

Исследование процессов фильтрации и разрушения в породах-коллекторах подземных хранилищ газа с использованием цифрового анализа данных компьютерной томографии

В. В. Химуля,* С. О. Барков†

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

(Поступила в редакцию 26.05.2023; подписана в печать 14.09.2023)

В данной работе проведены исследования изменений фильтрационных свойств и внутренней структуры пород-коллекторов подземных хранилищ газа (ПХГ), вызванных воздействием неравномерного поля напряжений в ходе реализации способа повышения проницаемости пород призабойной зоны скважин — метода направленной разгрузки пласта (НРП). Исследования проводились с помощью высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI Института проблем механики РАН. Проведены разномасштабные сканирования образцов ПХГ с развитой системой макротрещин, образовавшейся после геомеханического моделирования процесса реализации метода НРП. Получены 3D структуры внутреннего пространства пород, на базе которых проведено численное моделирование процессов поровой и трещинной фильтрации, выполнен гранулометрический анализ матрицы и продуктов разрушения, дана оценка изменений фильтрационных свойств. Результаты исследований подтверждают эффективность применения метода НРП для условий изучаемого месторождения, позволяют осуществить подбор внутрискважинного оборудования для решения проблем пескопроявления, а также призваны расширить существующие подходы к неразрушающему анализу ядерного материала пластов ПХГ и могут быть использованы для создания и уточнения эксплуатационной модели ПХГ.

PACS: 91.60.-x

УДК: 550.8.053

Ключевые слова: подземные хранилища газа, метод направленной разгрузки пласта, рентгеновская компьютерная томография, внутренняя структура пород, фильтрация, гранулометрия, поровое пространство, проницаемость.

ВВЕДЕНИЕ

Подземное хранение газа, как одно из направлений газовой промышленности, получило широкое распространение по всему миру, поскольку является безальтернативным решением в сглаживании сезонных потреблений газа. На сегодняшний день особую актуальность подземные хранилища газа (ПХГ) приобретают в Российской Федерации, где в связи с санкционным давлением наблюдается переориентация экспорта энергоресурсов из Европы в Азию. Кроме того, функционирование уникальной Единой системы газоснабжения в России было бы невозможно без использования ПХГ ввиду климатических особенностей и большой протяженности территории страны.

Наибольшее количество ПХГ создается в водоносных пластах и в истощенных газовых, газонефтяных или газоконденсатных месторождениях. Перспективными также являются ПХГ в соляных отложениях. Главной проблемой при эксплуатации ПХГ в истощенных месторождениях [1] является изменение фильтрационно-емкостных свойств резервуара при периодических циклах закачки и отбора газа, т.е. при периодических изменениях давления в скважине и пласте. Данный режим работы неизбежно вызыва-

ет изменения в напряженно-деформированном состоянии пласта-коллектора, что сказывается на емкостных и фильтрационных характеристиках пород массива — пористости и проницаемости. Высокие значения этих характеристик являются необходимым условием для создания ПХГ. Стоит также отметить, что при циклической эксплуатации ПХГ в околоскважинной зоне часто наблюдается ухудшение фильтрационных свойств пласта в результате кольматации фильтрационных каналов содержащимися в закачиваемом газе механическими частицами и частицами компрессорного масла [2].

Для улучшения фильтрационных свойств призабойной зоны скважин ПХГ может быть использован разработанный в ИПМех РАН экологичный, эффективный и экономически выгодный метод направленной разгрузки пласта (НРП). Идея данного подхода заключается в создании в пласте определенного напряженного состояния, которое приводит к появлению системы микро- и макротрещин в окрестности скважины, тем самым увеличивая проницаемость породы [3]. Достижение данного напряженного состояния возможно путем понижения давления на забое скважины и выполнения ряда технологических операций. Прямое физическое моделирование реализации метода НРП на образцах пород ПХГ при помощи уникальной Испытательной системы трехосного независимого нагружения (ИСТНН) ИПМех РАН продемонстрировало возможность его успешного и эффективного применения [2].

