

САВИЦКИЙ ЯН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ПУСТОТНОГО  
ПРОСТРАНСТВА КОЛЛЕКТОРОВ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ  
ТОМОГРАФИИ КЕРНА**

1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых  
месторождений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь, 2023

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Галкин Сергей Владиславович,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Татаркин Алексей Викторович**  
доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке Общества с ограниченной ответственностью Научно-исследовательское, проектное и производственное предприятие по природоохранной деятельности «НЕДРА» (г. Пермь)  
**Юрьев Александр Вячеславович,**  
кандидат технических наук, ведущий инженер Управления поддержки бизнеса по лабораторным исследованиям (г.Кунгур) Центра исследований ядра и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Пермь

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2023 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.15, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» ([www.pstu.ru](http://www.pstu.ru)).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.15,  
кандидат технических наук, доцент

А.А. Мелехин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние десятилетия при изучении емкостного пространства горных пород, помимо стандартных лабораторных методов, применяются методы неразрушающего контроля, прежде всего рентгеновская томография керн. Томографический метод позволяет не только получить количественную оценку пористости пород, но и визуализировать структуру порового пространства, что особенно важно в условиях усложнения строения геологических объектов и повышения доли трудноизвлекаемых запасов нефти и газа. Метод рентгеновской томографии позволяет изучать керн как в его ненарушенном состоянии, так и после применения различных технологий воздействия, изменяющих структуру емкостного пространства.

### **Степень разработанности темы исследования**

В настоящее время рентгеновскую томографию керн проводят в нескольких отечественных исследовательских центрах: МГУ им. М.В.Ломоносова, Московский центр исследований Schlumberger в Москве, ЦКП «Микроанализ» в Сколково, ВНИГРИ в Санкт-Петербурге, СИБКОР, ТНЦ в Тюмени, ТомскНИ-ПИНефть ВНК в Томске, Казанский Федеральный университет.

Применение рентгеновской томографии при исследованиях кернов горных пород описано в научных работах таких российских авторов как Еременко Н. М., Муравьева Ю. А., Жуковская Е. А., Лопушняк Ю. М., Журавлев А.В., Вевель Я.А., Калмыков Г.А., Ахманов Г.Г., Надеев, А.Н.Рыжиков, Н.И. и др. За рубежом над данной тематикой работает множество авторов, в том числе Arns С.Н., Carlson W.D., Hsieh J., Ketcham, R.A., Khalili A.D., Van Geet, M., Liang W., Saadat K., Zhang H. и др.

Тем не менее, на данный момент не существует единой методики и общего научного подхода в исследовании керн методом рентгеновской томографии, поскольку сам метод не является очень распространенным вследствие высокой стоимости установок томографии и большой разницы в их характеристиках. Предлагаемый в диссертационной работе подход к настоящему времени в научной литературе не описан.

**Целью работы** является разработка методики исследования керн и способа определения емкостных характеристик карбонатных и терригенных пород-коллекторов методом компьютерной рентгеновской томографии.

**Задачи исследований** исходят из основной цели и могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) создание базы исследований кернов горных пород методом рентгеновской томографии;
- 2) обоснование эффективности использования метода томографической съемки для изучения пустотности образцов керн;
- 3) определение методом рентгеновской томографии качественных характеристик керн и типизации структурно-текстурных свойств керн;
- 4) определение методом рентгеновской томографии количественных фильтрационно-емкостных характеристик керн;
- 5) обоснование возможностей метода для оценки воздействия на керн различных технологий повышения эффективности нефтедобычи.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются образцы керн горных пород, являющихся коллекторами нефти и газа карбонатного и терригенного состава.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются фильтрационно-емкостные свойства и структура емкостного пространства керн коллекторов нефти и газа, определяемые с помощью метода компьютерной рентгеновской томографии

### **Научная новизна и теоретическая значимость выполненной работы**

Создана база рентгеновских моделей керн для месторождений Пермского края. Разработаны методики оценки характеристик пустотного пространства керн карбонатных и терригенных пород с помощью метода рентгеновской томографии. Метод использован при изучении воздействия на керн различных технологий повышения эффективности нефтеотдачи пластов.

**Практическая значимость работы.** В работе обобщается опыт применения метода в исследовании пород-коллекторов, который позволяет более полно и комплексно исследовать внутреннюю структуру керн, выявлять взаимосвязь структуры порового пространства с количественными характеристиками, получаемыми с помощью стандартных методов исследования, дополнять литолого-петрографическую характеристику керн, сохранять информацию о строении образцов керн, подвергающихся воздействию реагентами или разрушению. Применение полученных данных и методик позволит улучшить качество и объем информации, получаемой при исследованиях керн.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (номер гранта НШ-1010.2022.1.5).

### **Методология и методы исследования**

Для выполнения работы было проведено исследование с помощью метода компьютерной рентгеновской томографии более 300 образцов керн, все из которых исследованы также стандартными методами определения фильтрационно-емкостных свойств. Были исследованы как карбонатные, так и терригенные образцы керн, являющиеся самыми распространенными типами пород, участвующими в строении продуктивных пластов.

Томография образцов выполнена на установке Nikon Metrology XTH 225, реконструкции выполнялись с помощью программы Nikon Metrology CT Pro 3D. Обработка результатов томографии выполнена в программном комплексе Avizo, для создания цифровых моделей керн использовались скрипты на языке Python.

### **Защищаемые положения**

1. Установлено, что исследования, выполненные методом рентгеновской томографии, позволяют оценить неоднородность емкостного пространства с учетом пустот различных типов.

2. Разработана методика визуализации порового пространства моделей керн, созданных методом компьютерной рентгеновской томографии для пород-коллекторов с межзерновым типом пористости.

