

УДК 552.08, 539.217

С.О. БАРКОВ, аспирант, м.н.с. (ИПМех РАН)
В.В. ХИМУЛЯ, к.ф.-м.н., м.н.с. (ИПМех РАН)
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ И ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННО-
ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПХГ**

На сегодняшний день перспективным и быстроразвивающимся подходом к изучению кернового материала является рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Использование методов РКТ позволяет получать наиболее подробную информацию об исследуемом образце породы, не разрушая при этом его структуру и сохраняя его физико-механические свойства [1]. К тому же данный подход к изучению кернового материала имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими лабораторными методами. Например, помимо определения объема пустотно-порового пространства образца, методы РКТ позволяют увидеть всю структуру порового пространства, оценить его связность, проанализировать распределение пор по размерам, а также позволяют провести гранулометрический анализ зерен матрицы породы. На 3D-модели образца, получаемой по результатам сканирования, продвинутое программное обеспечение на основе численных методов позволяет проводить моделирование таких сложных процессов, как, например, многофазная фильтрация и определять проницаемость исследуемых пород. Для нефтегазовой отрасли использование методов РКТ является инновационным подходом, который позволяет дешевле и намного быстрее получать сведения о фильтрационно-емкостных характеристиках пород-коллекторов.

Система поземных хранилищ газа (ПХГ) обеспечивает функционирование уникальной Единой системы газоснабжения в России. Использование системы ПХГ является единственным решением в регулировании сезонной неравномерности газопотребления [2]. При этом наибольшая часть ПХГ в России создается в истощенных газовых, газоконденсатных или газонефтяных месторождениях. Во время эксплуатации ПХГ, сконструированных на базе истощенных месторождений, главной проблемой является изменение фильтрационно-емкостных свойств пород пласта при периодических циклах закачки и

отбора газа. Данный режим эксплуатации сопровождается соответственно чередующимися этапами увеличения и уменьшения пластового давления. В результате циклического режима работы ПХГ происходят изменения в напряженно-деформированном состоянии пород-коллекторов, которые могут привести к ухудшению их емкостных и фильтрационных характеристик. К ухудшению фильтрационных свойств пород в околоскважинной зоне при циклической эксплуатации ПХГ также приводит закупорка пор и фильтрующих каналов различной мелкодисперсной и глинистой составляющей скелета пласта, которая выносится вместе с газом [3, 4]. При этом важно отметить, что ПХГ создаются только на основе тех истощенных месторождений, чьи продуктивные пласты представлены высокопористыми и высокопроницаемыми породами.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению проблемы снижения проницаемости пород околоскважинной зоны в процессе эксплуатации скважин нефтегазовых месторождений и ПХГ на их основе является разработанный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта (НРП). Идея данного подхода заключается в том, чтобы за счет создания напряженного состояния определенного вида вызвать появление системы микро- и макротрещин в окрестности скважины, которые приведут к увеличению проницаемости породы [5]. В лаборатории геомеханики ИПМех РАН на кубических образцах, подготовленных из кернового материала одного из ПХГ, была проведена серия экспериментов по физическому моделированию реализации метода НРП. Результаты исследований, проведенных на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) ИПМех РАН [6], продемонстрировали возможность успешного применения метода НРП для условий исследуемого ПХГ. В испытуемых образцах наблюдалось образование системы макротрещин и резкое увеличение проницаемости.

В данной работе представлены результаты цифрового исследования фильтрационно-емкостных характеристик и внутренней структуры кубических образцов, изготовленных из кернового материала продуктивного горизонта ПХГ. Томография образцов осуществлялась после физического моделирования на них реализации метода НРП при помощи уникальной установки истинно трехосного нагружения ИСТНН.

Исследование внутренней структуры образцов было осуществлено с помощью высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon CT-MINI. Для проведения сканирования образцы помещались на специальную вращающуюся подставку между рентгеновской трубкой и детектором. В процессе сканирования осуществлялось вращения образца

вокруг вертикальной оси с шагом $0,125^\circ$. Для каждого угла поворота с заданной экспозицией и числом осреднений был получен снимок образца. Для реконструкции массива снимков каждого из образов в трехмерную цифровую модель использовалось специализированное программное обеспечение VGSTUDIO. Последующие порометрический анализ и моделирование фильтрационных процессов осуществлялось соответственно при помощи модулей PoroDict и FlowDict специализированного программного обеспечения Geodict Math2Market GmbH [7].

На рис.1 представлены проекции трехмерной структуры одного из образцов для двух взаимно перпендикулярных плоскостей, на которых отчетливо видна система образовавшихся макротрещин и высокоплотные минеральные включения. На рис. 2 представлена трехмерная структура системы трещин и поле скоростей потока вдоль фильтрующих каналов по результатам численного моделирования для одного из образцов.

