

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

С.Н. Кривощёков, А.А. Кочнев

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

Предложены современные комплексы моделирования физических свойств горных пород, которые позволяют оперативно и достоверно получать широкий набор свойств пород на основании данных компьютерной томографии. Компьютерная томография – метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта, был предложен в 1972 г. Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком, удостоенными за эту разработку Нобелевской премии. Метод основан на измерении и сложной компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями. Сегодня компьютерная томография – это один из наиболее развивающихся методов изучения петрографических свойств горных пород. С его помощью мы можем изучать свойства как полноразмерных образцов керна, так и стандартных образцов. Проведено исследование терригенных и карбонатных пород. Метод рентгеновской томографии позволяет решать огромное количество геологических задач, например моделирование пустотного пространства (трещины, каверны, поры), подсчет пористости, исследование неоднородности породы, выделение различных включений в породе, подсчет объемов как образца керна, так и всех его пустот и включений и т.д.

Использование программного обеспечения Avizo Fire позволяет построить 3D-модели образца керна, порового пространства, каверн и трещин и минеральных включений. Компьютерная рентгеновская томография основана на неразрушающем изучении внутренней структуры материала и является методом послойного исследования структуры неоднородных образцов горных пород в рентгеновском излучении, основанным на зависимости линейного коэффициента поглощения в рентгеновском диапазоне от состава и плотности вещества. Другими словами, при просвечивании образца рентгеновские лучи в дефектах породы – кавернах, трещинах – поглощаются меньше, чем в более плотных участках. Если детектором служит фотопленка, то на ней получается изображение этих дефектов в виде темных точек, линий или пятен.

**Ключевые слова:** коллектор, пористость, проницаемость, терригенные породы, карбонатные породы, керн, рентгеновская томография, петрофизические исследования, неоднородность, трещины, каверны, соли, 3D-модель, Avizo Fire, нефть.

## APPLICATION EXPERIENCE OF COMPUTED TOMOGRAPHY TO STUDY THE PROPERTIES OF ROCKS

S.N. Krivoshhokov, A.A. Kochnev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Modern complexes for modeling physical properties of rocks, which allow fast and reliably produce a wide range of rock properties on the basis of computed tomography data are suggested. Computed tomography - a method of non-destructive study of the internal structure of layered object was proposed in 1972 by Godfrey Hounsfield and Allan Cormack, for this development they were awarded the Nobel Prize. The method is based on the measurement and complex computer processing of X-ray attenuation difference of different density fabrics. Today, computed tomography – is one of the fastest growing methods for studying petrographic properties of rocks. With it, we can study the properties of both the full-size core samples and standard samples. A study of clastic and carbonate rocks was carried out. X-ray tomography method allows solving a huge number of geological problems, such as modeling of the void space (fractures, cavities, pores), calculation of porosity, study of rock heterogeneity, selection of different inclusions in rocks, volumes calculation as the core sample, and all its inclusions and voids and etc.

Using software Avizo Fire allows you building 3D-model of the core sample, the pore spaces, cavities and fractures and mineral inclusions. X-ray computed tomography based on non-destructive study of the internal structure of the material and a method of investigating the structure of layered heterogeneous rock samples in the X-ray emission, based on the dependence of the linear absorption coefficient of X-rays on the composition and density of the substance. In other words, the sample is illuminated in X-rays in defects species – caverns, fractures – is less absorbed than in the denser areas. If the detector is photo film, then there is an image of these defects as dark dots, lines or spots.

**Keywords:** collector, porosity, permeability, clastic rocks, carbonate rocks, core, X-ray tomography, petrophysical studies, heterogeneity, fractures, cavities, salt, 3D-model, Avizo Fire, oil.

## Введение

Метод рентгеновской томографии является актуальным при исследовании фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов. Рентгеномографические методы используются в нефтяной геологии с конца 1980-х гг., в основном за рубежом [1–5]. Суть метода состоит в том, что рентгеновские лучи теряют мощность при прохождении сквозь породу пропорционально ее плотности и регистрируются на матрице приемника, составляя общие снимки породы уже на экране монитора. Далее происходит реконструкция снимков в трехмерный образец [6]. Это позволяет видеть общую картину породы – минеральный скелет, поры, трещины, включения, при этом не разрушая сам образец породы. Детально разобраться в свойствах породы на реконструированном образце позволяет программа VSG Avizo Fire.