* khim@ipmnet.ru

† barkov.sviat@yandex.ru

Применение методов рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) для изучения ядерного материала нефтегазовых месторождений является достаточно новым и перспективным направлением исследований. Данный подход позволяет «заглянуть» внутрь породы, не разрушая ее структуры. Рентгеновское излучение при прохождении сквозь горную породу теряет мощность пропорционально ее плотности и регистрируется матрицей приемника, формируя пиксельное изображение. По результатам сканирования формируется большой объем данных, включающий тысячи проекций изучаемого образца, которые в дальнейшем реконструируются в его трехмерную модель. Томография ядерного материала позволяет детально изучать геометрию пустотного пространства породы (поры, каверны, трещины) [4, 5]. Применение современного программного обеспечения и новейших подходов численного моделирования позволяет на трехмерных структурах породы вычислять проницаемость и визуализировать фильтрационные потоки [6, 7].

При бурении и эксплуатации скважин на газовых и газоконденсатных месторождениях, а также ПХГ, коллекторы которых образованы слабосцементированными высокопроницаемыми песчаниками с низкими прочностными характеристиками, нередко возникает ряд осложнений, связанных с разрушением стволов скважин и выносом песка из пласта. Основной причиной выноса песка в скважину принято считать разрушение призабойной зоны пласта (ПЗП), вызванное существенным изменением напряженно-деформированного состояния в окрестности скважин и неконтролируемостью геомеханических процессов в ПЗП, обусловленных деформациями горных пород. Вынос песка из пласта представляет серьезную проблему, поскольку оказывает негативное влияние на производительность и целостность конструкции скважин, приводит к быстрому износу и последующему разрушению оборудования [8, 9]. Вынос большого количества песка ослабляет скелет породы и может в конечном итоге вызвать его разрушение [10]. Для решения проблемы пескопроявления используются специальные внутрискважинные фильтры для удержания песка. Основным параметром, определяющим способность фильтра удерживать песок, является проходное отверстие. Слишком маленький размер отверстия приведет к закупориванию фильтра и снижению продуктивности скважины. Фильтр с большим отверстием не будет эффективно удерживать песок от попадания в скважину. Для наиболее верного подбора данных фильтров необходимо проведение гранулометрического анализа, который помимо применения классических методов [10] может быть осуществлен при помощи методов РКТ.

В данной работе представлены результаты цифрового исследования фильтрационных свойств, внутренней структуры, а также фракционного состава пород-коллекторов ПХГ после физического моделирования на уникальной установке ИСТНН, создан-

ной в ИПМех РАН, применения на пластах-объектах хранения газа метода направленной разгрузки пласта. Проведены разномасштабные сканирования образцов ПХГ с развитой системой макротрещин, образовавшейся в образцах после геомеханического воздействия. На основе полученных цифровых 3D структур внутреннего пространства пород проведено численное моделирование процессов поровой и трещинной фильтрации, выполнен гранулометрический анализ матрицы и продуктов разрушения, дана оценка изменений фильтрационных свойств.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение внутренней структуры образцов, подготовленных из ядерного материала ПХГ, с использованием методов компьютерной томографии было выполнено при помощи высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI [11] Института проблем механики РАН. В основании корпуса данного томографа используется монолитная плита из гранита, позволяющая свести к минимуму влияние температурного дрейфа. Несмотря на компактные размеры прибора его конструктивные особенности позволяют легко и быстро проводить установку различных рентгенооптических и других вспомогательных устройств внутри камеры. Высокорастворимая рентгеновская трубка с микрофокусом и замкнутым контуром работает в диапазоне анодного напряжения от 20 до 90 кВ. Ток в трубке регулируется в диапазоне от 10 до 160 мкА, при этом максимальная выходная мощность трубки не превышает 8 Вт. Минимальный размер фокусного пятна составляет 5 мкм, а разрешение высокочувствительного рентгеновского детектора (экрана) — 2940×2304 пикселей, где размер одного пикселя равен 49.5 мкм. Размер активной (чувствительной) области составляет 146×114 мм.

Методика исследований образцов горных пород при помощи микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI включает в себя три этапа:

1. Подготовка и сканирование образца.
2. Создание трехмерной модели образца на основе полученных снимков (реконструкция).
3. Обработка данных и моделирование процессов на трехмерной цифровой структуре в специализированном программном обеспечении с последующим анализом результатов.