3. Обоснована необходимость применения метода рентгеновской томографии для изучения изменений структуры пустотного пространства при воздействии на керн различных технологий.

**Личный вклад автора** заключается в проведении съемок кернов методом рентгеновской томографии, обработке результатов исследований образцов в программном комплексе Avizo, подготовке графического материала результатов съемок, анализе результатов томографии, построении объемных моделей кернов (томограмм), проведении измерений емкостных характеристик горных пород.

**Степень достоверности результатов исследований** подтверждается экспериментально на базе более 300 образцов керна, использованием высокотехнологичного оборудования для исследования керна и сходимости результатов с данными, полученными по стандартным методикам.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты диссертационной работы представлены в виде докладов на Всероссийской конференции «Практическая микротомография» (Москва, 2013), VI Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (Пермь, 2013), VII Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (Пермь, 2014), Международной конференции «Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics» (Баку, 2018), XXII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (Пермь, 2021).

#### **Публикации по теме работы**

Основные положения диссертации отражены в 16 научных работах, в том числе в шести статьях по списку ВАК; восьми – в периодических изданиях, индексируемых в международных базах данных научного цитирования Scopus, Web of Science. Также получено два патента на изобретения в соавторстве.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 146 страницах печатного текста, включая 67 рисунков и 15 таблиц. Список литературы состоит из 139 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю – доктору геолого-минералогических наук, профессору С.В. Галкину. Автор выражает особую благодарность к. т. н. О.А. Мелкишеву за большую техническую помощь при выполнении работы, а также всему коллективу кафедры «Геологии нефти и газа» за поддержку и ценные советы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** устанавливается актуальность проблемы, определяются цели и основные задачи исследования, формулируются защищаемые положения, излагаются новизна и практическая значимость исследования.

**В первой главе** рассматривается принцип действия компьютерной рентгеновской томографии (КТ). Метод основан на создании группы последовательных изображений томографируемого объекта, из которых, в дальнейшем, с помощью специального математического преобразования создается объемная

компьютерная 3D-модель. Часть главы посвящена истории применения метода в геологической отрасли, в том числе в нефтяной геологии [13].

В главе приведен обзор основных современных систем томографии, в число которых входит используемый в диссертационных исследованиях томограф Nikon Metrology XTH225 [11, 12]. Данная система рентгеновского контроля является универсальной, позволяя проводить исследования полноразмерных образцов (диаметром до 100 мм), стандартных образцов (диаметром 30 мм) и образцов размером 5-10 мм. Макрофокусный режим возможен благодаря высокой рабочей разности потенциалов в 210 кВ, а микрофокусный – благодаря конструкционной способности изменения расстояния между образцом и детектором

В главе рассмотрены принципы обработки трехмерных изображений, получаемых методом рентгеновской томографии [9].

В главе также рассмотрено влияние на достоверность результатов томографии ряда артефактов, возникающих на первичном этапе обработки рентгеновских изображений. В результате анализа выделены основные виды артефактов и способы устранения их влияния [14].

В диссертации рассмотрена проблема оценки первичной пористости, представленной в терригенных породах межзерновой пористостью, а в карбонатных внутривершинной. В целом томографический метод дает достаточно точную оценку для карбонатных пород. Метод рентгеновской томографии оптимально подходит для выявления каверн в карбонатных породах, поскольку их размеры ( $>0,1$  мм) попадают в разрешающую способность большинства современных томографов

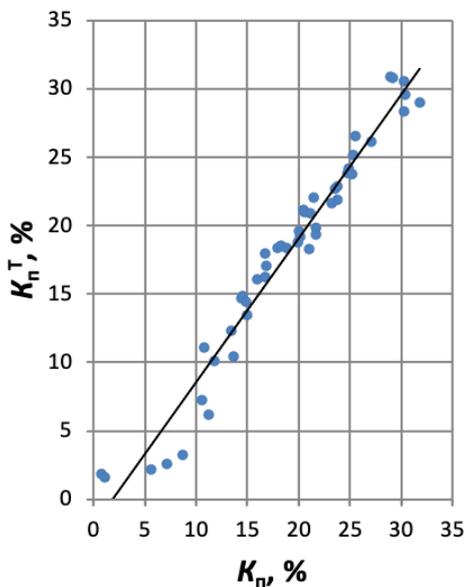


Рис.1. Сопоставление значений определенной стандартным методом открытой пористости и пористости, оцененной методом рентгеновской томографии

[1]. Ограничения метода связаны с нижним пределом разрешающей способности томографии, что не позволяет выделить мельчайшие поры. Наиболее полно с помощью метода выделяются поры сверхкапиллярные ( $>0,1$  мм) и капиллярные -  $0,0002-0,01$  мм, попадающие в пределы разрешения большинства современных микротомографов, соответствующих разрешению  $0,5-0,01$  мм.

В отличие от традиционных методов, томография позволяет выделять и изолированные крупные поры, и каверны в стандартном и полноразмерном керне, что позволяет учитывать часть закрытой пористости в объеме образца.

На рис.1 приведено сопоставление значений коэффициентов пористости. По результатам определения коэффициента пористости газовольметрическим методом ( $K_{п}, \%$ ) и методом рентгеновской томографии ( $K_{пТ}, \%$ ) по данным 48 определений построено поле корреляции этих параметров

Анализ данного поля показывает, что при  $K_{п} < 10\%$  наблюдается значительное несовпаде-

ние коэффициентов пористости, определяемых этими методами.