Avizo Fire – программное обеспечение для 3D-визуализации, обработки и анализа научных и производственных данных с простым в использовании графическим интерфейсом пользователя. VSG Avizo – мощный универсальный инструмент для визуализации и анализа научных и промышленных данных. Благодаря удобному пользовательскому интерфейсу и современным технологиям VSG Avizo подходит для визуализации трехмерных данных материаловедения, геофизики, окружающей среды или любых других технических данных. В программном комплексе есть набор дополнительных модулей, каждый из которых имеет свой интерфейс и определенный набор инструментов для визуализации различных типов данных.

Пакет Avizo Fire – это широкий набор инструментов для загрузки, визуализации и получения качественной и количественной информации по различным типам данных. С помощью программы Avizo Fire можно визуализировать данные в таких областях науки, как про-

мышленная томография, кристаллография, развитие микроструктур, наноструктуры; проводить неразрушающие исследования и анализ томографии кернa.

Исследования горных пород были нами проведены на керновом материале нескольких скважин одного из месторождений Чарджоуской тектонической ступени, а также одного месторождения Волго-Уральской провинции.

При исследованиях использовались:

- 1) полноразмерные образцы кернa (диаметр 100 мм);
- 2) стандартные образцы кернa (диаметр 30 мм);
- 3) образцы кернa (диаметром менее 30 мм).

Также были проведены исследования кубических образцов пород Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей размером 50×50×50 мм.

Исследования полноразмерных образцов кернa позволяют увидеть общую картину зон трещин и каверн, а также макронеоднородностей породы. В итоге возможно определение объема трещин и каверн, расчет трещиноватости, а также определение типа коллектора. Коллекторы нефти и газа – горные породы, которые обладают емкостью, достаточной для того, чтобы вмещать углеводороды (УВ) разного фазового состояния (нефть, газ, газоконденсат), и проницаемостью, позволяющей отдавать их в процессе разработки [7]. Среди коллекторов нефти и газа преобладают осадочные породы.

При исследованиях стандартных образцов кернa ( $d = 30$  мм) возможно более детальное и точное изучение свойств горных пород, различных микропустот, также возможно изучение свойств неоднородностей до и после различного внешнего воздействия.

Исследуя образцы кернa малых размеров (менее 30 мм), возможно изучить структуру образца до мельчайших подробностей: минеральный состав, тип цемента, структуру зерен и пустот.

Все исследования проводились на базе системы рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии NikonMetrology XT H 225.

### **Исследования терригенных пород-коллекторов**

Петрографический метод изучения коллекторов является наиболее доступным и, следовательно, массовым при изучении литологических и коллекторских свойств пород. Помимо стандартного описания породы, этот метод позволяет оценивать структуру и генезис порового пространства, а также трещиноватость породы [8].

Для терригенных коллекторов основным показателем служит гранулометрический состав, форма и характер поверхности слагающих породу зерен. Минеральный состав и структурно-текстурные особенности являются результатом динамики и физико-географической обстановки осадконакопления. Одновременно с заложением седиментационных структур и текстур терригенных пород происходит и формирование первичной (седиментационной) пористости. *Структура* – строение породы, обусловленное величиной, формой зерен, степенью цементации. *Текстура* – характер взаимного расположения компонентов породы и их пространственная ориентация. Поровое пространство является компонентом структурно-текстурного облика породы. Поры, сформированные на этапе седиментогенеза, называются первичными, или седиментационными. Пустотное пространство, образованное в постседиментационных стадиях, считается вторичным, или эпигенетическим [9].

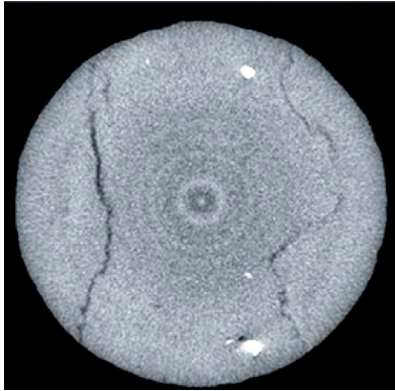
К петрографическим признакам, контролирующим первичную пористость, относятся: размер зерен, сортированность, форма зерен (степень изометричности), округленность зерен, характер упаковки, минеральный состав. К петрографическим признакам, определяющим вторичную (эпигенетическую) порис-

тость, относятся: эпигенетические текстуры, характеристика обломочных зерен, вторичные изменения (регенерация, растворение, перекристаллизация зерен), число контактов с соседними зернами, тип их сочленения (касательные, конформные, инкорпорационные и т.д.); тип цементации (базальный, поровый, открыто-поровый, пленочный); структура цемента (тонкозернистый, пойкилитовый, крустификационный и др.); типы пористости, связанные с вторичным преобразованием цемента (поры выщелачивания, перекристаллизации, трещинные поры и др.) [10, 11].