На первом этапе образец закрепляется на специальном держателе и помещается на подвижную основу внутри камеры между источником и детектором. На данном этапе важно жестко зафиксировать образец на держателе, поскольку мельчайшее изменение положения образца относительно держателя во время сканирования приводит к существенному ухудшению качества съемки и затрудняет второй этап исследований.

Далее осуществляется калибровка детектора и подбор оптимальных параметров сканирования для достижения наилучшего качества съемки исследуемого материала: разрешение съемки, фильтр, время экспозиции и т.д. Для достижения необходимого разрешения образец перемещается на определенное расстояние между источником и детектором, которые в процессе сканирования остаются неподвижными. При этом образец вместе с держателем вращается вокруг своей оси. Результатом сканирования является набор снимков двумерных проекции образца, где интенсивность окрашивания каждого пикселя зависит от коэффициента ослабления материала.

На втором этапе исследований в специализированном программном обеспечении VGSTUDIO осуществляется реконструкция массива снимков проекций образца в его трехмерную цифровую модель. При этом осуществляется коррекция различных искажений и артефактов, которые могли возникнуть в процессе сканирования.

Третий этап является наиболее технически сложным и трудоемким. Цифровая модель образца загружается в специализированное ПО Geodict Math2Market GmbH, которое позволяет на основе методов численного моделирования проводить многомасштабную обработку трехмерной структуры, визуализировать физико-механические процессы и определять свойства материалов [12]. Одним из самых важных шагов на данном этапе является сегментация трёхмерной модели, т.е. условное разбиение образца на различные фазы, соответствующие определенным веществам. Для решения задач в GeoDict используются специальные программные модули, которые позволяют в том числе осуществлять моделирование однофазного и двухфазного потока флюида в пористых средах, проводить гранулометрический анализ и определять статистическое распределение пор по объему.

В данной работе исследования проводились на низкопрочных слабосцементированных образцах из высокопористого песчаника Арбузовского ПХГ. Сканирование проводилось при разных разрешениях. Для изучения образовавшейся системы трещин и оценки трещинной проницаемости было проведено сканирование полноразмерных кубических образцов с ребром 40 мм. Для детального изучения порового пространства и проведения гранулометрического анализа было проведено сканирование с высоким разрешением определенных областей внутри образцов. Характерный размер таких областей составлял 10–20 мм.

Дальнейшая работа с цифровыми трехмерными структурами, полученными в процессе реконструкции, осуществлялась в ПО Geodict. Обработка всех данных была единообразной, для упрощения сегментации применялись одни и те же сглаживающие фильтры и корректировки яркости изображения. Процесс сегментации был выполнен на основе методов AI Segmentation и Otsu для снимков разного масштаба [13]. Для проведения гранулометрического ана-

лиза структур был задействован метод Solid Size Distribution (Granulometry) специального модуля — MatDict. Определение размера гранул и пор в образце основано на расчете диаметра сфер, вписываемых в измеряемые объекты [14]. Фильтрационные потоки были рассчитаны при помощи отдельного модуля программы Geodict — FlowDict [15]. Данный модуль позволяет спрогнозировать эффективные свойства материала путем моделирования потока и последующей обработки получаемых результатов. FlowDict прогнозирует среднюю скорость потока для указанного перепада давления [16] и определяет проницаемость пористой структуры на основе закона Дарси. В основе расчёта несжимаемых стационарных ньютоновских потоков лежит уравнение Навье-Стокса с различными аппроксимациями. Применение модуля FlowDict получило широкое распространение и демонстрирует согласующиеся с экспериментами результаты [17–19].