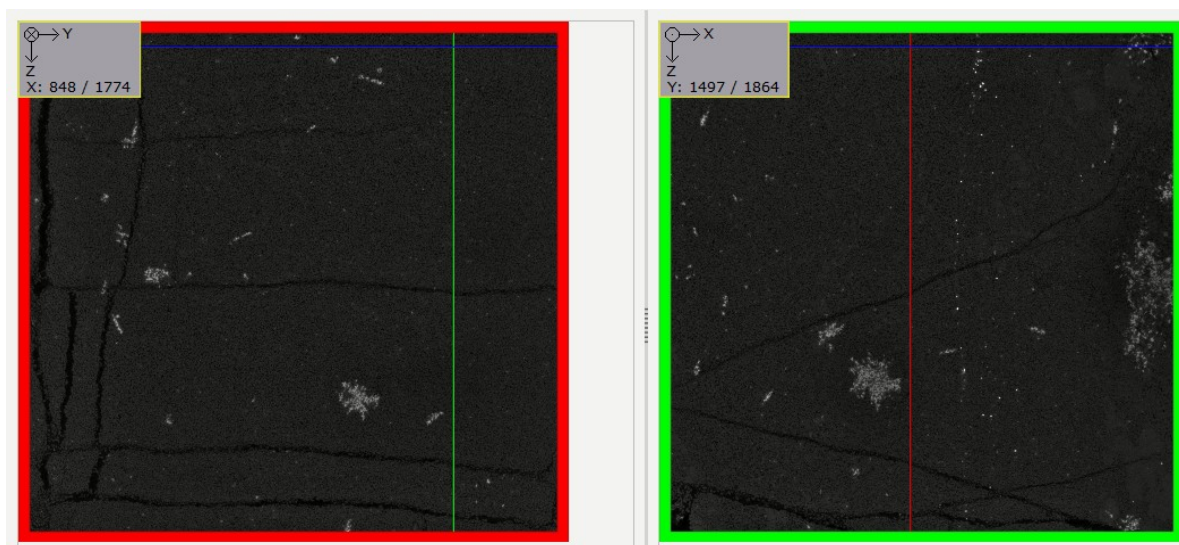


Рис.1. Некоторые проекции внутренней структуры образца, полученные в результате реконструкции набора снимков.

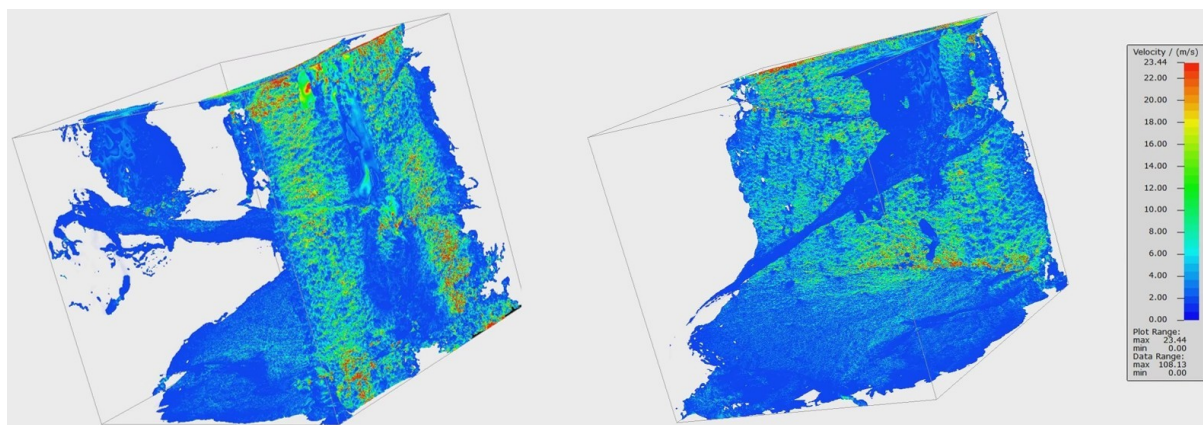


Рис. 2. Трехмерная структура системы трещин и поле скоростей потока вдоль фильтрующих каналов по результатам численного моделирования для одного из образцов.

В данной работе по результатам компьютерной томографии был проведен порометрический анализ породы продуктивного горизонта одного из ПХГ. Выполнен качественный и количественный анализ образовавшейся в образцах после проведения прямого физического моделирования реализации метода НРП системы макротрещин. Выполнено численное моделирование потока фильтрации на полученных после сканирования трехмерных цифровых структурах образцов с целью оценки изменения их трещинной проницаемости. На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности успешного применения метода НРП на исследуемом ПХГ. Возникновение в образцах системы макротрещин, приводящей к росту проницаемости пород в окрестности скважины, за счет создания определенного напряженного состояния подтверждается результатами компьютерной томографии. При этом значения конечной трещинной проницаемости образцов полученные в лабораторных условиях на установке ИСТНН и определенные на основе численного моделирования совпадают.

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

Список литературы:

1. Saxena N., Hows A., Hofmann R., et al. Rock properties from micro-CT images: Digital rock transforms for resolution, pore volume, and field of view // Advances in Water Resources. 2019. Vol. 134, 103419.

2. Хасанов И. И., Гильмутдинов Т.Д. Современное состояние подземных хранилищ газа в России и мире // История и педагогика естествознания. 2020. № 3-4. С. 33-37.
3. Басов, С. А. Водоизоляционные работы с изменением конструкции фильтра скважин подземных хранилищ газа (ПХГ) / С. А. Басов, В. Н. Игнатьев, Д. Р. Султанов // Бурение и нефть. 2008. № 10. С. 26-29.
4. Орловский, С. Л. Основные проблемы при отборе газа из подземного хранилища / С. Л. Орловский // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: Сборник научных трудов. Том Выпуск 5 (10). – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство научно-технической литературы "Монография", 2016. – С. 324-330.
5. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells. — Springer International Publishing Cham, Switzerland, 2020. — 166 p.
6. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Физическое моделирование метода направленной разгрузки пласта // Газовая промышленность. 2021. № 7. С. 66-73.
7. GeoDict - The Digital Material Laboratory: [digital resource] URL: <https://www.math2market.de/> (Date of access: 23.09.2023).

Информация об авторах:

Барков Святослав Олегович – аспирант, младший научный сотрудник
лаборатории геомеханики ИПМех РАН, 119526, г. Москва, пр.

Вернадского, д. 101, к.1, sviatoy97@gmail.com

Химуля Валерий Владимирович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник
лаборатории геомеханики ИПМех РАН, 119526, г. Москва, пр.

Вернадского, д. 101, к.1, valery.khim@gmail.com