Для установления более точной границы статистического совпадения этих данных был проведен следующий анализ полученной зависимости. Значения  $K_{п}$ , полученные стандартным методом, были расположены от min к max. По этим значениям построены уравнения регрессии по следующей схеме: первое уравнение построено по 3 данным, следующее по 4 и так далее до  $n=48$ . Далее, для полученных в уравнениях регрессии параметров – углового коэффициента  $k$ , свободного члена  $b$ , коэффициента корреляции  $r$  и уровня значимости  $p$  были построены зависимости, которые приведены на рис 2.

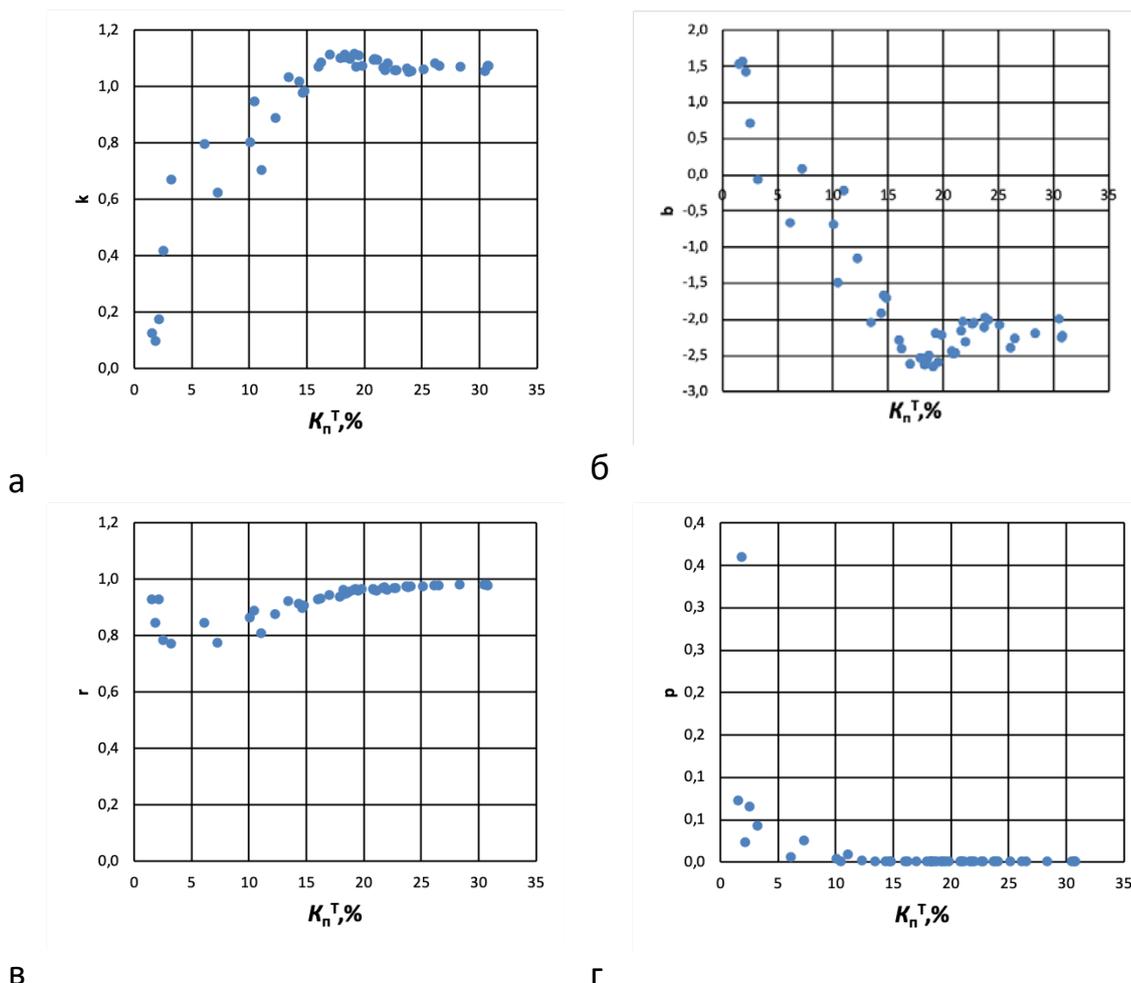


Рис.2. Зависимости параметров регрессионных уравнений  $K_{п}$  для 48 образцов различного литологического состава (а - угловой коэффициент  $k$ ; б - свободный член  $b$ ; в - коэффициент корреляции  $r$ ; г - уровень значимости  $p$ )

Отсюда видно, что в пределах зависимостей наблюдается две группы значений каждого из параметров. Первые проявляются при достижении значений  $K_{пТ}$  в пределах 10%, а меньшие значения проявляют большой разброс. Далее образцы были разделены на две группы по литологическому составу – карбонатные и терригенные, для них также был выполнен аналогичный регрессионный анализ по методике, описанной выше, результаты которого приведены на рис 3.

