 Вт. Минимальный размер фокусного пятна составляет 5 мкм.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основу методики исследований, проводимых с помощью данного томографа, составляют три основных этапа: сканирование исследуемых образцов горной породы, компьютерная реконструкция изображений и создание цифровых 3D-моделей образцов, обработка данных и цифровой анализ. На первом этапе образец помещается в камеру между источником и детектором и закрепляется на специальном держателе. Затем проводится калибровка и подбор параметров сканирования для наилучшего качества съемки исследуемого материала: разрешение изображения, фильтр, шаг угла поворота при сканировании образца, время экспозиции и т.д. Во время сканирования источник и детектор неподвижны, а образец вращается вокруг своей оси. Результатом данного этапа является получение набора двумерных проекций образца, который на следующем этапе обрабатывается (реконструируется) в 3D-модель образца с помощью специализированного программного обеспечения VGSTUDIO. Для проведения третьего этапа реконструированный набор данных (3D-модель образца) загружается в специализированное программное обеспечение Geodict Math2Market GmbH [18], которое позволяет проводить обработку 3D-изображений,

осуществлять моделирование и визуализацию фильтрационных процессов, определять свойства материалов. В дополнение к основным возможностям обработки изображений GeoDict предлагает различные методы сегментации изображений и способы моделирования однофазного и двухфазного течения жидкости в пористых средах.

Перед проведением геомеханических испытаний было проведено полномасштабное сканирование образцов кубической формы с ребром 40 мм для качественного анализа неоднородностей, примесей, каверн и начального трещинообразования. Затем было проведено сканирование с высоким разрешением небольших образцов произвольной формы для получения детальной картины порового пространства и дальнейшего моделирования. Параметры сканирования кубических образцов были следующими: напряжение источника 90 кВ, сила тока 89 мкА, время экспозиции 0.32 с, количество усреднений для каждой проекции 10, шаг поворота проекций  $0.125^\circ$ , размер вокселя 21.146 мкм. Сканирование с высоким разрешением малых образцов произвольной формы проводилось со следующими параметрами: напряжение источника 90 кВ, сила тока 89 мкА, время экспозиции 0.22 с, количество усреднений для каждой проекции 10, шаг поворота проекций  $0.125^\circ$ , размер вокселя 7.883 мкм.

После сканирования и реконструкции всех снимков была проведена детальная обработка изображений в специализированном ПО Geodict. Ко всем 3D-снимкам была применена следующая обработка: корректировка распределения яркости, разворот и обрезка изображения, фильтрация для удаления артефактов и шумов, а также фильтрация для сглаживания изображения и упрощения процедуры сегментации [19]. Сегментация изображения, т.е. разделение вещества на отдельные фазы проводилась с помощью порогового метода и метода Otsu. На рис. 2 представлены этапы обработки изображения: исходное изображение, применение коррекции яркости и фильтра Non-Local Means, сегментация.

На основе созданных цифровых 3D-структур образцов были проведены расчеты пористости с помощью специального модуля GeoDict – PoroDict [20]. Данный модуль позволяет определить общее количество пор, а также количество полностью или частично открытых пор в выбранном внутри образца направлении. Модуль также позволяет рассчитать полную пористость образца. Для каждого образца анализ проводился вдоль направления напластования.

Поля скоростей потока фильтрации рассчитывались с помощью специального модуля GeoDict – FlowDict [21]. Модуль FlowDict прогнозирует эффективные свойства материала путем моделирования фильтрационных потоков и постобработки результатов моделирования. FlowDict прогнозирует среднюю физическую скорость потока для заданного перепада давления [22] и рассчитывает проницаемость пористой структуры на основе закона Дарси. Дан-

