

УДК 552.08, 539.217

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

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРА ПХГ
НА БАЗЕ СНИМКОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ
ТОМОГРАФИИ**

Подземные хранилища газа (ПХГ) позволяют обеспечивать территории страны газом независимо от времени года и прочих условий. ПХГ играют огромную роль из-за особенностей климата и значительной протяженности территории страны, что усложняет транспортировку газа конечным потребителям. Одним из самых главных критериев отбора коллекторов под создание ПХГ являются их высокие фильтрационно-емкостные показатели. Зачастую такие породы обладают низкой прочностью и подвержены значительному деформированию и пескопроявлению. В связи с этим, для эффективного и безопасного создания объектов ПХГ в низкопрочных пластах необходимо проведение широкого спектра предварительных исследований пород-коллекторов. Для создания точных гидродинамической и геомеханической моделей месторождения требуется знание таких характеристик пород как пористость, проницаемость, прочность, связность порового пространства, распределение пор по размерам, гранулометрический состав, площадь контакта зерен матрицы и т.д. Многие из этих свойств могут быть изучены неразрушающими лабораторными методами, такими как рентгеновская компьютерная томография.

Одним из инновационных подходов в науке и энергетике к исследованию свойств геоматериалов и энергоресурсов является использование технологии компьютерной томографии. Применение рентгеновской компьютерной томографии (КТ) для анализа керна позволяет изучить внутреннюю структуру породы без разрушения образца. Рентгеновские лучи, проходя через породу, теряют интенсивность в зависимости от ее плотности и улавливаются детектором, создавая пиксельное изображение. После сканирования получается большой объем данных, состоящий из тысяч проекций исследуемого образца, которые затем реконструируются в трехмерную модель [1].

В данной работе представлена методика и результаты неразрушающих исследований геометрических и структурных свойств керна на примере породы-коллектора ПХГ. На основе полученных снимков рентгеновской компьютерной томографии созданы 3D модели породы. С помощью цифрового анализа получены такие характеристики, как пористость, площадь контактов и объем зерен матрицы породы, необходимые для наполнения гидродинамической и геомеханической моделей ПХГ. Знание данных характеристик коллектора важно для описания процессов в пласте, влияющих на эффективность добычи газа и его хранение, а также для разработки новых методов увеличения добычи или повышения безопасности хранения углеводородов.

Изображения КТ были получены на высокоразрешающем микротомографе ProCon CT-MINI Института проблем механики РАН [2]. Полученный набор данных реконструировался с помощью ПО VGstudio, после чего обработка и бинаризация снимков проводилась в ПО GeoDict [3]. Бинаризация (или сегментация) изображений нужна для создания 3D модели материала с присвоением каждому вокселю ярлыка конкретного материала. В данном исследовании сегментация была проведена на поры и твердый материал. На рис. 1а представлена часть исходного изображения КТ, на рис. 1б показан результат обработки снимка (применение корректировки оттенков серого, NLM-фильтрации), на рис. 1в показан результат сегментации (красным – материал, белым – поры). После создания 3D модели на основе возможностей модулей GeoDict проводится анализ порового пространства и матрицы породы.