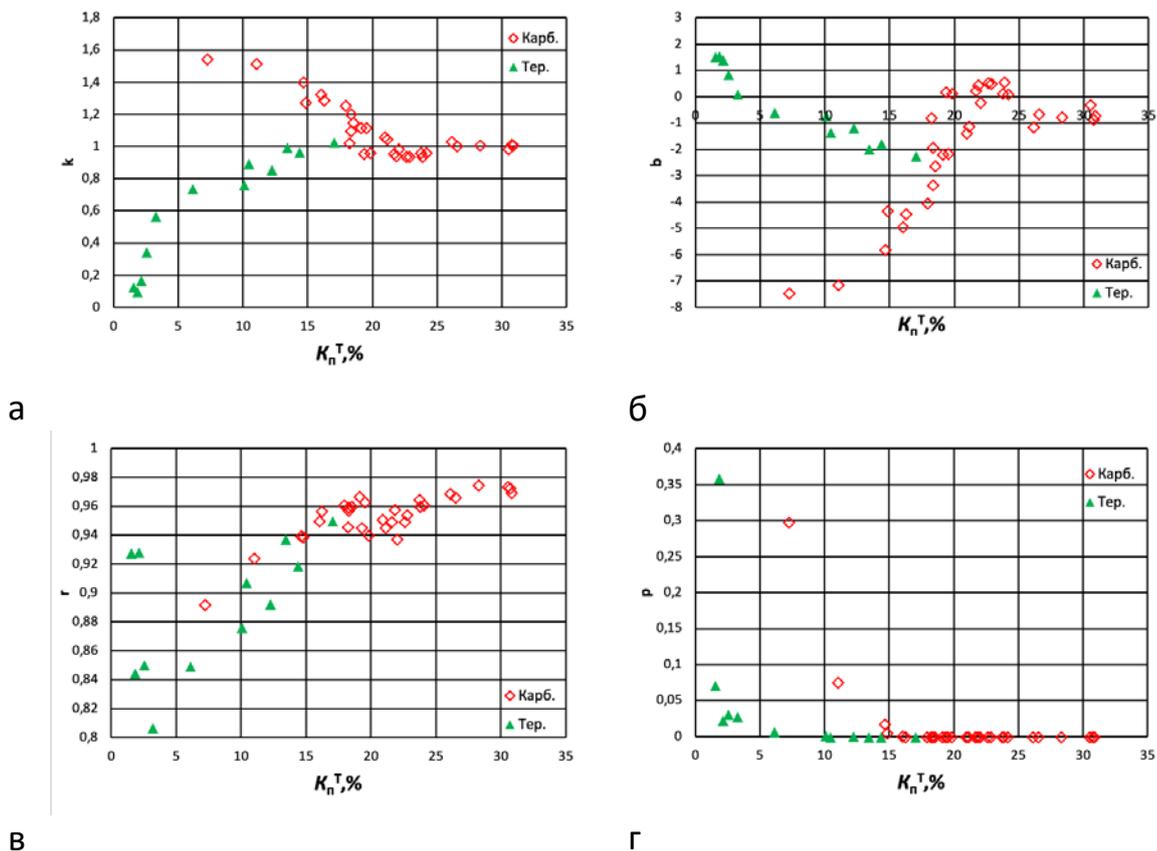


Рис.3. Зависимости параметров регрессионных уравнений  $K_{П}^T$  для 48 образцов различного литологического состава для образцов терригенного и карбонатного состава отдельно (а - угловой коэффициент  $k$ ; б - свободный член  $b$ ; в - коэффициент корреляции  $r$ ; г - уровень значимости  $p$ )

Это позволяет заключить, что терригенные и карбонатные образцы существенно отличаются по характеру изменения параметров уравнений линейной зависимости. Карбонатные образцы проявляют наибольшую близость значений при  $K_{П}^T$  более 15%. Данные образцы по структуре емкостного пространства представлены высокопористыми каверновыми известняками и доломитами, что хорошо согласуется с предположениями о том, что методом рентгеновской томографии данный тип емкостного пространства выделяется наиболее полно. Терригенные же образцы показывают больший разброс значений, что должно быть связано с межзерновым типом емкостного пространства.

Главным выводом данного анализа является необходимость различного подхода в оценке емкостного пространства различных литологических разновидностей образцов керна.

**Во второй главе** рассмотрена проблема оценки структуры емкостного пространства карбонатных пород с помощью рентгеновской томографии керна. При данных исследованиях применен подход, предполагающий последовательное изучение емкостного пространства пород на кернах разного размера.

В главе с целью реализации разномасштабных исследований керна применена классификация уровней детализации строения структуры вещества. К макроуровню отнесены исследования полноразмерного керна, с диаметром в среднем около 100 мм и высотой до 1000 мм.

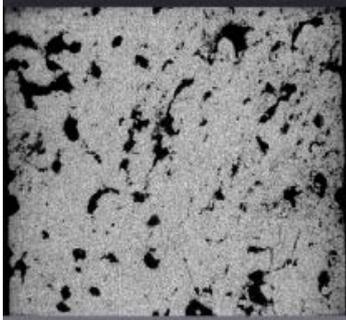
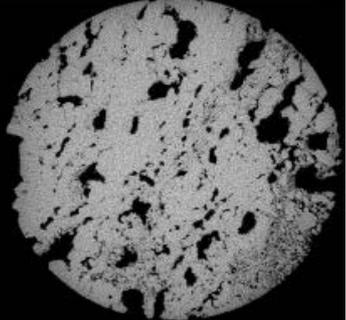
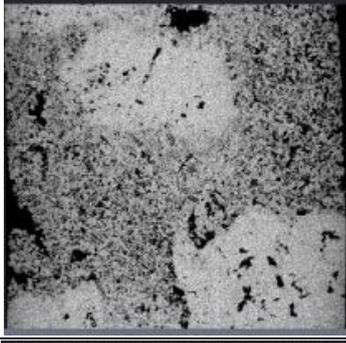
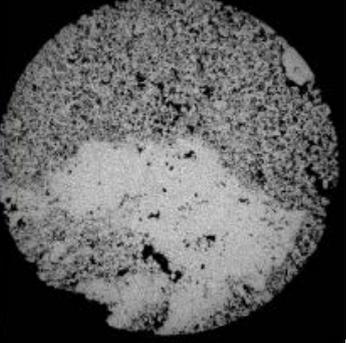
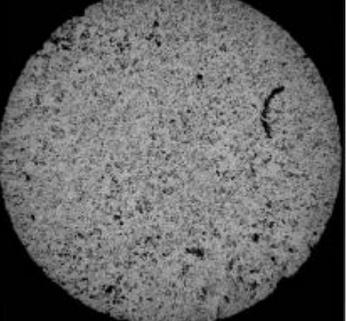
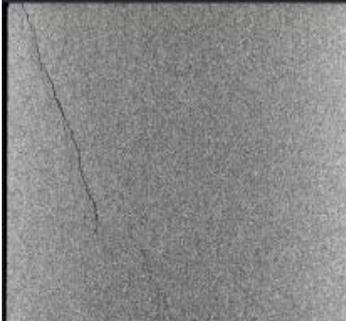
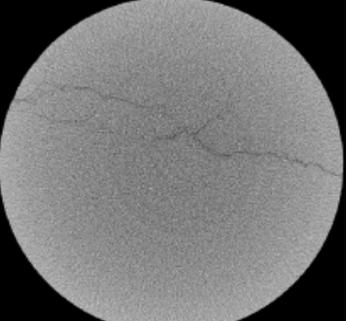
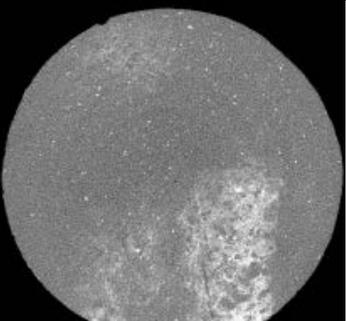
Фотография образца	2D-срезы		Типы
	Продольный	Поперечный	
			каверновый
			пористо-каверновый
			пористый
			трещинный
			плотный