В данной работе численное моделирование фильтрационных процессов было выполнено на основе модели Стокса [20] с применением решателя LIR [21]. Моделирование потока поровой фильтрации проводилось для условий, соответствующих лабораторным измерениям проницаемости. В качестве рабочего флюида был выбран воздух при комнатной температуре, перепад давлений составлял 0.1 атм. Для граничных условий в направлении потока было выбрано «Periodic with implicit region 10 vox», а в тангенциальном направлении — «Symmetric». При оценке трещинной проницаемости в тангенциальном направлении для граничных условий было выбрано «No slip», что соответствовало измерению проницаемости образца в экспериментах по прямому физическому моделированию.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было отмечено выше, во время эксплуатации ПХГ происходит циклическое изменение пластового давления, связанное с процессом закачки и отбора газа. На установке ИСТНН была проведена серия экспериментов на кубических образцах, изготовленных из ядерного материала, отобранного из скважин ПХГ [2]. Данные эксперименты были направлены на исследование особенностей реализации на скважинах ПХГ метода НРП с целью повышения проницаемости пород-коллекторов в ПЗП. Прямое физическое моделирование реализации метода НРП на уникальной установке ИСТНН продемонстрировало возможность его успешного применения. Было зафиксировано существенное увеличение проницаемости испытываемых образцов вследствие их растрескивания и образования системы трещин, выполняющих роль новых фильтрационных каналов. Также было выяснено, что наибольшую эффективность применения данного подхода можно получить в момент максимального давления газа в пласте ПХГ, когда на стенках вертикальных и го-

ризонтовых скважин при создании депрессии на их забое возникают максимальные касательные напряжения. Следует отметить, что в проведенных экспериментах не всегда удается корректно измерить конечную проницаемость в связи с растрескиванием образца и нарушением герметичности его оболочки. В таком случае для оценки конечной трещиной проницаемости и изучения процессов разрушения могут быть использованы методы РКТ.

В данной работе изучаются структурные и фильтрационные изменения пород ПХГ после реализации метода НРП с помощью компьютерной рентгеновской томографии и последующего цифрового анализа 3D снимков. Томографические исследования были проведены на кубических образцах ПХГ, испытанных в рамках работы [2].

Первый снимок каждого образца сделан в высоком разрешении с целью проведения гранулометрического анализа и численной оценки поровой проницаемости. Параметры съемки: напряжение источника 90 кВ, сила тока 89 мкА, время экспозиции 0.22 с, количество осреднений для каждой проекции равно 10, шаг поворота 0.125° , размер вокселя (объемного пикселя) 7.883 мкм. При таком разрешении съемки размеры охватываемой области материала составляли 10–20 мм. На основе полученных данных были составлены выборки репрезентативного объема, для которых проводился цифровой анализ. Для оценки репрезентативного объема на исходных цифровых 3D-моделях рассчитывается характерный параметр, такой как пористость, проницаемость или другие. Затем из исходной модели вырезается определенное количество подвыборок с поэтапно уменьшающимся количеством ячеек и оцениваются аналогичные параметры для сравнения с исходной моделью. Размер, при котором значение параметра становится стабильным, считается наименьшим представительным объемом [22]. Полученный набор данных реконструировался в автоматическом режиме средствами VGStudio. После этого набор проекций обрабатывался согласно описанной в разд. 1 настоящей статьи методике в среде GeoDict. На рис. 1, *a* представлена часть проекции полученного 3D изображения: черным цветом показаны поры, серым — материал породы, белым — включения более плотных примесей.

Для полученных изображений были применены методы корректировки яркости, уменьшения шумов и сглаживания. Далее проведена сегментация изображения для получения 3D структуры внутреннего пространства породы и разделения массива данных на поры/материал. В данном случае сегментация позволяет разделить поровое пространство и матрицу породы. Для оценки фильтрационных свойств проделано численное моделирование потока фильтрации на полученной структуре в рамках модели Стокса средствами модуля FlowDict. Параметры потока и граничные условия указаны в описании методики в разд. 1 настоящей статьи. На рис. 1, *б* показана одна из полученных струк-

тур, а также выборочные пути фильтрации с распределением по скоростям потока: серым выделен материал породы.