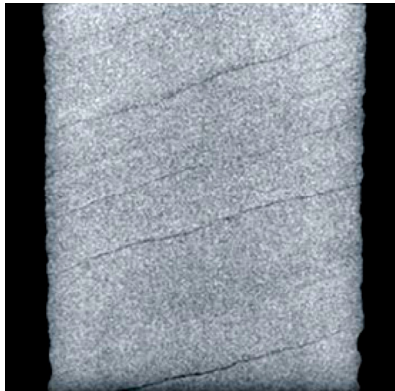
Таким образом, при характеристике петрографических признаков терригенных пород-коллекторов следует подробно характеризовать структуру (размер зерен, степень их окатанности, изометричности, сортированности), текстуру (характер укладки и ориентировки зерен), соотношение зерен и цемента в породе (в процентах); минеральный состав обломочных зерен и степень их измененности; минеральный состав цемента, а также морфологию и размеры пустотного пространства.

При исследовании полноразмерных терригенных пород удалось обнаружить локализацию трещин, пор, неоднородностей. Обнаруженные трещины, как правило, были очень узкими (ширина 0,001 мм), редко попадались и широкие с максимальной шириной раскрытия 1 мм. В раскрытых трещинах стоит отметить наличие кальцита (рис. 1).

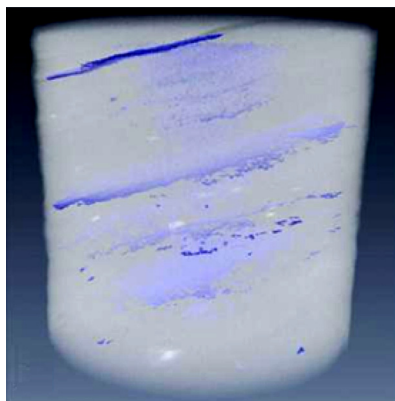
*Трещины* – это разрыв сплошности пород. Выделяются две крупные группы: литогенетические и тектонические трещины. Среди литогенетических различаются трещины диагенетические, возникшие при уплотнении осадка, катагенетические, возникшие уже в горной породе при перекристаллизации, и другие, есть трещины и более глубоких стадий преобразований. Тектонические трещины формируются под влиянием различных причин. Различают эпейроклазы,



а



б



в

Рис. 1. Терригенный полноразмерный образец: а – поперечный срез; б – продольный срез; в – 3D-вид образца

возникающие при колебательных эпэпигенических движениях, параклазы – при складкообразовательных движениях, вблизи тектонических разрывов, диаклазы – при дизъюнктивных нарушениях.

*Трещины* в породах бывают открытые и закрытые (за счет вторичного смыкания и минерализации). Вследствие тектонических процессов образуются системы трещин, ориентированных в определенной плоскости. Если вдоль трещин не происходит смещение пород или оно незначительно, то система трещин называется *трещиноватостью*. В одном пласте может быть несколько систем трещин, обычно разновозрастных [7].

Практический интерес представляют только открытые трещины, по которым может осуществляться миграция УВ. Обычно трещинная пористость составляет 2–3 %, иногда до 6 %. При характеристике трещин различают густоту, плотность и раскрытость трещин.

*Густота трещин* – количество трещин на 1 м длины в направлении, перпендикулярном простиранию трещин. *Плотность трещин* – густота трещин на 1 м<sup>2</sup> площади. Если в пласте одна система трещин, то величина плотности соответствует густоте.

*Раскрытость трещин* – расстояние между стенками трещин. Трещинные поры разделяются по степени раскрытости. По К.И. Багринцевой [8], трещины подразделяются на очень узкие (0,001–0,01 мм), узкие (0,01–0,05 мм), широкие (0,05–0,1 мм), очень широкие (0,1–0,5 мм) и макротрещины (> 0,5 мм).

При исследовании стандартных терригенных образцов нами были обнаружены те же трещины, что и в полноразмерных образцах, а также различные поры, неоднородность состава пород. Определена пористость пород. В основном пористость трещинная в интервале 7–15 %.

В терригенных породах были обнаружены поры, часто поры сопровождали трещины, они способствовали повыше-

нию пористости коллектора до 18–20 %. Выявлены и включения кальцита, предположительно залеченные поры и трещины. Размеры пор в среднем 0,4 мм.

При исследовании малых терригенных образцов керна диаметром менее 30 мм были обнаружены микротрещины и поры очень малых размеров. Был подсчитан размер пор и трещин и вычислен объем пор и пористость. Обработка образцов малых размеров позволила описать размер и форму зерен.