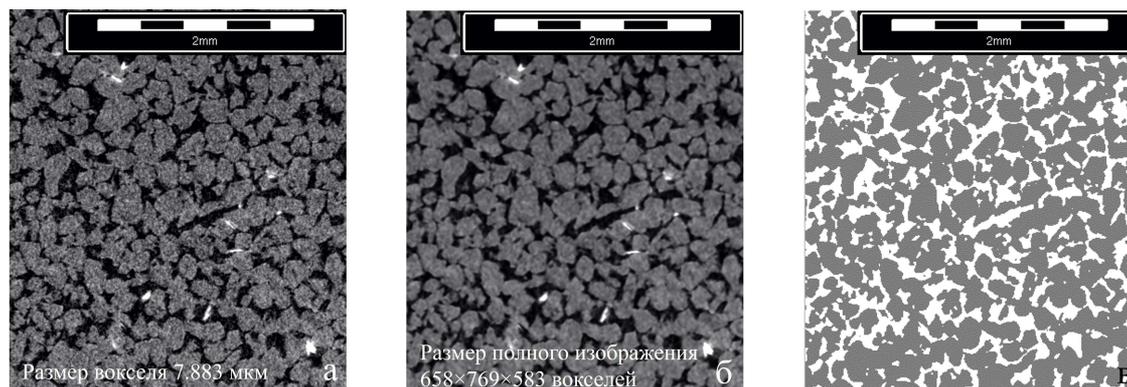


Рис. 2. Этапы обработки изображения: *a* — исходное изображение, *б* — применение коррекции яркости и фильтра Non Local Means, *в* — сегментация

ный модуль позволяет рассчитывать несжимаемые стационарные ньютоновские потоки на основе уравнений Навье–Стокса с различными аппроксимациями. FlowDict прост в освоении и активно используется исследователями по всему миру для моделирования течений в широком спектре материалов, включая уголь [23], кокс [24], волокнистые среды [25] и нетканые материалы [26].

Для численного моделирования фильтрационных процессов в данной работе использовалось приближение Стокса, задающее уравнения неразрывности и движения флюида [27]. Для заданного перепада давления на входе и выходе из образца определяется поле скоростей потока фильтрации, после чего производился расчет проницаемости на основе закона Дарси [28]. В расчетах использовался решатель LIR [29] с неравномерной адаптивной сеткой. При моделировании течения задавались параметры, соответствующие лабораторным измерениям проницаемости: фильтрующееся вещество — воздух (плотность и динамическая вязкость задавались равными  $1.204 \text{ кг/м}^3$  и  $1.834 \times 10^{-5} \text{ кг/(мс)}$ ), температура задавалась равной  $20^\circ\text{C}$ ). Отметим, что при решении уравнений в приближении Стокса с помощью любого линейного решателя (EJ, SimpleFFT, LIR) тензор проницаемости не зависит от приложенного перепада давления [28]. Таким образом, проницаемость считается свойством материала [30]. По этой причине для уменьшения средней скорости потока и ускорения расчетов задавался перепад давления в 100 Па. Таким образом, число Рейнольдса во всех случаях оставалось значительно меньше 1 ( $Re = 0.023$  для среднего диаметра пор 40 мкм).

Использовались периодические граничные условия в направлении потока [31]. Для этих условий анализируемая структура периодически повторяется в направлении движения потока. Области входа и выхода флюида в 10 вокселей каждая добавлялись до и после расчетной области для гомогенизации потока между периодическими структурами [32]. В тангенциальном направлении были выбраны симметричные граничные

условия, при которых структура зеркально отражается на границе.

Для совокупного статистического анализа однородности распределения пор в образцах применялись алгоритмы специального модуля GeoDict – MatDict [33]. Рассматриваемые структуры разделялись на подвыборки (домены) кубической формы с гранью 10 вокселей, после чего для каждого домена рассчитывалась средняя пористость на основании подсчета принадлежащих пустотному пространству вокселей. После чего строилась гистограмма объемной доли доменов с фиксированной пористостью.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

После реконструкции набора полномасштабных снимков исследуемых образцов было обнаружено, что порода практически однородна на макроуровне и не имеет различных пустот, каверн. В материале присутствуют точечные неравномерно рассеянные примеси более плотного вещества, но их содержание не превышает 1.9%. Поровое пространство внешне однородно, начальная макротрещиноватость отсутствует, явных различий в плотности материала по глубине и залеганию не обнаружено. На снимках некоторых образцов до испытаний заметны единичные следы движения пластового флюида. Они хорошо различимы по ориентированному вкраплением кристаллического вещества и металлов (рис. 3).