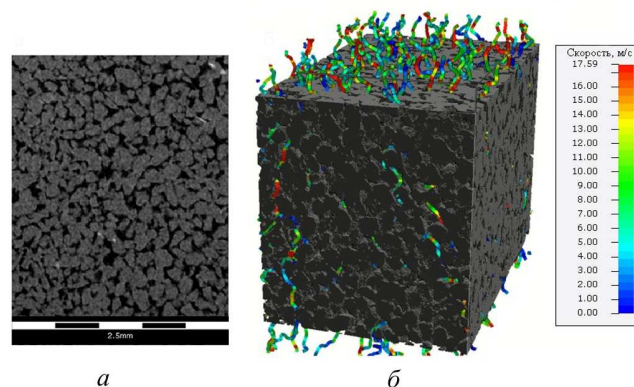


Рис. 1. *a* — Часть проекции полученного снимка породы в высоком разрешении, *б* — Созданная 3D структура материала, а также результат численного моделирования потока фильтрации

Направление моделирования потока совпадает с направлением лабораторного измерения проницаемости. Полученное в результате численного моделирования среднее значение поровой проницаемости в выбранном направлении составило 7.5 Д, с разбросом значений для разных образцов от 6.8 до 8.4 Д. Различие величин проницаемости, полученных для рассматриваемых объемов внутри каждого отдельного образца, не превышало 8%. В рамках геомеханических испытаний на установке ИСТНН [2] начальная проницаемость породы составила 9 Д, после чего уменьшалась в ходе процесса физического моделирования. Значение проницаемости перед завершением эксперимента и растрескиванием образца составляло 8.5 Д. Результаты проведенного численного моделирования хорошо коррелируют с экспериментальным, что говорит в пользу корректности методики и выбора репрезентативного объема структур для дальнейших исследований. Также такой подход позволил оценить фильтрационные свойства в двух других направлениях в породе — значения проницаемости вдоль напластования оказались близки к значению поперек напластования, что говорит о слабой степени анизотропии материала. При этом проведение цифрового анализа является неразрушающим методом исследования, что расширяет возможности его применения в комбинации с другими лабораторными методиками.

Полученные структуры образцов применялись далее для проведения порометрического и гранулометрического анализа зерен породы и продуктов разрушения в трещинах. Исследование пористости производилось средствами модуля PoroDict: средние значения открытой пористости образцов составили 29–31%. Для определения фракционного состава зерен матрицы использовались однородные области снимков материала: без различимых локальных уплотнений матрицы (больших

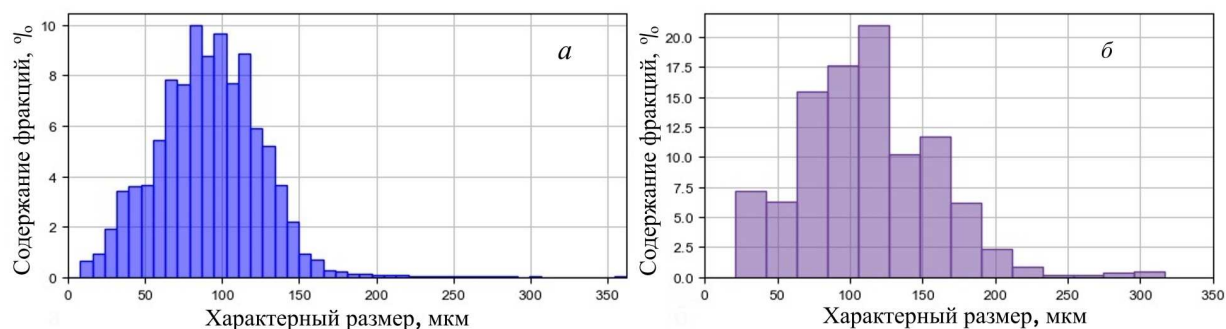


Рис. 2. *а* — Результаты гранулометрического анализа зерен матрицы, *б* — Результаты гранулометрического анализа продуктов разрушения в трещинах

0.3 мм) вдоль каждого направления. Для анализа размера продуктов разрушения выделялись области внутри образовавшихся трещин, в связи с чем размер выборки становился меньше. Результаты проведенного гранулометрического анализа зерен матрицы и продуктов разрушения показаны на рис. 2: представлены зависимости процентного содержания фракций от характерного размера частиц.

Как видно из представленных графиков, в продуктах разрушения и зернах матрицы преобладают мелкопесчаные (0.25–0.1 мм) и крупноалевритовые (0.1–0.05 мм) частицы. При этом выносимый песок представлен как зернами, так и обломками породы, исходя из сравнения с составом самой матрицы. Суммарное содержание мелкого песка и крупного алеврита в составе продуктов разрушения пород составляет 85–93 масс.%. Содержание мелкозернистых алевритовых частиц во фракционном составе не превышает 10 масс.%.