Рис.4. Типизация порового пространства горных пород по данным рентгеновской томографии стандартного керна

К микроуровню относятся исследования так называемого стандартного керна с диаметром обычно равным 30 мм. Такая размерность керна является стандартом при петрофизических исследованиях в лабораторных условиях.

Образцы керна с размерами менее 30 мм относятся к наноуровню структуры детализации вещества. Исследование образцов небольших размеров позволяет детально исследовать отдельные зерна и кристаллы в образцах, цементацию, межзерновую пористость. Вместе с тем, в данном случае к проблемным моментам следует отнести то, что вычислительные мощности, требующиеся для расчета моделей, растут в геометрической прогрессии относительно разрешения. Кроме этого, изучение образцов небольшого размера не позволяет достаточно точно соотнести получаемые результаты с традиционными видами исследований на стандартном керне и создает дополнительный этап подготовки образца.

Изучение характера емкостного пространства и распределения уплотнений в образцах позволило провести типизацию керна в зависимости от структуры его емкостного пространства. Результаты представлены на рисунке 4.

Таким образом, по результатам томографии керна можно сделать вывод о типах емкостного пространства в образцах керна. В наибольшей степени нефтегазоносность связана с пористым типом, в котором можно выделить и первичные поры, представленные межзерновыми пустотами, и вторичные поры, представленные внутри- и межформенными пустотами, а также трещинами и кавернами выщелачивания.

Выделение пористости методом рентгеновской томографии на образцах керна карбонатных пород показывает, что ее определение производится наиболее хорошо на образцах с высоким коэффициентом пористости, преимущественно порово-кавернозного типа [2, 8].

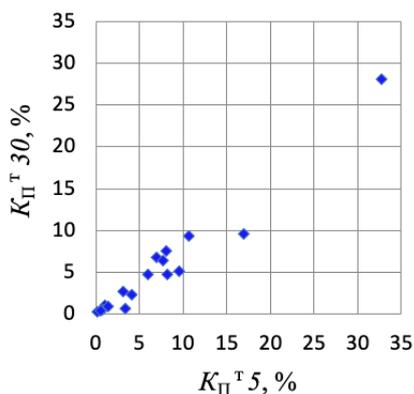


Рис. 5. Корреляционное поле между  $K_{П}^T$  для образцов диаметром 5 мм в поперечнике и участков в образцах диаметром 30 мм, из которых изготовлены 5-ти мм образцы

По результатам проведенных исследований также проводилось сопоставление пористости, полученной по образцам 5 мм в поперечнике ( $K_{П}^T 5$ ) и участков образцов диаметром 30 мм, из которых эти 5-ти мм образцы были изготовлены ( $K_{П}^T 30$ ). Поле корреляции между коэффициентами пористости представлены на рисунке 5.

Уравнение регрессии для этой зависимости имеет следующий вид:

$$K_{П}^T 30 = 0,815 \times K_{П}^T 5 - 0,44, (R^2 = 0,97), (1)$$

Из рисунка 5 видно, что между рассмотренными параметрами отмечается высокая положительная корреляция, что говорит о сходимости результатов при разном разрешении сканирования. Значения  $K_{П}^T$  для образцов диаметром 5 мм в поперечнике выше, чем коэффициент пористости участков в образцах

диаметром 30 мм, из которых они были изготовлены. Это объясняется более высоким разрешением рентгеновских снимков получаемых при сканировании образцов меньших габаритов. При этом становятся видны пустоты меньшего диаметра, которые при томографии образцов диаметром 30 мм визуализировать не удастся.