### **Исследования карбонатных пород коллекторов**

Карбонатные породы как коллекторы нефти и газа уверенно конкурируют с терригенными породами. По различным данным, от 50 до 60 % современных мировых запасов углеводородов приурочено к карбонатным образованиям.

Карбонатные породы-коллекторы – это прежде всего известняки и доломиты. Данные породы характеризуются сложным характером пустотного пространства, формирование которого определяется как их структурно-текстурными особенностями, закладываемыми в стадию седиментации, так и постседиментационными преобразованиями.

Спецификой карбонатных пород является широкий спектр структурных видов и меньшая по сравнению с алюмосиликатным веществом терригенных пород устойчивость породообразующих карбонатных минералов в условиях недр. Именно карбонатные породы наиболее часто представляют собой коллекторы сложного типа. В зависимости от стадий литогенеза выделяются поры седиментационного происхождения, обязанные своим появлением процессам осадконакопления, и постседиментационные, обусловленные диагенетическими и эпигенетическими преобразованиями осадка и породы [12].

В качестве первичных (седиментационных) компонентов известняков могут выступать зерна: обломочные, биоморф-

ные (цельносkeletalные, детритовые, шламовые, пелитовые), сфероагрегатные (оолиты, пизолиты, сферолиты, комки и др.), кристаллы различной размерности.

Кроме того, известняки могут представлять собой каркасные постройки (водорослевые, коралловые, кораллово-мшанковые), которые обычно характеризуются высокой полезной емкостью. Структурное разнообразие первичных доломитов существенно меньше. Чаще всего они представлены мелко- и тонкозернистыми кристаллитовыми или сфероагрегатными структурными разновидностями [13].

К петрографическим признакам, контролирующим первичную пористость карбонатных пород-коллекторов, относятся структурный тип зерен (обломочные, биоморфные, оолиты, сферолиты и др.) и степень их сохранности (цельносkeletalные, биодетритовые, шламовые); минеральный состав карбонатных минералов (по данным окрашивания ализариновым красным с соляной кислотой диагностируются кальцит и доломит, оценивается их процентное соотношение); форма, размер зерен или форменных образований; сортированность; характер упаковки; наличие или отсутствие микритового заполнителя.

В процессе изучения коллекторских свойств карбонатных толщ многими авторами неоднократно подчеркивалась решающая роль генезиса отложений, гидродинамики среды для формирования структуры пустотного пространства, которая может быть более или менее благоприятна для формирования коллекторов и определяет характер последующих преобразований.

В целом карбонатные породы легко подвергаются вторичным изменениям. Это связано с их повышенной растворимостью. Особенно велико влияние вторичных преобразований в породах с первично неоднородной структурой порового пространства (органогенно-обломочные разновидности).

*Каверны* – поры, образованные в результате растворения составных частей хомогенных или биогенных пород или разложения соединений, неустойчивых в определенных термобарических обстановках.

В исследованиях карбонатных полноразмерных образцов большой интерес представляют каверны, они довольно крупные, максимальные размеры 2–3 мм. Возможен подсчет каверновой и трещинной пористости, которая в среднем составляет 10 %. Некоторые трещины проходят сквозь весь образец, чаще продольно. Попадались и образцы, в которых трещины проходили под углом, или несколько трещин пересекались под различными углами. Более точную характеристику трещин дают опыты работы над стандартными образцами керна ( $d = 30$  мм).

Для коллекторов с пористым пространством были построены 3D-модели, а вот подсчитать пористость было трудно, так как в соотношении с полноразмерным образцом выделенные поры оказываются чрезвычайно малы и точно подсчитать пористость уже не удастся [14, 15]. Были выявлены рентгеноконтрастные включения кальцита, даже найдены ископаемые органические останки раковины гастропод.

При опытах работы над стандартными образцами карбонатных пород получены самые успешные результаты. В образцах обнаружены трещины, каверны, поры, включения кальцита (рис. 2).

В ходе исследования были зафиксированы совпадения каверн, определенных ранее в полноразмерных образцах. Каверны достаточно крупные – ширина раскрытия в пределах 3 мм, в некоторых образцах каверны соединены каналами и занимают довольно большой объем. Представить эти каверны с помощью метода компьютерной томографии получилось наглядно. Каверновая пористость в среднем около 15 %. Трещины значительно меньше каверн, раскрытость их

в среднем около 1 мм. Трещинная пористость в среднем около 5 %.