Повторный снимок каждого образца был крупномасштабным с охватом всего объема куба $40 \times 40 \times 40$ мм, в форме которого изготовлены образцы. Охват такой области позволяет получить полную картину сети макротрещин, неоднородностей и каверн в породе, однако накладывает ограничение на разрешение съемки: размер вокселя составлял 21.146 мкм. Параметры съемки: напряжение источника 90 кВ, сила тока 89 мкА, время экспозиции 0.32 с, количество осреднений для каждой проекции 10, шаг поворота проекций 0.125° . Полученный набор данных реконструировался в полуавтоматическом режиме с ручной корректировкой параметра смещения детектора. Средствами VGStudio произведено первичное избавление от артефактов (дефектов) съемки, после чего набор проекций обрабатывался в среде GeoDict согласно методике, описанной в разд. 1 настоящей статьи. После реконструкции и получения объемного набора данных был сделан вывод об однородности материала на макроуровне и отсутствии явных каверн. В материале неравномерно присутствуют примеси более плотного вещества, однако их содержание составляет менее 1.9%. Напластование визуально неразлично. На рис. 3, а представлено фо-

то одного из испытанных образцов. Свободная от полимерной пленки грань соответствует направлению измерения фильтрации в геомеханическом эксперименте. На фото видна часть сети макротрещин, образовавшихся после физического моделирования процесса реализации метода НРП на установке ИСТНН. Также видно растрескивание и неровность свободной грани образца, вызванные последствием эксперимента.

После корректировки и фильтрации снимка данного образца проведена сегментация с целью перехода к 3D структуре породы. Процесс сегментации позволил выделить только макротрещины в объеме материала и провести моделирование фильтрационного потока без учета поровой проницаемости. Перед проведением моделирования к полученной структуре были также применены алгоритмы упрощения и оптимизации, в том числе анализ и избавление от закрытой и тупиковой трещиноватостей, которые не вносят вклад в проницаемость породы, однако существенно усложняют модель. На рис. 3, б показана полученная после сегментации структура (серым выделен материал породы), а также поле скоростей моделируемого потока в трещинах образца. Как видно из полученной модели, в образце образовалась развитая сеть макротрещин, причем направление распространения и угол наклона фронтальных трещин хорошо соотносится с полем прикладываемых к образцу неравномерных напряжений в ходе испытаний: наименьшая компонента прикладывалась к свободной грани образца, наибольшая к левой грани, средняя — к грани с пометкой «2» на рис. 3, а. При этом в образце также образовались несколько плоских вертикальных трещин, различимых на заднем плане. Проведенное средствами FlowDict на созданной 3D структуре численное моделирование потока фильтрации дало оценку трещинной проницаемости более 30 Д в вертикальном направлении. Таким образом, проведение цифрового анализа на полномасштабных снимках позволило получить полную картину образовавшейся сети макротрещин, оценить характер их распространения, а также получить оценку скачкообразного изменения фильтрационных свойств породы после применения метода НРП.

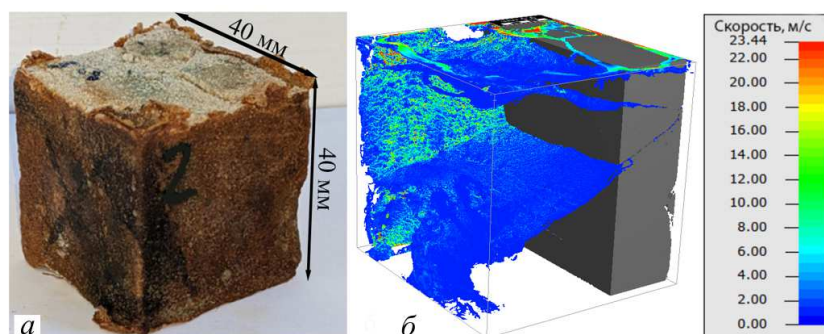


Рис. 3. *а* — Фото одного из образцов после испытаний, *б* — Полученная 3D структура образца и распределение скоростей моделируемого потока фильтрации