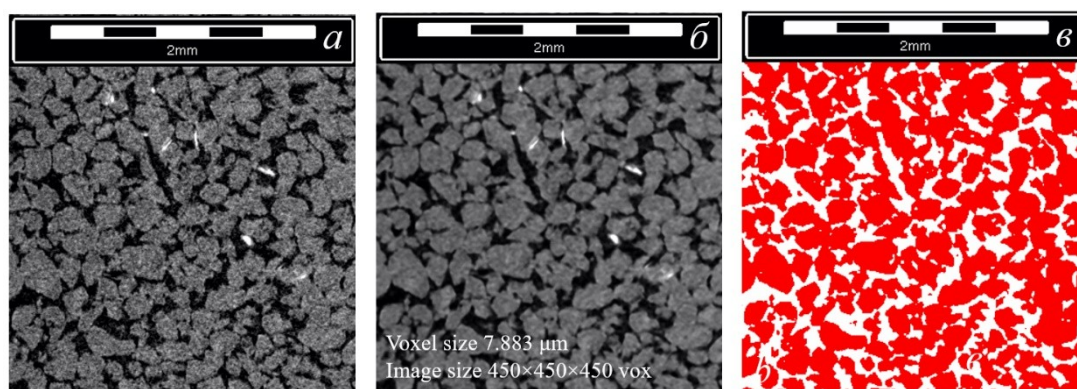


Рис. 1. Результаты проведенного КТ исследования и получения 3D модели

Для измерения пористости производится подсчет вокселей материала и пор, после чего находится их отношение. Для исследуемых пород пористость составила около 30%, что находится в хорошем соответствии с натурными данными и показателями водоносных пластов.

С целью измерения площади поверхности контакта зерен и изучения характеристик отдельных зерен, слагающих матрицу породы, применялся алгоритм Identify Pores пакет PoroDict [4]. Результаты выделения отдельных зерен из состава матрицы на базе созданных моделей показан на рис. 2.

По итогам анализа получены значения объемов, площади поверхности, периметра, формы каждого зерна. Далее новая модель с разделенными зернами используется для анализа контактной поверхности. На основе информации о количестве контактов (28814 шт) между зернами и площадей контактов для каждого зерна, находится общая площадь поверхности контакта зерен, которая составила $158.65 \times 10^{-6} \text{ м}^2$.

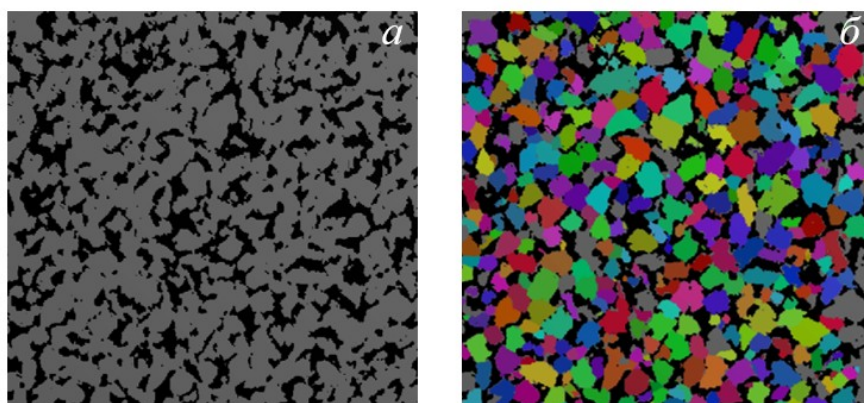


Рис. 2. Результат выделения зерен матрицы

В данной работе представлено описание методики и результаты исследований геометрических и структурных свойств керна на примере породы-коллектора ПХГ. На основе полученных снимков рентгеновской компьютерной томографии созданы 3D модели породы. С помощью цифрового анализа получены такие характеристики как пористость, площадь контактов и объем зерен матрицы породы, необходимые для наполнения гидродинамической и геомеханической моделей ПХГ. Знание данных характеристик коллекторов важно для описания процессов в пласте. Они составляют основу для определения проницаемости, связности пор, прочности и других параметров, которые влияют на эффективность добычи углеводородов и их хранение и необходимы при разработке новых методов увеличения добычи или повышения безопасности хранения углеводородов.

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

Список литературы:

1. Zhang P. et al. Multi-component segmentation of X-ray computed tomography (CT) image using multi-Otsu thresholding algorithm and scanning electron microscopy // Energy Exploration & Exploitation. – 2017. – Т. 35. – №. 3. – С. 281-294.
2. Химуля В.В., Барков С.О. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. №. 4 (39). С. 27-42.
3. GeoDict - The Digital Material Laboratory: [digital resource] URL: <https://www.math2market.de/> (Date of access: 23.09.2023).
4. Danicic L. Sensitivity Analysis of the Trapping Potential of Different Rock Types using Digital Rock Physics: diss. – University of Leoben, 2022.

Информация об авторах:

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

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

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