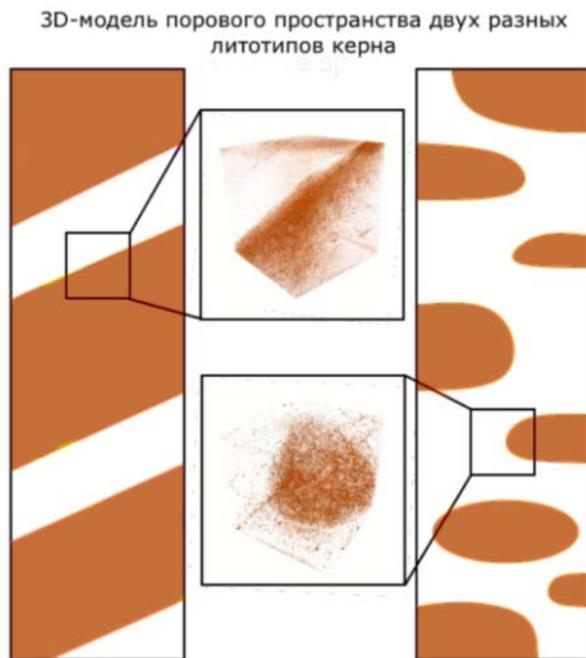


Рис. 6. Построенная с учетом данных рентгеновской томографии керна литологическая модель распределения емкостного пространства в пласте. Цветом показаны участки с высокой пористостью. [7]

Такие исследования представляют интерес и на образцах стандартного керна, что, например, находит применение в качестве дополнения при интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин (ГДИ). Сложности такого сопоставления заключаются в том, что при томографии керна исследуются участки пласта размером до 30 мм (микроуровень), при ГДИ - сотни метров (макроуровень) [5].

Таким образом, разные виды и масштабы пустот в кернах карбонатных пород с различным типом пустотного пространства требуют разных подходов к исследованию их с помощью метода рентгеновской томографии. Предлагаемый алгоритм действий при таком подходе может сводиться к последовательному проведению томографии керна на всех стадиях подготовки – от предварительного описания полноразмерного керна, с томографированием участков, выбранных для выпиливания образцов стандартного размера, через дальнейшее томографирование стандартных образцов, и заканчиваться выборочным микротомографированием спилов и обрезков стандартного керна размерами 5-10 мм.

Применение разномасштабного подхода в изучении карбонатного керна позволило применить его при изучении колонок керна различных литологических типов и построить соответствующую модель, применяющуюся при моделировании условий разработки (рис. 6.).

Метод рентгеновской томографии позволяет проводить отдельное выделение и анализ трещиноватости в образцах керна различных масштабов – полноразмерном, стандартном и микрообразцах. Это особенно важно для карбонатных пород, поскольку коллекторы данного типа зачастую не обладают пустотным пространством, достаточным для формирования коллекторских свойств.

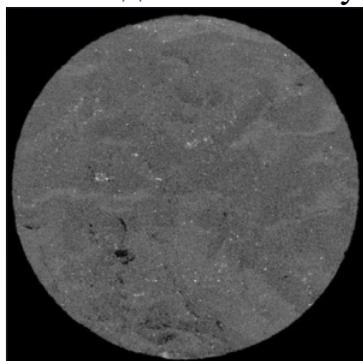
Наиболее часто описание трещиноватости проводится на полноразмерном кернах, однако такие исследования

**В третьей главе** проведена характеристика емкостного пространства кернa терригенного состава с помощью рентгеновской томографии. В терригенных породах метод наиболее точен для крупнозернистых, хорошо отсортированных песчаников, а наибольшую сложность в выделении пор представляют алевроиты и глинистые породы. Эффективность метода в изучении вторичной пористости (как правило, представленной трещинами и кавернами) уже была показана ранее, поскольку размеры данных типов пустот попадают в диапазон разрешающих способностей многих томографов.

В главе проведены томографические исследования на основе КТ кернов терригенных пород, обладающих первичной межгранулярной пористостью, в которой открытые поры являются доминирующими по сравнению с закрытыми. В зависимости от эффективных диаметров, поры в терригенных породах делятся на три категории: сверхкапиллярные с  $d_{эф} > 10^{-4}$  м, капиллярные с  $d_{эф} = 10^{-7} - 10^{-4}$  м и субкапиллярные с  $d_{эф} = 2 \times 10^{-9} - 10^{-7}$  м. Сверхкапиллярные и капиллярные диаметры значимы для фильтрации флюидов (характерны для галечников, крупнозернистых песков и других крупнообломочных пород) в то время как субкапиллярные и микропоры содержат рыхлосвязанную или плотносвязанную воду, которая почти не участвует в фильтрации флюидов (характерны для глин и аргиллитов).

Можно сделать вывод, что минимальный размер пор, видимый с помощью рентгеновской томографии, находится в пределах капиллярных пор, участвующих в фильтрации флюидов, что подтверждается тем фактом, что расчетная пористость, определенная с помощью рентгеновской томографии, всегда ниже, чем пористость, оцененная количественно более точным методом по газу. Следовательно, для исследования пород с терригенными характеристиками лучше рассматривать коллекторы гранулярного типа, которые можно описать с помощью модели Сликтера, в которой проницаемость определяется пористостью и диаметром частиц

При количественной оценке межзерновой пористости для устранения шумов и повышения качества изображения необходимо применять процедуру наложения цифровых фильтров. При построении томограмм пород в гистограмме итогового изображения распределение вокселей характеризуется двумя модами, правая мода соответствует минеральному каркасу, а левая – воздуху (рис.7).



*Слева – двухмерный срез реконструированного объемного изображения керна, справа – гистограмма распределения оттенков серого в объемном изображении керна*

Рис.7. Распределение оттенков серого в объеме томографической модели образца

Чтобы определить структуру породы в итоговом трехмерном изображении, нужно провести бинаризацию. Это процесс, в ходе которого каждому вокселю присваивается значение "пора" или "порода". Определение границы между этими значениями, которое называется трешхолдингом, является сложным количественно определяемым процессом. Трешхолдинг (отсечка) как правило проводится оператором вручную на основании визуального контроля структуры керна.