Выполненная оценка поровой проницаемости по результатам томографии после снятия нагрузки с образца подтверждает слабую зависимость проницаемости данных пород от напряженно-деформированного состояния, несмотря на ярко выраженную ползучесть породы, наблюдаемую в эксперименте, описанном в [2]. Значение проницаемости образца в ходе неравномерного нагружения менялось от 9 Д в начале опыта до 8.5 Д к моменту растрескивания, а после снятия прикладываемой нагрузки было оценено по данным численного моделирования в 7.5 Д. Относительные значения полученной для данных пород пористости и поровой проницаемости хорошо соотносятся с результатами полевых специальных исследований, выполненных для пластов ПХГ того же типа [23], а также согласуются с петрографическими исследованиями аналогичных коллекторов ПХГ [24].

Проведенный гранулометрический анализ продуктов разрушения хорошо соотносится с традиционным фракционным исследованием выносимого пластового песка для пород терригенных отложений равной пористости, описанным для условий продуктивных пластов IV-VI ряда месторождений Краснодарского края в [25]. В рамках работы использовались данные по гранулометрическому составу пород в том числе с пористостью 32% с целью реализации технологических принципов повышения эффективности крепления призабойной зоны пласта за счет управления процессами пескопроявления и подбора гравийных фильтров.

Результаты анализа размеров продуктов разрушения также хорошо коррелируют с результатами классического гранулометрического исследования выносимых примесей пород зеленой свиты Северо-Ставропольского ПХГ со схожими фильтрационно-емкостными характеристиками [26]. В данном исследовании использовались данные гранулометрического состава механического осадка, отобранного из индивидуальных замерных устройств скважин, сепараторов и пылеуловителей ГРП, и отложившихся в процессе отбора газа из резервуара зеленой свиты.

Сравнивая результаты проведенного фракционного анализа зерен матрицы и продуктов разрушения, мож-

но увидеть смещение гистограммы для распределенных фракций выносимого песка, а также появление и рост более крупных фракций (более 200 мкм). Это свидетельствует в пользу того, что в процессе растрескивания выносятся не только зерна скелета породы, но и обломочный материал, который может оказывать влияние на ширину изначальных фильтрационных каналов в породе, переносясь потоком и срезая углы зерен каркаса. Также по мнению авторов [26] наличие зерен мелкозернистой алевритовой размерностей можно объяснить выносом межзернового материала потоком газа по фильтрационным каналам, а присутствие крупнозернистых алевритовых (50–100 мкм) и тем более мелкозернистых (100–250 мкм) фракций может происходить только при растрескивании породы. Таким образом, необходимо учитывать различия в характере пескообразования при подборе внутрискважинного оборудования для базовых режимов эксплуатации и работе исследуемых объектов после реализации НРП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты цифрового исследования фильтрационных свойств, внутренней структуры, а также фракционного состава пород-коллекторов ПХГ после физического моделирования на установке ИСТНН реализации способа повышения проницаемости пород призабойной зоны скважин — метода НРП. Исследования проводились с помощью высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI ИПМех РАН. Проведены разномасштабные сканирования образцов ПХГ с развитой системой макротрещин, образовавшейся после геомеханического моделирования процесса реализации метода направленной разгрузки пласта. Получены 3D структуры внутреннего пространства пород, на базе которых проведено численное моделирование процессов поровой и трещинной фильтрации, выполнен гранулометрический анализ матрицы и продуктов разрушения, дана оценка изменений фильтрационных

свойств. Результаты исследований позволяют сделать вывод о влиянии напряженно-деформированного состояния на фильтрационные свойства изучаемых высокопористых пород, подтверждают эффективность применения метода НРП для условий изучаемого месторождения, позволяют оценить характер разрушения и пескопроявления в породе, а также осуществить подбор внутрискважинного оборудования для решения проблем пескопроявления. Томографические исследо-

вания по приведенной в работе методике призваны расширить существующие подходы к неразрушающему анализу кернового материала пластов ПХГ и могут быть использованы для создания и уточнения эксплуатационной модели ПХГ.