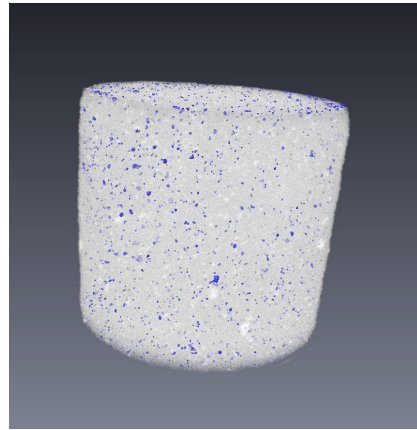


Рис. 2. Образец карбонатной породы: синий цвет – поры, белый – включения кальцита

В других типах образцов были зафиксированы поры. Поры по размерам крупные, по форме округлые, открытые. Коллектор такого типа высокопористый от 20 до 30 %. Встречалось также много пор, залеченных кальцитом, что вызывает неоднородность в распределении пор по слоям. Встречались и образцы смешанных типов, где присутствовали поры в синтезе с трещинами и кавернами, пористость этих образцов несколько ниже керна с одними порами, но выше, чем у образца только с кавернами и трещинами. Пористость таких образцов в среднем около 18 %. При пористом керне объем залеченных пор составляет в среднем около 2 % от общего объема, при трещинно-каверновом в среднем 0,1 %, а при смешанном типе образцов – около 4 %.

Метод исследования позволяет нам сравнить карбонатные породы до воздействия соляной кислоты и после. Результат представлен довольно наглядно и подтвержден численно. Каналы в образцах значительно расширились и в некоторых случаях соединились, также создались новые каналы, пористость, соответственно, тоже возросла (рис. 3).

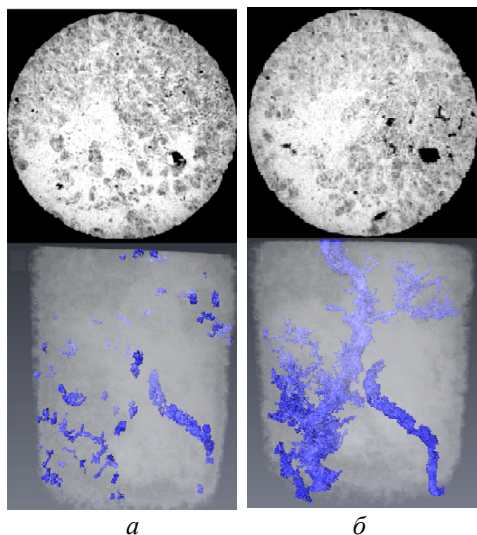


Рис. 3. Образец карбонатной породы в разрезе и 3D-вид каналов: *а* – до воздействия соляной кислоты; *б* – после воздействия соляной кислоты

### Исследование соленосных горных пород

Проводилось исследование образцов сильвинитов ВКМКС кубической формы до воздействия на них нагрузки сжатия, после первой нагрузки, а затем после повторной нагрузки, соответствующей пределу прочности образца на

сжатие. Сильвинит – осадочная горная порода, состоящая из чередующихся слоев галита и сильвина ( $n\text{NaCl} + m\text{KCl}$ ) и некоторых примесей (гематит и др.). Соотношение между хлоридами калия и натрия в сильвините непостоянно. В виде примесей обычно содержит немного песка, глины, гипса и др. Имеет неоднородную окраску – встречаются красные, розовые, синие и оранжевые кристаллы. В воде растворим почти полностью (кроме примесей). Сильвинит – важнейшее сырье для получения хлорида калия, применяется как калийное удобрение.

Нагружение образцов производилось на «жестком» электромеханическом прессе. После сканирования образцов производилась их реконструкция, а далее компьютерная обработка в программе Avizo Fire. При компьютерной обработке накладывались фильтры анизотропной диффузии (3 итерации) для удаления цифровых шумов, а также фильтры сглаживания и контраста для формирования необходимого изображения для анализа. Далее необходимо разделение породы и пустот, для этого используется бинаризация. А в конце производятся расчеты объемов породы и пустот (в нашем случае трещин).