Наличие таких следов позволяет с высокой точностью определить направление залегания пород по отношению к оси керна. Существование таких вкраплений в некоторых образцах позволяет сделать вывод о том, что движение флюидов в пласте преимущественно горизонтальное, с небольшими отклонениями до  $5^\circ$ . Данная информация позволила в дальнейшем выполнять расчет пористости и проницаемости в направлениях, максимально приближенных к направлению напластования в породе, вдоль которого осуществлялись лабо-

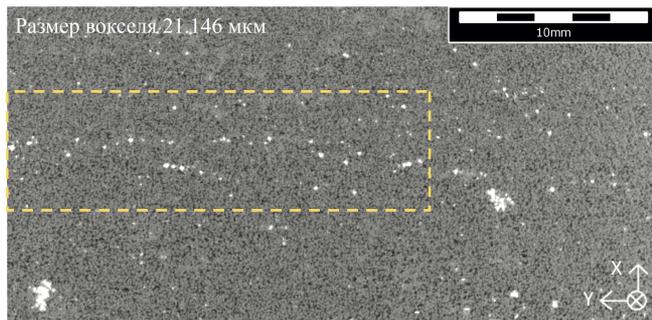


Рис. 3. Часть проекции полномасштабного снимка: следы примесей, оставленные движением флюида (черным отображены поры, серым — материал матрицы, белым — более плотные вещества примесей)

раторные измерения проницаемости. Для этого ориентация мелкомасштабных снимков образцов (имеющих произвольную форму) корректировалась в соответствии с обнаруженными направлениями распределения примесей в породе.

Из оставшегося после подготовки кубических образцов материала керна образцы произвольной формы были использованы для первичного изучения структуры порового пространства. Поскольку количество керна материала было ограничено, образцы для сканирования имели произвольную форму и размер. Для наиболее полного охвата внутреннего пространства, итоговые области 3D-изображений были некубической формы в силу произвольности формы сканируемых образцов. Сканирование и обработка изображений проводились в соответствии с ранее описанной методикой. Для всех образцов были рассчитаны открытая и закрытая пористости, проницаемость и проведен анализ размеров пор. На основе созданных структур было проведено численное моделирование фильтрационных потоков вдоль выбранных осей образцов с целью оценки степени анизотропии проницаемости. Параметры моделирования были одинаковыми для всех образцов и описаны ранее. Сводка результатов цифрового анализа свойств горных пород до испытаний и после испытаний приведена в таблице.

Согласно результатам исследований данная порода характеризуется высокими значениями пористости (около 30%) и проницаемости, что характерно для водоносных горизонтов и является основным критерием при выборе месторождения для создания на его основе ПХГ. Как видно из таблицы, значения пористости и проницаемости лишь незначительно изменялись для образцов, взятых из разных частей керна материала, что свидетельствует об однородности свойств исследуемой области пласта. Низкие значения закрытой пористости подтверждают сделанный на основе первичных снимков образцов вывод об отсутствии макроскопических каверн и неоднородностей поровой структуры. Эти данные в дальнейшем использовались для сравнения с количественными характеристиками поро-

ды после проведения физического моделирования.

По результатам численного моделирования процесса фильтрации были получены значения проницаемостей образцов, а также построены пространственные распределения скоростей потока и перепада давления при фильтрации. На рис. 4 представлена визуализация распределения скорости фильтрационного потока в характерном образце до проведения геомеханических испытаний и пространственное распределение перепада давления в ходе фильтрации.

Как видно из рис. 4, потоки фильтрации равномерно распределены по объему образца, без преобладания выделенных направлений и скопления в локальных расширениях. Скорость потока изменяется равномерно в ходе фильтрации, что говорит о правильной геометрии фильтрационных каналов. Градиент давления изменяется линейно и одинаково вдоль направления фильтрации, т.е. поток не встречает на пути локально распределенных зон уплотнения или разуплотнения. Полученные численные оценки хорошо совпадают с экспериментально измеренными значениями проницаемости. Это свидетельствует о точности методов обработки и сегментации.

После предварительного сканирования была проведена серия механических испытаний на установке ИСТНН. В ходе экспериментов проводилось физическое моделирование реальных напряженных состояний, возникающих на стенках скважины в ходе управляемого понижения давления на забое скважины. При этом к граням кубических образцов прикладывались неравномерные нагрузки, в ходе опытов регистрировались деформации и проницаемость пород. Нагружение состояло из нескольких этапов: на первом этапе моделировались пластовые условия, т.е. осуществлялось всестороннее сжатие; к концу второго этапа воссоздавалось неравномерно напряженное состояние, возникающее на стенках скважин, согласно решению задач Ламе и Кирша; на третьем и четвертом этапе моделировалось изменение пластового давления в ходе закачки и отбора газа, а также моделирование управляемого изменения давления на забое скважины. Более детально методика и результаты аналогичных механических экспериментов, проводимых в рамках смежных исследований пород данного ПХГ, были описаны в [15, 17]. Начальная измеренная проницаемость испытанных образцов находилась в диапазоне 7–10.7 Д. В ходе всестороннего сжатия при моделировании пластовых условий проницаемость ожидаемо снижалась, составляя от 6.5 до 9.4 Д, т.е. наблюдалось уменьшение проницаемости составляло от 5 до 17%. В ходе создания неравномерного напряженного состояния и роста касательных напряжений при моделировании процесса понижения давления в скважине, проницаемость уменьшалась незначительно (не более 5%) вплоть до разрушения породы. После проведения испытаний, отдельные части образцов были повторно просканированы для изучения остаточных изменений порового пространства. Методика сканирования и обработки изоб-

