

**С.Н. Кривошеков, А.А. Кочнев**  
**S.N. Krivoshchekov, A.A. Kochnev**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ  
ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА**

**DETERMINATION OF RESERVOIR PROPERTIES  
OF RESERVOIR ROCKS USING X-RAY IMAGING CORE**

Предложены современные комплексы моделирования физических свойств горных пород, которые позволяют оперативно и достоверно определять широкий набор свойств пород на основании данных компьютерной томографии. Использование программного обеспечения Avizo Fire позволяет построить 3D-модели образца керна, порового пространства, каверн и трещин и минеральных включений.

Offered modern complexes modeling the physical properties of rocks, which allow fast and reliably produce a wide range of properties of rocks based on data computed tomography. Using software Avizo Fire allows you to build a 3D-model of the core sample, the pore space, cavities and cracks and mineral inclusions.

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

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

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 – развивающийся метод изучения петрографических свойств горных пород. С его помощью мы можем изучать свойства как полноразмерных образцов керна, так и стандартных образцов. Нами проведено исследование терригенных и карбонатных

пород. Метод рентгеновской томографии позволяет решать огромное количество геологических задач, таких как 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.

Метод рентгеновской томографии является очень актуальным методом при исследовании фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов. 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 [1]. Это позволяет видеть общую картину породы – все ее поры, трещины, включения, 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 графическим интерфейсом. 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. Программный комплекс имеет 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 промышленная томография, кристаллография, развитие микроструктур, наноструктуры, проводить неразрушающие исследования и анализ томографии керна.

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

При исследованиях использовались:

1. Полноразмерные образцы керна диаметром 100 мм.
2. Стандартные образцы керна диаметром 30 мм.
3. Образцы керна диаметром менее 30 мм.

Исследования полноразмерных образцов керна позволяют составить 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 разного фазового состояния (нефть, газ, газоконденсат), и проницаемостью, позволяющей отдавать их в процессе разработки [2]. Среди коллекторов нефти и газа преобладают осадочные породы.

При исследованиях стандартных образцов керна ( $d = 30$  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 керна 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, наиболее широко применяемым при изучении литологических и коллекторских свойств пород. Помимо стандартного описания породы этот метод позволяет оценивать структуру и генезис порового пространства, а также трещиноватость пород [3].

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 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. Пory, сформированные на этапе седиментогенеза, называются первичными или седиментационными. Пустотное пространство, образованное в постседиментационные стадии, считается вторичным или эпигенетическим [4].

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) пористость, относятся: эпигенетические текстуры; характеристика обломочных зерен: вторичные изменения (регенерация, растворение, переكري-

сталлизация зерен), число контактов с соседними зернами, тип их сочленения (касательный, конформный, инкорпорационный и т.д.); цемент: тип цементации (базальный, поровый, открыто-поровый, пленочный); структура цемента (тонкозернистый, пойкилитовый, крустификационный и др.); типы пористости, связанные со вторичным преобразованием цемента (поры выщелачивания, перекристаллизации, трещинные поры и др.) [5, 6].

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 (%); 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, очень узкие (ширина 0,001 мм), редко попадались и широкие, с максимальной шириной раскрытия 1 мм. В раскрытых трещинах стоит отметить наличие кальцита (рис. 1).

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 смещения пород или оно незначительно, то система трещин называется трещиноватостью. В одном пласте может быть несколько систем трещин, обычно разновозрастных.

Практический интерес представляют только открытые трещины, по которым может осуществляться миграция углеводородов. Обычно трещинная пористость составляет 2–3 %, иногда до 6 %. При характеристике трещин учитывают 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 [3], 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, 7–15 %.