В диссертации проведено сравнение результатов томографии образцов различных масштабов. В качестве объектов исследования использовались стандартные цилиндрические образцы диаметром 30 мм и кубические – 5 мм в поперечнике, изготовленные из одного и того же керна. В результате исследований образцов методом КТ установлено, что в образцах диаметром 5 и 10 мм элементы емкостного пространства и рентгеноплотностные неоднородности визуализируются лучше, чем в образцах диаметром 30 мм. Это объясняется более высоким разрешением изображений при томографии образцов меньшего размера. Разрешение итоговой модели как правило, зависит от размеров конкретного образца и характеристик детектора при условии единообразного алгоритма обработки. Для используемого в диссертации томографа значение минимального разрешения у стандартных образцов составляет 0,07 мм, у 10-мм образцов 0,03 мм, а для 5-мм образцов 0,02 мм.

Метод рентгеновской компьютерной томографии керна позволяет не только получить классическую оценку коэффициента пористости, но и другие количественные характеристики, такие как частотное распределение размеров, площадей, объемов и координат пор.

Несмотря на то, что существуют программы, такие как Avizo, которые могут исследовать эти параметры с помощью своих инструментов, их использование при исследовании керна существенно ограничено. Главной причиной является несоответствие между физическим размером вокселя в реконструированном 3D изображении керна и физическим размером пор и каналов при съемке 30-миллиметрового керна, который часто используется при петрофизических исследованиях. При таком размере образца, размер вокселя в трехмерном изображении имеет размеры от 0,01 до 0,05 мм.

Уменьшение размеров образцов ведет к искажению информации из-за масштабного эффекта, который может проявляться, например, в понижении точности оценки равномерности керна выражающемся в вероятности изготовления малого образца из области керна с повышенными или пониженными ФЕС, в силу большего влияния микронеоднородности при малых размерах образцов. Также сравнение результатов томографии с другими исследованиями, проведенными согласно нормативным документам, становится сложнее.

Во время визуального анализа томограмм (например, для определения трещин и крупных пор) можно ограничиться просмотром изображений без их дополнительной обработки. Однако в дальнейшем процессе реконструкции и обработки изображений происходят специфические преобразования, которые ведут к неизбежным искажениям и потере информации.

Основными источниками искажений получаемых изображений являются шумовые артефакты, которые могут возникать на разных стадиях томографирования и могут быть различными по происхождению [14]. При съемке может возникать шум, когда детектор улавливает излучение неравномерно (что может происходить по разным причинам, например ввиду неоднородности детектора), что приводит к дефектам рентгеновского изображения. В результате, при попытках количественно изучить пустотно-емкостное пространство горных пород, также необходимо решить задачу достоверной интерпретации трехмерной цифровой модели.

Задача выполнения операции трешхолдинга обычно показывает, что, когда граница приближается к моде породы, определенные воксели, характеризующие минеральный скелет, попадают в категорию «воздух». Эти воксели разбросаны по объему модели, их размеры варьируются от одного до нескольких вокселей. Обычно это цифровые артефакты шума, возникающие из-за наличия неоднородностей, имеющих размер менее вокселя, а также из-за шума, вызванного съемкой и процедурой построения объемного изображения на стадии реконструкции.

Если же происходит перенос границы ближе к моде воздуха, то объем и количество пор существенно снижается, при этом происходит снижение связности пор, что говорит о том, что поры размеров, находящихся в пределах минимального разрешения объемного изображения, не могут быть достоверно выделены. Отсюда следует вывод, что в большинстве случаев границу отсечки лучше располагать примерно посередине промежутка между двух мод, свойственных гистограммам распределения оттенков серого в объемных моделях керна (рис.8).

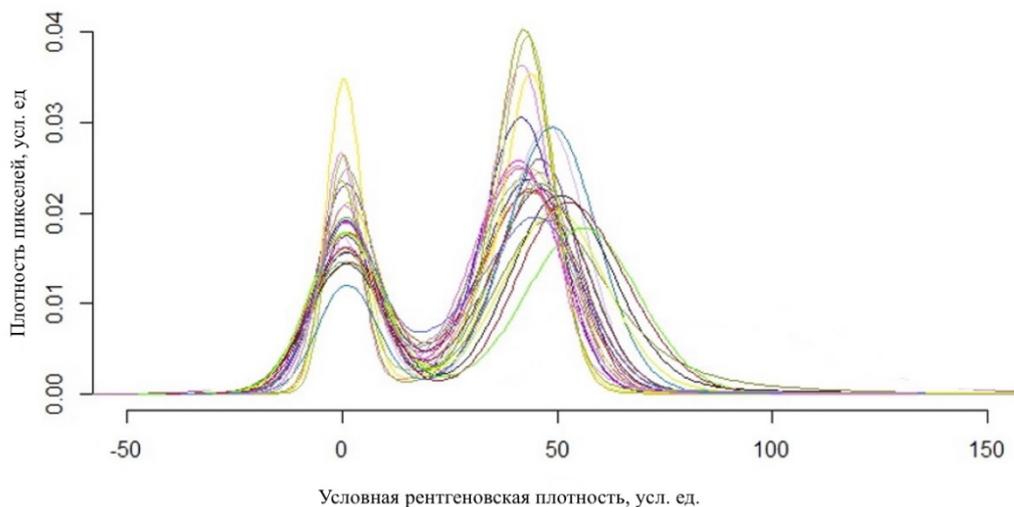


Рис. 8. Гистограммы распределения условной рентгеновской плотности (по данным 26 стандартных образцов)

При обработке модели куба, состоявшего из образца с окружающим его воздухом, получена гистограмма условной плотности рентгеновского излучения, имеющая две четко выделяемые моды. Левая, которая в основном представляет воздух в порах образца, близка к 0. Правая, соответствующая структуре плотной части породы, попадает в диапазон 30-40 единиц условной рентгеновской плотности. Правая сторона гистограммы не является симметричной, что, вероятно,

связано с физическими размерами зерен образца, размером вокселя, используемым в процессе визуализации, коэффициентами поглощения рентгеновских лучей минералами, составляющими твердый каркас образца и его литологической неоднородностью.