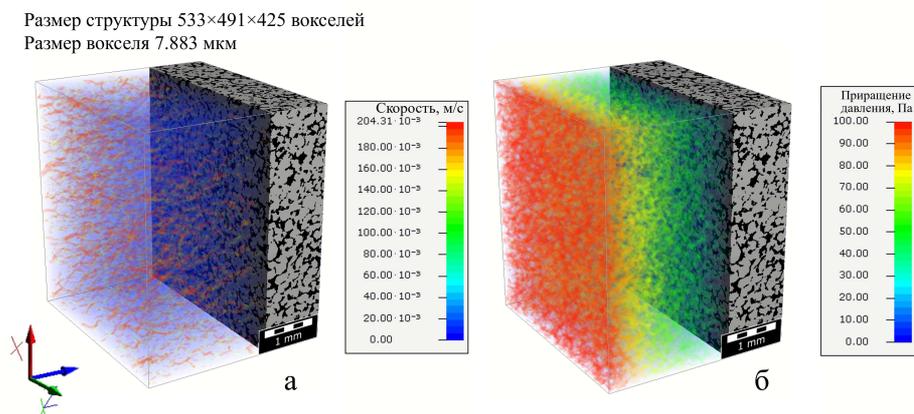


Рис. 4. *а* — Визуализация распределения скорости фильтрационного потока в образце до нагружения, *б* — Пространственное распределение перепада давления в ходе фильтрации

Таблица. Сводка результатов цифрового анализа свойств горных пород до и после испытаний

	Проницаемость, Д		Открытая пористость, %		Закрытая пористость, %	
	Диапазон	Ср. знач.	Диапазон	Ср. знач.	Диапазон	Ср. знач.
До испытаний	6.92-9.16	7.89	29.75-32.49	30.80	0.03-0.06	0.04
После испытаний	6.34-8.39	7.15	29.13-31.72	30.36	0.07-0.11	0.08

ражений была аналогична описанной ранее. Для образцов были проанализированы пористость, распределение пор по размерам, распределение путей фильтрации и проведено численное моделирование фильтрационных процессов для оценки проницаемости. Результаты повторных цифровых исследований представлены в таблице.

Несмотря на регистрируемые значительные деформации образцов в ходе испытаний, а также проявление деформирования ползучести перед разрушением, остаточные изменения фильтрационно-емкостных свойств исследуемых пород практически отсутствуют. Средняя открытая пористость уменьшилась менее, чем на 1.5%. Среднее значение закрытой пористости увеличилось в 2 раза, но остается по-прежнему ничтожно малым (менее 0.1%) и практически не оказывает влияния на изменение открытой пористости. Диапазон значений проницаемости, полученных в ходе численного моделирования, а также среднее значение проницаемости также уменьшилось в диапазоне до 9.4%. Т.е. остаточные изменения проницаемости оказываются более выражены, чем изменение пористости.

Визуализация поля скоростей фильтрационного потока для всех образцов после испытания имеет схожий вид и не демонстрирует существенных изменений распределения потоков. На рис. 5 в качестве примера по-

казано распределение скоростей потока для одного из образцов после испытаний, а также пространственная визуализация перепада давления при моделировании процесса фильтрации.

Как видно из рис. 5, движение жидкости происходит однородно по всему объему образца, без видимых непроницаемых зон или появившихся локальных уплотнений. Изменение давления в ходе фильтрации происходит так же линейно вдоль направления потока, что говорит о сохранении однородности и связности порового пространства. Таким образом, значимых геометрических изменений порового пространства не наблюдается.