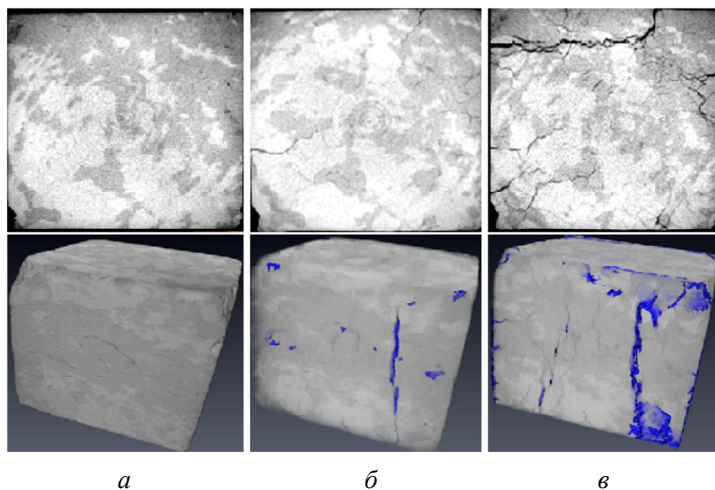


Рис. 4. Образец в ходе исследований: *а* – до сжатий; *б* – после первого сжатия; *в* – после второго сжатия



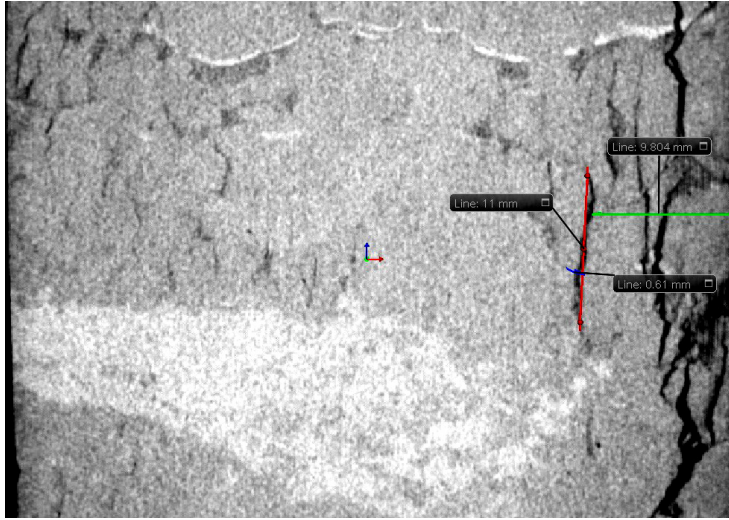


Рис. 5. Размеры трещины: длина (11 мм), ширина (0,61 мм), расстояние до края образца (9,804 мм)

Результат – не только цифровые значения объемов, но и представление в пространстве самого образца и трещин, также модели дают представление о пространственном расположении трещин. Размеры трещин программа тоже позволяет отразить на экране. В ходе исследований трещинная пористость возростала приблизительно на 1 % в каждом образце, что мы видели визуальнo и на численных результатах. Ширина трещин, соответственно, возростала с каждым разом. Так, например, на одном из образцов в первый раз ширина раскрытия трещин была 0,01–0,1 мм; во второй раз 0,19–0,5 мм; в третий раз 0,26–1,4 мм. Объем трещин тоже заметно увеличился с 45,4 мм<sup>3</sup> до 1806,8 мм<sup>3</sup>. При визуализации 3D-моделей внутри образцов были обнаружены различные неоднородности, включения других минералов, примеси глинистого материала. Было отмечено слоистое строение, где слои каменной соли (сильвинита) разделены тонкими прослоями глинисто-ангидритового материала (рис. 4, 5).

### Заклoчение

Рентгеновская томография керна – очень перспективный метод при исследовании

петрофизических свойств горных пород. Метод позволяет решать огромное разнообразие прикладных и фундаментальных геологических задач. Мы можем полностью визуализировать породу в 3D-изображении и проанализировать все ее свойства, выделить трещины, поры, каверны, включения, а также неоднородности, различные слои породы и дифференциацию плотности. Рентгеновская томография позволяет исследовать образцы: стандартные, полноразмерные, меньше 30 мм в диаметре, а также кубы соли.

Исследования позволяют осуществить контроль емкостно-фильтрационных свойств коллекторов, определить пористость трещинную, каверновую, гранулярную, посчитать объемы образца, трещин, каверн, пустот, минеральных включений.

Анализ деформаций, разрушений, возникновения трещин в керне требует высокого разрешения, так как возникающие неоднородности имеют небольшие размеры. Для этой цели в томографе применяется твердотельный рентгеновский детектор высокого разрешения и рентгеновская трубка с малым фокус-



ным пятном. Применение данных компонентов позволяет добиться высокого разрешения томографии при сканировании полноразмерного керна.

С помощью томографов могут изучаться различные свойства образца: пористость, объемная плотность, плотность матрицы, нефте- и водонасыщенность, литология, распределение пор по размерам, вязкость, влажность, диффузионный коэффициент, зоны разрушения, степень проникновения бурового раствора, сжимаемость и др.