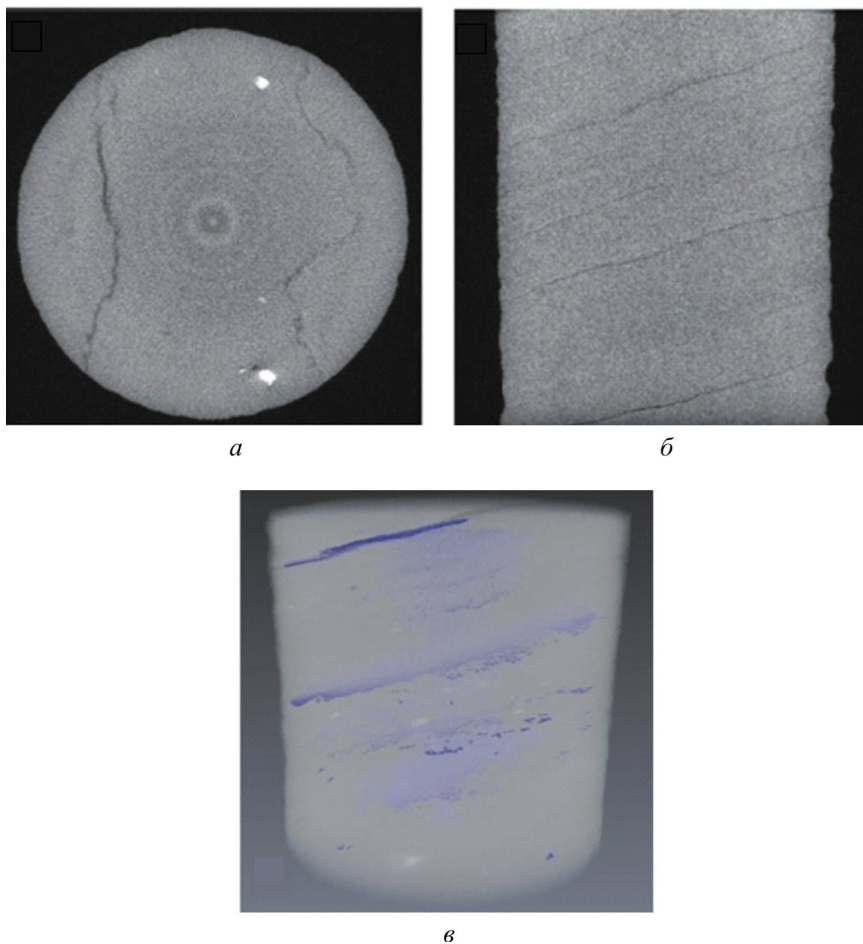


Рис. 1. Терригенный полноразмерный образец:  
 а – поперечный срез; б – продольный срез; в – 3D-вид образца

В терригенных породах были обнаружены поры, часто поры сопровождали трещины, они способствовали повышению пористости коллектора до 18–20 %. Выявлены и включения кальцита, предположительно залеченные поры и трещины. Размеры пор в среднем 0,4 мм.

Исследуя малые терригенные образцы керна диаметром менее 30 мм, обнаружили микротрещины и поры 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-коллекторы – это прежде всего известняки и доломиты. Данные породы характеризуются сложным характером пустотного пространства, формирование которого определяется как их структурно-текстурными особенностями, за-

кладывающимися 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 [7].

В качестве первичных (седиментационных) компонентов известняков могут выступать зерна: обломочные, биоморфные (цельноскелетные, 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 [8].

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

Каверны – поры, образованные в результате растворения составных частей хемогенных или биогенных пород или разложения соединений, неустойчивых в определенной термобарической обстановке.

В исследованиях карбонатных полноразмерных образцов каверны представляют большой интерес, 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, но подсчитать пористость было трудно, так как в соотношении с полноразмерным образцом выделенные поры оказываются чрезвычайно малы [9, 10]. 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).