Для статистического совокупного анализа распределения пористости исследуемые модели образцов были разделены на кубические домены с ребром 10 вокселей, после чего проводилось измерение пористости каждого домена. На основе проведенных измерений построены гистограммы пористости в образцах до и после испытаний (рис. 6). По горизонтальной оси отложена пористость в относительных величинах, высота столбцов гистограммы соответствует объемной доли доменов с фиксированной пористостью в общем объеме образца. Как видно из сравнения графиков до и после испытаний, форма распределения осталась неизменной, значимый пик гистограммы соответствует

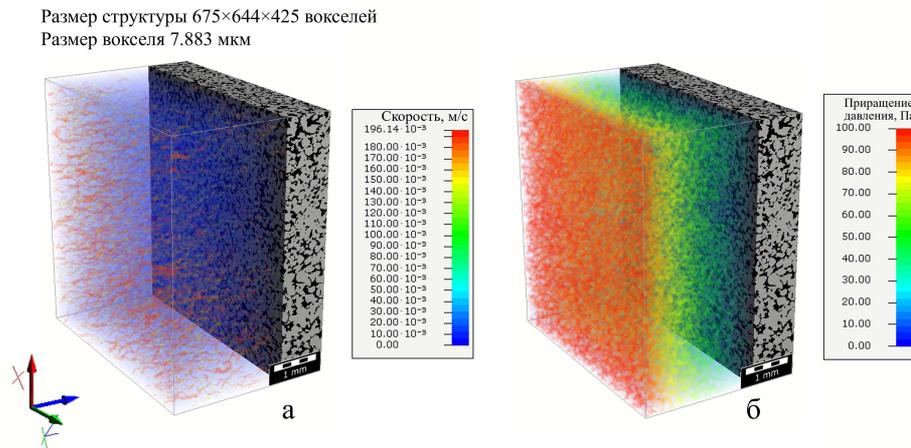


Рис. 5. *а* — Визуализация распределения скорости потока на испытанном образце, *б* — Пространственная визуализация перепада давления на той же структуре

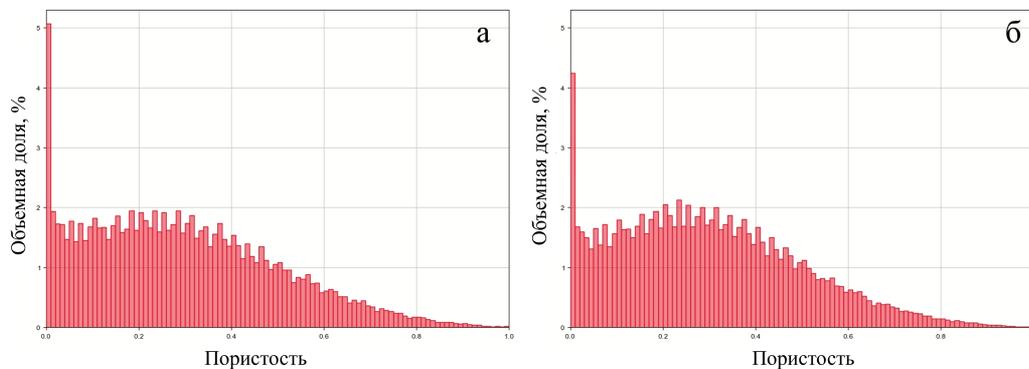


Рис. 6. *а* — Гистограмма распределения пористости в характерном образце до испытаний, *б* — Гистограмма распределения пористости в характерном образце после испытаний

значениям пористости 0.2–0.3. Это соответствует ранее подсчитанной интегральной пористости образцов в 30%, а также указывает на то, что средний размер зерен матрицы оказывается несколько больше преобладающего размера пор. Существование на гистограммах подвыборок со значениями пористости более 0.9 говорит о том, что имеются поры с размерами более 79 мкм (так как размер каждой подвыборки 10 вокселей), но их количество незначительно. Аналогичным образом начальный пик гистограмм свидетельствует о наличии в структуре зерен с размерами более 79 мкм. Как было подтверждено ранее проведенным цифровым гранулометрическим анализом структуры матрицы пород исследуемого пласта [34], среди зерен матрицы действительно преобладают мелкопесчаные и крупноалевритовые фракции.

На гистограмме после испытаний наблюдается незначительное увеличение количества доменов с по-

ристостью в диапазоне 0.2–0.4 и уменьшение количества доменов с пористостью более 0.6. Это может свидетельствовать об уменьшении в образцах объемной доли крупных пор в пользу средних после механического нагружения, что также проявляется в уменьшении интегральной пористости образцов согласно таблице.

