

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность предложенного метода определения упруго-прочностных свойств горных пород с высокой степенью неоднородности по сравнению с одноосным сжатием. Установлено, что разнородное строение литофаций одного минералогического состава оказывает существенное влияние на упруго-прочностные свойства.

**Литература**

1. Начев, В. А. Физико-математическое моделирование процессов механического разрушения пород-коллекторов в микро- и наномасштабах / В. А. Начев, А. В. Казак, С. Б. Турунтаев // ПРОНЕФТЬ. – 2019. – декабрь. – Вып. 4. DOI: 10/24887/2587-7399-2019-4-48-55
2. К вопросу использования индентирования для исследования свойств породы / И. Н. Степанкин [и др.] // SPE International : материалы Рос. нефтегаз. техн. конф., Москва, 12–15 окт. 2021 г. – М., 2021. – 11 с.
3. Способ определения предела прочности на сжатие образца горной породы : пат. 23260 Респ. Беларусь, МПК (2006.1) G 01 N 3/32 / Степанкин И. Н., Халецкий А. В., Ткачев В. М., Гутман Р. Е. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Опубл. 30.12.20.

УДК 004.942:622.276

**ЦИФРОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ КЕРНА**

**Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**И. Н. Степанкин, Р. Е. Гутман**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Представлены результаты применения принципов 3D-моделирования в отношении макроструктуры образцов горных пород. Проведены эксперименты по сегментации исходного рентгеновского изображения. На их основе построена конечно-элементная модель керна, пригодная для виртуального исследования с целью анализа напряженно-деформированного состояния и моделирования других геомеханических исследований.*

**Ключевые слова:** цифровой керн, геомеханика, компьютерная томография, сегментация.

**DIGITAL INTERPRETATION OF THE GEOMECHANICAL CORE MODEL**

**N. V. Bocharov, V.M. Tkachev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

**I. N. Stepankin, R. E. Hutman**

*BelNIPIneft RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The paper presents the results of the principles of 3D modeling application in relation to the macrostructure of rock samples. Experiments were carried out to make a segmentation of the original X-ray image. On their basis a finite element model of the core was built, suitable for virtual research in order to analyze the stress-strain state and simulate other geomechanical research.*

**Keywords:** digital core, geomechanics, computerized tomography, segmentation.

Цифровой керн – это мультимасштабная (от метров до нанометров) компьютерная совокупность данных об образце горной породы, включающая объемную 3D-модель образца, построенную на основе изображений рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Она содержит информацию о петрофизических, механических свойствах, а также информацию и о минеральном составе породы. Сегодня цифровое моделирование керна становится одним из традиционных лабораторных исследований, а иногда является единственно возможным.

В некоторых статьях рассматриваются цифровые модели образцов керна, применяемые для оценки фильтрационно-емкостных свойств [1–4]. Размеры таких образцов не превышают нескольких миллиметров. Образцы, применяемые для таких исследований, представляют собой материал с равномерно распределенной микропористостью, и не учитывают распространенную в Припятском прогибе вторичную неоднородность горных пород, представленную кавернами и трещинами. Данный факт не позволяет использовать эти модели для оценки упруго-прочностных характеристик пласта-коллектора.

Целью данной работы является анализ современных возможностей построения цифровых аналогов геомеханических моделей стандартных образцов керна для компьютерной топологической верификации их лабораторных исследований.

Высокая дискретизация томографической съемки – до 1–2 мкм осуществляется путем существенного уменьшения размеров образца – кусочки объемом несколько кубических миллиметров. Такой образец представляет собой однородный микропористый материал. Подобные модели применяются для моделирования характеристик проницаемости, многофазного течения, а также эффектов смачиваемости и капиллярности. Уменьшение образца приводит к существенному повышению объема информации, хранящейся в снимках КТ. Обработка таких изображений и создание на их основе 3D-моделей высокодетализированных структур, а также дальнейшее моделирование требует чрезвычайно больших вычислительных мощностей.

Высокое разрешение КТ не позволяет увеличить размер исследуемого образца до таких масштабов, которые помимо микропор могли бы учитывать еще и макрообъекты в виде крупных каверн и трещин, имеющих более высокое значение для геомеханических исследований.

Далее авторами статьи предлагается новый подход к созданию цифровой модели стандартного образца керна с сохранением макронеоднородностей, которые в большей степени влияют на прочностные характеристики образца.

Для создания цифровых геомеханических моделей керна необходимо использование стандартных образцов с размерами –  $\varnothing 30 \times 60$  мм. Томографическая съемка стандартных образцов возможна только с небольшим разрешением (около 30 мкм). При низкой степени дискретизации микропористость становится неразрешенной, но при этом сохраняются крупные макродефекты образца, именно они и влияют на упруго-прочностные свойства.

На этапе сегментации изображений компьютерной томографии, т. е. выделения различных фаз, неразрешенная микропористость (рис. 1) определяется как матрица, а каверны и трещины – как пустотное пространство. Данный подход позволяет сохранить именно геомеханически важные элементы, отражающие анизотропию керна.