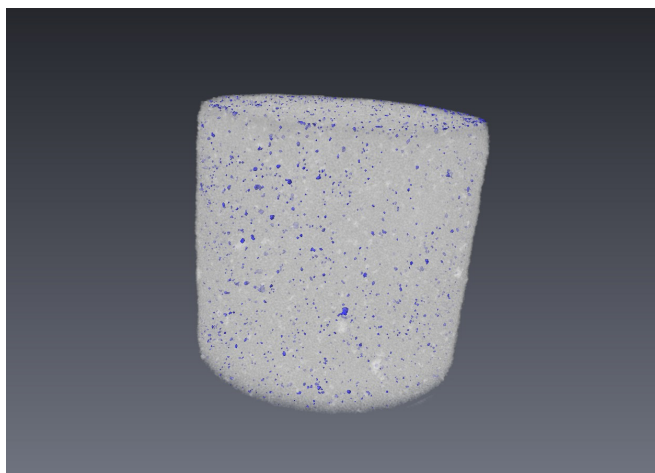


Рис. 2. Образец карбонатной породы:  
синий цвет – поры; белый – включения кальцита

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. С помощью метода компьютерной томографии получилось наглядно представить эти каверны. Каверновая пористость в среднем около 15 %. Трещины значительно меньше каверн, раскрытость их в среднем около 1 мм. Трещинная пористость в среднем около 5 %.

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. Также встречались образцы смешанных типов, где присутствовали поры в синтезе с трещинами и кавернами, пористость этих образцов несколько ниже пористости керна с одними порами, но выше, чем у образца только с кавернами и трещинами. Пористость таких образцов в среднем около 18 %. При пористом керна объем

залеченных пор составляет в среднем около 2 % от общего объема, при трещинно-каверновом – в среднем 0,1 %, а при смешанном типе – около 4 %.

Рентгеновская томография ядра – 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, 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 фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, определить пористость трещинную, каверновую, гранулярную, посчитать объемы образца, трещин, каверн, пустот, минеральных включений.

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 ядра в динамических условиях и делает компьютерную томографию незаменимой для науки. Метод широко используется в различных странах и позволяет нам оставаться конкурентоспособными в области мировых геологических исследований.

### **Список литературы**

1. Жуковская Е.А., Лопушняк Ю.М. Использование рентгеновской томографии при исследовании терригенных и карбонатных коллекторов // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 3. – С. 24–31.

2. Геология и геохимия нефти и газа: учебник / О.К. Баженова [и др.]. – М.: Академик, 2004. – 415 с.

3. Багринцева К.И. Карбонатные породы-коллекторы нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 257 с.

4. 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.

5. Петрофизические методы исследования ядерного материала: учеб. пособие: в 5 кн. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – Кн. 1. – 112 с.



6. Бакиров Э.А., Ермолкин В.И., Ларин В.И. Геология нефти и газа. – М.: Недра, 1990. – 245 с.

7. Методические рекомендации по изучению и прогнозу коллекторов нефти и газа сложного типа / под ред. М.Х. Булач, Л.Г. Белоновской; Всерос. нефтян. науч.-исслед. геологоразвед. ин-т. – Л., 1989. – 103 с.

8. Мстиславская Л.П., Филиппов В.П. Геология, поиски и разведка нефти и газа: учеб. пособие. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2005. – 199 с.

9. 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.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf) (дата обращения: 12.03.2014).

10. 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: 12.03.2014).

11. О возможности прогнозирования нефтегазоносности фаменских отложений с помощью построения вероятностно-статистических моделей / В.И. Галкин, И.А. Козлова, С.Н. Кривошеков, Е.В. Пятунина, С.Н. Пестова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 10. – С. 22–27.

Получено 25.03.2014

**Кривошеков Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, ГНФ, e-mail: [krivoshchekov@pstu.ru](mailto:krivoshchekov@pstu.ru).

**Кочнев Александр Александрович** – студент, ПНИПУ, ГНФ, гр. ГНГ-12-2, e-mail: [sashakoch1@rambler.ru](mailto:sashakoch1@rambler.ru).