Быстрое сканирование может обеспечить воссоздание изображений в очень короткий временной интервал, наблюдение динамики течения флюида через породу. Именно эта визуализация характеристик керна в динамических условиях и делает компьютерную томографию незаменимой в науке. Метод использовался и в изучении механических свойств горных пород. Успешно проведены исследования прочностных характеристик образцов силвинитов кубической формы. Произведена оценка характеристик образцов до и после внешних воздействий.

Использование компьютерного томографа обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным подходом к исследованию образцов керна и моделированию физико-химических процессов:

- Снижение стоимости исследований.
- Сокращение сроков проведения исследований.

- Снижение технологических и финансовых рисков за счет уменьшения неопределенности, а также повышения достоверности и детальности получаемой информации.

- Возможность проведения экспериментов, неосуществимых в физической лаборатории, в том числе при экстремальных термобарических условиях, а также на неконсолидированном керна.

- Возможность проведения серии многовариантных численных экспериментов на одном образце (при ограниченном наборе физических образцов).

- Возможность учитывать изменения структуры, и соответственно ФЕС, образца при его извлечении из пласта и транспортировке путем восстановления исходной структуры.

- Возможность проведения пространственной интерполяции (экстраполяции) между образцами по каждому параметру (или группе параметров) отдельно и лишь после этого усреднения и рекомбинации свойств. Такой подход существенно повышает точность и достоверность прогноза ФЕС.

Метод широко используется в различных странах и позволяет нам оставаться конкурентоспособными в мире геологических исследований.

#### Список литературы

1. Otani J., Obara Y. X-ray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks. – CRC Press, 2004. – P. 152–158.

2. Formation factor for heterogeneous carbonate rocks using multi-scale X-ray-CT images / A.D. Khalili, S. Yanici, Y. Cinar, C.H. Arns // Society of Petroleum Engineers: Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition 2012, KIPCE 2012: People and Innovative Technologies to Unleash Challenging Hydrocarbon Resources. – 2012. – Vol. 2. – P. 1054–1066.

3. Permeability upscaling for carbonates from the pore-scale using multi-scale X-ray-CT images / A.D. Khalili, C.H. Arns, J.-Y. Arns, F. Hussain, Y. Cinar, W.V. Pinczewski, S. Latham, J. Funk // Society of Petroleum Engineers: SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition 2012. – P. 606–622.

4. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography ( $\mu$ CT) / R. Toppkötter, T. Eickhorst, H. Taubner, B. Gredner, G. Rademaker // Soil and Tillage Research. – 2009. – Vol. 105, iss 1. – P. 12–20.

5. Desrues J., Viggiani G., Bésuelle P. Advances in X-ray Tomography for Geomaterials. – Korolev: John Wiley & Sons, 2010. – P. 80–87.

6. Жуковская Е.А., Лопушняк Ю.М. Использование рентгеновской томографии при исследовании терригенных и карбонатных коллекторов // Геология и геофизика. – 2008. – № 1. – С. 24–31.
7. Геология и геохимия нефти и газа / О.К. Баженова, Ю.К. Бурлин [и др.] – М.: Академик, 2004. – 415 с.
8. Багринцева К.И. Карбонатные породы-коллекторы нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 257 с.
9. Галкин В.И., Кочнева О.Е. Геология и геохимия нефти и газа: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 176 с.
10. Петрофизические методы исследования ядерного материала: учеб. пособие: в 2 кн. / М.К. Иванов, Ю.К. Бурлин, Г.А. Калмыков, Е.Е. Карнюшина, Н.И. Коробова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – С. 91–97.
11. Бакиров Э.А., Ермолкин В.И., Ларин В.И. Геология нефти и газа. – М.: Недра, 1990. – 245 с.
12. Методические рекомендации по изучению и прогнозу коллекторов нефти и газа сложного типа / под ред. М.Х. Булач, Л.Г. Белоновской / Всерос. науч.-исслед. геологоразвед. ин-т. – Л.: 1989. – 103 с.
13. Мстиславская Л.П., Филиппов В.П. Геология, поиски и разведка нефти и газа: учеб. пособие. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2005. – 199 с.
14. Журавлев А.В., Вевель Я.А. Возможности использования вычислительной микротомографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 2. – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/2/21\\_2012.pdf1](http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf1) (дата обращения: 14.01.2013).
15. Еременко Н.М., Муравьева Ю.А. Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 3. – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/2/35\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf) (дата обращения: 14.01.2013).