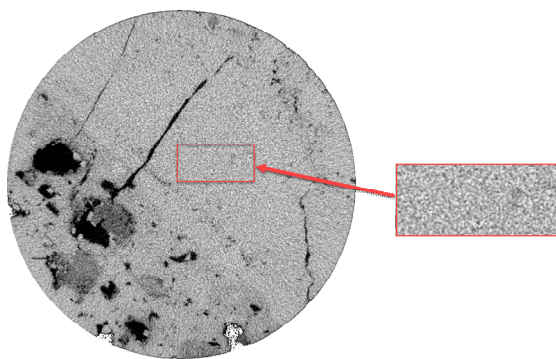


Рис. 1. Неразрешенная микропористость на снимке компьютерной томографии стандартного образца ядра

Для сохранения влияния микропор на этапе моделирования предлагается замена матрицы с неразрешенной микропористостью однородным материалом путем использования специальных алгоритмов, реализованных в различных программных продуктах для конечно-элементного анализа, например, алгоритм Друкера–Прагера. Таким образом, моделируется поведение конкретного образца ядра, при этом механические свойства его матрицы, во многом обусловленные литологически, определяются методом индентирования реальных образцов. Применение индентирования обусловлено тем фактом, что этим испытанием охватывается небольшой локально однородный объем образца, следовательно, на его результаты оказывает влияние микропористость, не учтенная при построении цифровой модели.

В качестве примера для опробования методики был выбран образец ядра с геометрическими размерами  $\varnothing 29,92 \times 61,76$  мм, отобранный из скважины № 524 5–6 пачки Речицкого месторождения. Создание объемной 3D-модели и конечно-элементной модели проводилось в специализированном ПО Avizo. Моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния были осуществлены с помощью программного пакета ANSYS. Результат создания цифрового геомеханического ядра представлен на рис. 2.

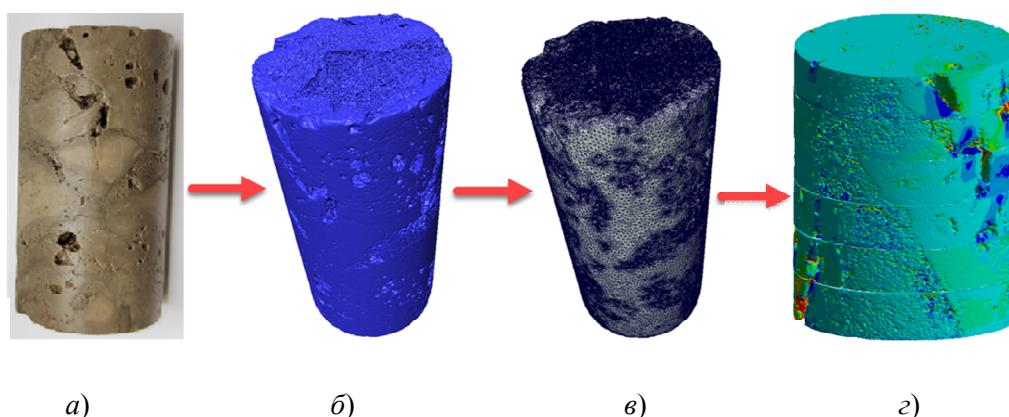


Рис. 2. Этапы создания цифровой геомеханической модели стандартного образца ядра № 5862 524 скважины Речицкого месторождения (слева-направо): а – КТ реального образца; б – создание объемной 3D-модели; в – создание конечно-элементной модели; г – распределение полей напряжений, полученных в результате численного моделирования

Таким образом, разработанный алгоритм сегментации – децимации результатов компьютерной томографии натурального образца керна горной породы позволил реализовать концепцию цифрового геомеханического керна в части оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности макродефектов – крупных каверн и трещин. Этапы реализации алгоритма обеспечивают продуктивное решение таких современных задач в отрасли нефтедобычи, как топологическая верификация результатов лабораторных исследований керна, создание виртуального кернохранилища и многократное использование одного и того же цифрового двойника для различных геомеханических тестов без опасения внесения деструктивных изменений в структуру горной породы.

#### Литература

1. Повжик, П. П. Комплексные методические подходы к изучению нетрадиционных пород-коллекторов на кернах в Республике Беларусь / П. П. Повжик, А. А. Ерошенко, Е. П. Калейчик // Нефтяник Полесья. – 2022. – № 2. – С. 108–113.
2. Characterization of Coal Micro-Pore Structure and Simulation on the Seepage Rules of Low-Pressure Water Based on CT Scanning Data / G. Zhou [et al.]. // Minerals. – 2016. – Vol. 6, iss. 78. <https://doi.org/10.3390/min6030078>
3. Kamaljit Singh Partial dissolution of carbonate rock grains during reactive CO<sub>2</sub>-saturated brine injection under reservoir conditions / Singh Kamaljit [et al.]. // Advances in – Water Resources. – 2018. – Vol. 122. – P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.09.005>
4. Визуализация качества трехмерных томографических изображений при создании цифровой модели керна / А. С. Корнилов [и др.] // Науч. визуализация. – 2020. – № 12.1. – С. 70–82. DOI: 10.26583/sv.12.1.06