Значения пористости исследуемой породы, полученные в результате цифрового анализа, хорошо согласуются с данными ГИС по исследуемому объекту. Пористость пород, определенная в данной работе, варьируется от 29 до 32%, в то время как по данным ГИС пористость коллектора на данной глубине оценивается в пределах от 24 до 27%, а в разных скважинах в пластовых условиях достигает 30%.

Благодаря высокому разрешению и выбранным параметрам съемки получено адекватное соответствие полученных результатов с результатами природных и ла-

бораторных исследований аналогичных пород. Полученные в данной работе относительные значения открытой пористости и средней проницаемости хорошо коррелируют с результатами полевых исследований, проведенных для аналогичного пласта [35], а также согласуются с петрографическими исследованиями коллекторов ПХГ того же типа [36].

Известно, что для большинства пород-коллекторов изменения фильтрационных свойств наблюдаются даже после приложения незначительных нагрузок, что особенно справедливо для условий всестороннего равномерного сжатия. В работе [37] показано, что для песчаников, сходных по свойствам с коллекторами некоторых ПХГ, наблюдается значительное изменение фильтрационных свойств в зависимости от типа нагружения. Для пород, исследованных в данной работе, наблюдалось ожидаемое снижение проницаемости по мере увеличения гидростатической нагрузки, но при достижении пластовых условий проницаемость образцов не снижалась более чем на 18%. Дальнейший рост касательных напряжений вплоть до разрушения породы не привел к существенному изменению проницаемости. Таким образом, проницаемость исследуемых пород незначительно зависит от напряженно-деформированного состояния для рассматриваемого непродолжительного воздействия. Влияние деформационных процессов на фильтрационные свойства пород может существенно сказываться при увеличении времени нагружения за счет ползучести и пескопроявления, характерных для слабосцементированных песчаников.

Несмотря на то, что в ходе экспериментов периодически наблюдались ползучесть и пластические деформации породы при увеличении сдвиговых напряжений, значения пористости, проницаемости и распределения пор по размерам после геомеханических испытаний существенно не изменились. Это может быть связано с неравномерным способом нагружения образцов, их низкой прочностью и слабой сцементированностью. Таким образом, в процессе моделирования управляемого понижения давления в скважине необратимых существенных изменений порового пространства и поровой проницаемости породы не обнаружено. Это означает, что при эксплуатации скважин и различных операциях, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния на стенках скважин, изменение проницаемости призабойной зоны будет обратимым после возвращения к исходным условиям. Однако с появлением трещин в породе новые фильтрационные трещинные каналы могут вносить решающий вклад в фильтрацию, что было исследовано в [34]. Таким образом подтверждено, что изменение напряженно-деформированного состояния в призабойной зоне скважин исследуемого ПХГ, вызванное управляемым понижением давления на забое, не вызывает значимого необратимого изменения фильтрационно-емкостных свойств, т.е. влияние на исходную поровую проницаемость пород минималь-

но. При этом описанное геомеханическое воздействие может вызывать растрескивание пород в окрестности скважин, тем самым заметно увеличивая проницаемость призабойной зоны за счет создания новой сети трещинных фильтрационных каналов [34]. Применение данного подхода приобретает особую актуальность при решении проблем ухудшения гидродинамической связи скважин с пластом в случае образования песчаных пробок на забое.

Результаты работы также могут быть использованы при создании моделей пласта, оценке коллекторских свойств и разработке эксплуатационной модели ПХГ [38]. Представленная в работе методика цифрового анализа результатов РКТ позволяет упростить получение данных о характеристиках ядерного материала, а также дополнить результаты лабораторных и натуральных исследований коллекторских свойств пород.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты комплексных исследований остаточных изменений фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов подземного хранилища газа. В работе описано применение метода цифрового анализа порового пространства пород на основе данных компьютерной томографии, а также геомеханического моделирования напряжений, возникающих в окрестности скважин в ходе изменения давления в скважине. Исследования проводились с помощью высокоразрешающего рентгеновского микромографа ProCon X-Ray CT-MINI Института проблем механики РАН. В ходе цифровых исследований были получены снимки компьютерной томографии пород-коллекторов различного масштаба, проведена обработка данных и создание на базе снимков трехмерных моделей породы, выполнен анализ однородности структуры и состава породы, после чего проведен геометрический, статистический анализ порового пространства, а также численное моделирование процессов фильтрации в породе для оценки проницаемости до и после механических испытаний. Проведено измерение открытой и закрытой пористостей, распределения пор по размерам в породах, а также анализ фильтрационных свойств пород. Построены пространственные распределения скоростей потока фильтрации и изменения градиента давления. Геомеханическая часть исследования включала изучение процессов фильтрации, деформирования и разрушения горных пород под действием реальных напряжений, возникающих в скважинах при контролируемом изменении давления в скважине. Показана тенденция к незначительному уменьшению значений открытой пористости и проницаемости порового пространства после проведенного неравномерного трехосного нагружения. При этом изменение фильтрационных свойств в среднем составило менее 9.4% от изначального значения, а уменьшение пористости наблюдалось в среднем лишь на 1.5%. Проанализировано статистическое изменение размеров пор поро-