#### References

1. Otani J., Obara Y. X-ray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks. CRC Press, 2004, pp. 152–158.
2. Khalili A.D., Yanici S., Cinar Y., Arns C.H. Formation factor for heterogeneous carbonate rocks using multi-scale X-ray-CT images. *Society of Petroleum Engineers: Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition 2012: People and Innovative Technologies to Unleash Challenging Hydrocarbon Resources*. Kuwait, 2012, vol. 2, pp. 1054–1066.
3. Khalili A.D., Arns C.H., Arns, J.-Y., Hussain F., Cinar Y., Pinczewski W.V., Latham S., Funk J. Permeability upscaling for carbonates from the pore-scale using multi-scale X-ray-CT images. *Society of Petroleum Engineers. SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition 2012*, pp. 606–622.
4. Tippkötter R., Eickhorst T., Taubner H., Gredner B., Rademaker G. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography ( $\mu$ ct). *Soil and Tillage Research*. 2009, vol. 105, iss 1, pp. 12–20.
5. Desrues J., Viggiani G., Bésuelle P. *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*. John Wiley & Sons, 2010, pp. 80–87.
6. Zhukovskaya E.A., Lopushnyak Yu.M. Ispol'zovanie rentgenovskoj tomografii pri issledovanii terrigenykh i karbonatnykh kolektorov [Using X-ray tomography in the study of clastic and carbonate reservoirs]. *Geologiya i geofizika*, 2008, no 1, pp. 24–31.
7. Bazhenova O.K., Burlin Yu.K. Geologiya i geokhimiya nefiti i gaza [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow: Akademik, 2004. 415 p.
8. Bagrinceva K.I. Karbonatnye porody-kollektory nefiti i gaza [Carbonate reservoir rocks of oil and gas]. Moscow: Nedra, 1977. 257 p.
9. Galkin V.I., Kochneva O.E. Geologiya i geokhimiya nefiti i gaza [Geology and geochemistry of oil and gas]. Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politexnitshtckij universitet, 2012. 176 p.
10. Ivanov M.K., Burlin Yu.K., Kalmykov G.A., Karnyushina E.E., Korobova N.I. Petrofizicheskie metody issledovaniya kernovogo materiala [Petrophysical research methods of core material: training manual]. Moskoskij universitet, 2008, pp. 91–97.
11. Bakirov E'.A., Ermolkin V.I., Larin V.I. Geologiya nefiti i gaza [Oil and gas geology]. Moscow: Nedra, 1990. 245 p.
12. Bulach M.X., Belonovskaya L.G. Metodicheskie rekomendacii po izucheniyu i prognozu kolektorov nefiti i gaza slozhnogo tipa [Methodic recommendations for studying and forecasting of oil and gas

reservoirs complex type]. Leningrad: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij geologo-razvedochnyi institut, 1989. 103 p.

13. Mstislavskaya L.P., Filippov V.P. Geologiya, poiski i razvedka nefiti i gaza [Geology, prospecting and exploration of oil and gas]. Moscow: CentrLitNefteGaz, 2005. 199 p.

14. Zhuravlev A.V., Vevel' Ya.A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya vychislitel'noj mikrotomografii v mikropaleontologicheskix i litologicheskix issledovaniyax [The possibility of using computer microtomography in micropaleontological and lithological studies]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2012, vol. 7, no. 2, available at: [http://www.ngtp.ru/rub/2/21\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf) (accessed 14 January 2013).

15. Eremenko N.M., Murav'eva Yu.A. Primenenie metodov rentgenovskoj mikrotomografii dlya opredeleniya poristosti v kerne skvazhin [Application of the methods of X-ray microtomography to determine porosity in the core of wells]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2012, vol. 7, no. 3, available at: [http://www.ngtp.ru/rub/2/35\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf) (accessed 14 January 2013).

#### Об авторах

**Кривощёков Сергей Николаевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: [krivoshchekov@pstu.ru](mailto:krivoshchekov@pstu.ru)).

**Кочнев Александр Александрович** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: [sashakoch1@rambler.ru](mailto:sashakoch1@rambler.ru)).

#### About the authors

**Krivoshhokov Sergej Nikolaevich** (Perm, Russia) – candidate of geological and mineralogical sciences, associate professor of oil and gas geology department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: [krivoshchekov@pstu.ru](mailto:krivoshchekov@pstu.ru)).

**Kochnev Aleksandr Aleksandrovich** (Perm, Russia) – student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: [sashakoch1@rambler.ru](mailto:sashakoch1@rambler.ru)).

Получено 28.02.2013