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

- [1] Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Г // Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. № 8. 361. (2006).
- [2] Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. // Газовая промышленность. № 7. 66. (2021).
- [3] Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. // Технологии ТЭК. № 1. 31. (2003).
- [4] Савицкий Я.В. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. № 15. 28. (2015).
- [5] Ефимов А.А., Савицкий Я.В., Галкин С.В., Шапиро С. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. **15**, № 18. 23. (2016).
- [6] Химуля В.В., Барков С.О. // Актуальные проблемы нефти и газа. № 4(39). 27. (2022).
- [7] Абросимов, А.А. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2017.
- [8] Аксенова Н.А., Овчинников В.П., Анашкина А.Е. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами. Тюмень: ТИУ., 2018.
- [9] Salah A., Dehghan A.N., Sheikhzakariaee S.I., Davarpanah A. // Petroleum Research. **6**, Is. 4. 361. (2021).
- [10] Порошин М.А., Тананыхин Д.С., Григорьев М.Б. // Вестник Евразийской науки. **12**, № 2. 22. (2020).
- [11] CT-MINI by ProCon X-Ray GmbH: <https://procon-x-ray.de/en/ct-mini> (Date of access: 23.05.2023).
- [12] GeoDict – The Digital Material Laboratory: <https://www.math2market.de/> (Date of access: 23.05.2023).
- [13] Bali A., Singh S.N. // 2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies. IEEE. 113. (2015).
- [14] MatDict Features: <https://www.math2market.com/geodict-software/geodict-base-modules/analysis/matdict.html> (Date of access: 23.05.2023).
- [15] FlowDict: Single-Phase Fluid Flow: <https://www.math2market.com/geodict-software/geodict-base-modules/simulation/flowdict> (Date of access: 06.11.2022).
- [16] Kling T. et al. // *Solid Earth*. **7**. 1109. (2016).
- [17] Balucan R. et al. // *The APPEA Journal*. **59**, N 2. 846. (2019).
- [18] Steel K.M. et al. // *Fuel*. **296**. 120688. (2021).
- [19] Herdtle T., Xue Y., Bolton J.S. Publications of the Ray W. Herrick Laboratories. P. 167. (2017).
- [20] Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education, 2007.
- [21] Linden S. et al. // *Graphical Models*. **82**. 58. (2015).
- [22] Pelissou C., Baccou J., Monerie Y., Perales F. // *International Journal of Solids and Structures*. **46**, Iss. 14-15. 2842 (2009).
- [23] Гарайшин А.С., Кантюков П.П. // *Георесурсы*. **1**, № 19. 82. (2017).
- [24] Гришин Д.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.
- [25] Бондаренко В.А. // ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет». Краснодар. 2014.
- [26] Гридин В.А. и др. // Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 8. (2007).

Investigation of filtration and fracture processes in reservoir rocks of underground gas storage facilities using digital analysis of computed tomography data

V.V. Khimulia^a, S.O. Barkov^b

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 119526, Russia E-mail: ^akhim@ipmnet.ru, ^bbarkov.sviat@yandex.ru*

In this paper, we investigated changes in the filtration properties and internal structure of underground gas storage (UGS) reservoir rocks caused by the impact of an irregular stress field during the implementation of the bottomhole zone permeability increase method — the directional unloading method. The research was conducted with the use of a ProCon X-Ray CT-MINI high-resolution scanner of the Institute for Problems in Mechanics RAS. Multiscale scans of UGS samples with a developed system of macrocracks formed after geomechanical modeling of the process of implementation of the directional unloading method were carried out. 3D structures of the rock interior were

obtained, on the basis of which the numerical simulation of the pore and fracture filtration processes was carried out, the granulometric analysis of the matrix and fracture products was performed, and the changes in filtration properties were assessed. The results of the research confirm the effectiveness of the directional unloading method for the conditions of the studied field, allow for the selection of downhole equipment to solve the problems of sand production, and are also intended to extend the existing approaches to the nondestructive analysis of core material of UGS formations and can be used to create and refine the operational model of the UGS.

PACS: 91.60.-x.

Keywords: underground gas storages, directional unloading method, X-ray computed tomography, internal rock structure, filtration, granulometry, pore volume, permeability.

Received 2023.

Сведения об авторах

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