ды: после приложения нагрузки наблюдается незначительное остаточное снижение количества крупных пор за счет образования пор среднего размера. Сделаны выводы об однородности и высокой связности порового пространства рассматриваемых пород. Таким образом, показано отсутствие существенных необратимых изменений фильтрационно-емкостных свойств пород. Фильтрационно-емкостные свойства, полученные в результате цифрового анализа, показали очень хорошее соответствие с результатами полевых и лабораторных измерений.

Результаты работы и примененные методики могут быть использованы при создании и корректировке моделей пласта-коллектора, а также разработке эксплуатационной модели ПХГ. Представленная в работе методика цифрового анализа данных РКТ позволяет упростить получение данных о характеристиках зачастую ограниченного кернового материала, а также дополнить результаты лабораторных и натуральных исследований свойств пластов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект № 22-11-00273.

- [1] *Clavaud J.B., Maineuil A., Zamora M. et al.* // *J. Geophys. Res. Solid Earth* **113**, B01202. (2008).
- [2] *Wright H.M.N., Roberts J.J., Cashman K.V.* // *Geophys. Res. Lett.* **33**, L17316. (2006).
- [3] *Chen M., Bai M., Roegiers J.-C.* // *Math. Geol.* **31**, N 4. 355. (1999).
- [4] *Guiüguen Y., Schubnel A.* // *Tectonophysics* **370**, N (1-4). 163. (2003).
- [5] *Zoback M.D., Byerlee J.D.* // *AAPG Bull.* **60**, N 9. 1531. (1976).
- [6] *Алиев З.С., Котлярова Е.М.* // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Оренбургский филиал. Экологическая ответственность нефтегазовых предприятий: материалы научно-практической конференции. Саратов: Амирит, 2017. С. 46.
- [7] *Соколов А.Ф., Монахова О.М., Алеманов А.Е.* // Вести газовой науки. № 3(11). 146. (2012).
- [8] *Рассохин С.Г.* // Геология нефти и газа. № 3. 53. (2003).
- [9] *Gao Y., Zhang X., Rama P. et al.* // *Transp. Porous Media* **92**. 457. (2012).
- [10] *Иванов М.К., Бурлин Ю.К., Калмыков Г.А. и др.* Петрофизические методы исследования кернового материала (Терригенные отложения). Учебное пособие в 2-х книгах. Кн. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008.
- [11] *Daish C., Blanchard R., Gulati K. et al.* // *Bone Rep.* **6**, 129. (2017).
- [12] *Menke H.P., Gao Y., Linden S., Andrew M.G.* // *Front. Water* **4**, 935035. (2022).
- [13] *Mostaghimi P., Blunt M.J., Bijeljic B.* // *Math. Geosci.* **45**, 103. (2013).
- [14] *Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П.* // Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. № 8. 361. (2006).
- [15] *Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И.* // Газовая промышленность. № 7. 66. (2021).
- [16] *Химуля В.В., Барков С.О.* // Актуальные проблемы нефти и газа. № 4(39). 27 (2022). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art3>
- [17] *Khimulia V., Karev V., Kovalenko Yu., Barkov S.* // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* (In Press). (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.015>
- [18] *GeoDict - The Digital Material Laboratory:* <https://www.math2market.de/> (Date of access: 05.06.2024).
- [19] *Sun H., Al-Marzouqi H., Vega S.* // *Geophysics.* **84**, Is. 3. (2019). F97-F102. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0653.1>
- [20] *PoroDict User Guide: GeoDict release 2022.* <https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2022/PoroDict2022.pdf> (Date of access: 05.06.2024).
- [21] *FlowDict User Guide: GeoDict release 2022:* <https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2022/FlowDict2022.pdf> (Date of access: 05.06.2024).
- [22] *Kling T., Huo D., Schwarz J.-O. et al.* // *Solid Earth.* **7**. 1109. (2016). <https://doi.org/10.5194/se-7-1109-2016>
- [23] *Balucan R., Jing Z., Underschultz J., Steel K.* // *The APPEA Journal.* **59**, N 2. 846 (2019). <https://doi.org/10.1071/AJ18142>
- [24] *Steel K.M., Jenkins D.R., Balucan R.D., Mahoney M.R.* // *Fuel.* **296**. 120688. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120688>
- [25] *Herdle T., Xue Y., Bolton J.S.* // *Publications of the Ray W. Herrick Laboratories.* (2017). P. 167.
- [26] *Soltani P., Azimian M., Wiegmann A., Zarrebini M.* // *J. Sound Vib.* **426**, 1. (2018).
- [27] *Versteeg H. K., Malalasekera W.* An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education, 2007.
- [28] *Whitaker S.* // *Transp. Porous Media.* **1**, Is. 1. 3. (1986).
- [29] *Linden S., Wiegmann A., Hagen H.* // *Graphical Models.* **82**, 58 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2015.06.003>
- [30] *Yuan T., Shen L., Dini D.* // *Acta Biomaterialia* **173**, 123. (2024).
- [31] *Azimian M., Köhnle C., Wiegmann A.* // *Chem. Eng. Technol.* **41**, Is. 5. 928. (2018).
- [32] *Rimmel O., May D.* // *J. Compos. Mater.* **54**, Is. 13. 1691. (2020).
- [33] *MatDict User Guide: GeoDict release 2022.* <https://www.math2market.com/fileadmin/UserGuide/GeoDict2022/MatDict2022.pdf> (Date of access: 05.06.2024).
- [34] *Химуля В.В., Барков С.О.* // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. № 4. 2340502 (2023). <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2023/4/2340502/>.
- [35] *Гарайшин А. С., Кантюков П. П.* // Георесурсы. **1**, № 19. 82. (2017).
- [36] *Гришин Д. В.* // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.
- [37] *Hu C., Agostini F., Skoczylas F. et al.* // *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **27**, Is. 7. 2552. (2023).
- [38] *Blicharski J., Rybicki C., Stec G.* // *AGH Drill. Oil Gas* **31**, Is. 2. 325. (2014).

## Digital core analysis: change of filtration-capacity properties of UGS reservoir after geomechanical impact

V.V. Khimulia<sup>a</sup>, S.O. Barkov<sup>b</sup>

<sup>1</sup>*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences  
Moscow, 119526, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>khim@ipmnet.ru, <sup>b</sup>barkov.sviat@yandex.ru*

In this paper we present the results of a series of comprehensive studies of residual changes in the filtration-capacitance properties of reservoir rocks of an underground gas storage facility caused by the impact of a non-uniform stress field during modeling of controlled pressure changes at the bottomhole. As part of digital studies of core material, multi-scale CT-images were obtained, on the basis of which three-dimensional models of rock pore space were created, homogeneity of rock structure and composition was analyzed, followed by geometric and statistical analysis of pore space, as well as numerical modeling of filtration processes in the rock to estimate permeability before and after mechanical tests. Measurement of porosity, geodesic tortuosity of pore space, estimation of pore size distribution, and analysis of rock filtration properties were performed. Spatial distributions of filtration flow velocities and pressure gradient changes were plotted. Within the framework of geomechanical tests, the study of rock deformation and filtration processes under the action of real stresses occurring in wells under controlled change of pressure in the well was carried out. The tendency to insignificant decrease of values of open porosity, permeability and pore geometry after non-uniform triaxial loading is shown. Conclusions about homogeneity and high connectivity of the pore space of the rocks under consideration are made. The absence of significant irreversible changes in the filtration-capacitance properties of rocks is shown. The characteristics obtained as a result of numerical analysis showed very good agreement with the results of field and laboratory measurements. The results of the work and the applied techniques can be used in the creation and adjustment of reservoir models, as well as in the development of an operational model of UGS. The presented technique of CT-data analysis allows to simplify data acquisition on core material characteristics, as well as to expand the results of laboratory and field studies of reservoir properties.

PACS: 91.60.-x

*Keywords:* filtration-capacity properties, porosity of the reservoir rocks, rocks permeability, X-ray computed tomography, digital core analysis, numerical modeling of filtration flows, pore space geometry.

*Received 07 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Химуля Валерий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: khim@ipmnet.ru.
2. Барков Святослав Олегович — аспирант 4-го года обучения, мл. науч. сотрудник; e-mail: barkov.sviat@yandex.ru.