Наиболее оптимальный способ проведения отсечки - найти на гистограмме плотности рентгеновского излучения границу, расположенную вблизи самой низкой точки между модами двух компонентов, воздуха и породы. Данный способ выделения порового пространства лежит в основе полученного в соавторстве патента [16]. Такой эмпирический подход при определении границ отсечки позволяет вполне надежно определять крупные поры в образцах различных размеров [6].

С целью оценки возможностей достоверной визуализации и определения пористости по характеру гистограммы и формализации критерия проведения отсечки был проведен вычислительный эксперимент.

На первом этапе генерируется фантом (искусственно созданная цифровая модель зерна, с известными характеристиками). Затем при помощи прямого преобразования решается задача получения проекций этого фантома. Далее при помощи обратного преобразования происходит реконструкция объемной модели фантома. После этого проводится статистический анализ полученных результатов, сравнивая фантом и реконструированную модель, для подбора таких граничных значений, которые обеспечат наиболее достоверную оценку пустотного пространства.

Фантом задается кубом размерами  $400 \times 400 \times 400$  вокселей, где находится цилиндрический образец с плотностью материала скелета, с распределением рентгеновской плотности, имитирующей реальные образцы. Пористость и распределение пор (пустот) в пространстве фантома моделировалась в виде случайно расположенных пор, состоящих из крупных пор размерами  $2 \times 2 \times 2$ ,  $3 \times 3 \times 3$  и  $4 \times 4 \times 4$  вокселей и мелких пор размерами  $1 \times 1 \times 1$  воксель, при этом соблюдалось процентное преобладание в породе мелких пор от 75-95 %, а соотношение крупных пор задавалось различным процентным соотношением. Диапазон моделируемой пористости находился в диапазоне от 3,5 до 35 %. Такое моделирование приводит к появлению пор неправильной конфигурации и различных размеров.

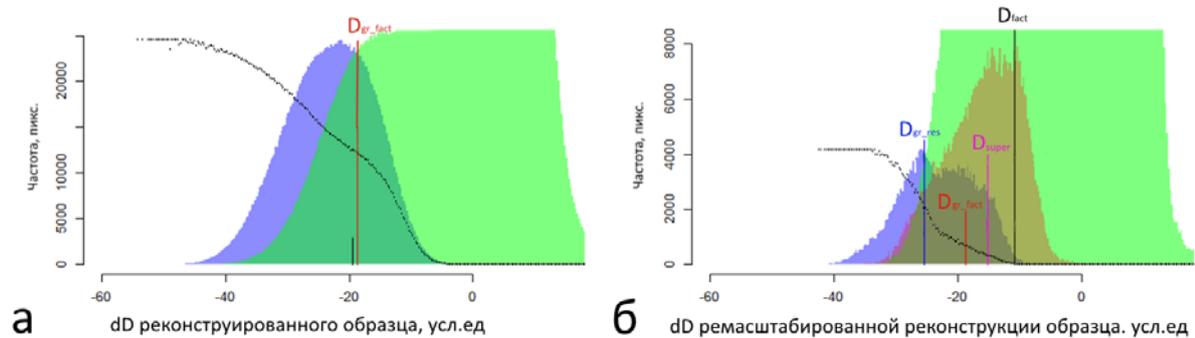
Фантом подвергается процедуре прямой проекции, с геометрическими параметрами съемки реальных образцов стандартного зерна. Затем на основании полученных проекций происходит реконструкция фантома алгоритмом FDK.

Исходное разрешение реконструированного куба  $400 \times 400 \times 400$  вокселей, которое затем уменьшается в 2 раза, до значения  $200 \times 200 \times 200$  вокселей, путем усреднения значений рентгеновской плотности по группам из 8 вокселей ( $2 \times 2 \times 2$ ). Пустотное пространство ремасштабированного куба реконструкции можно расклассифицировать на группы, используя значения пористости укрупненного вокселя как отношение пустот (количество пустых вокселей) к объему укрупненного вокселя (равное 8 исходных вокселей).

Оценка пористости укрупненного вокселя проводилась согласно классификации укрупненных вокселей по трем классам: класс «пустота», где объем пу-

стот в укрупненном вокселе  $> 0.5$  д.ед; класс «неопределенность», где объем пустот в укрупненном вокселе  $= 0.5$  д.ед. и класс «скелет», где объем пустот в укрупненном вокселе  $< 0.5$  д.ед.

После выполнения всех расчетов, по полученным кубам строились гистограммы значений рентгеновской плотности в пределах самого образца и рассчитывались основные статистические характеристики.



а) зеленое - плотность, соответствующая скелету фантома, синее - плотность, соответствующая пустотному пространству фантома

б) зеленое - плотность класса «скелет», синее - плотность класса «пустота», красное – плотность класса «неопределенность»

Рис. 9. Гистограммы  $dD$  ( $K_{П-факт} = 0,125$  д.ед.)

Для реконструкции рассчитывалось:  $D_{gr\_fact}$  - значение рентгеновской плотности, приходящееся на пересечение гистограмм распределений пор и скелета по реконструированному образцу.

Для ремасштабированной модели цилиндрического образца рассчитывались:

$D_{super}$  - медианное значение рентгеновской плотности класса «неопределенность»;

$D_{gr\_res}$  - значение рентгеновской плотности, приходящееся на пересечение гистограмм распределений классов «пустота» и «скелет»;

$D_q$  - квантили 75, 80, 95, 99 % в распределении класса «пустота» ремасштабированного куба;

$D_{fact}$  - граничное значение условной рентгеновской плотности, обеспечивающее фактическое значение  $K_{П-факт}$  фантома.

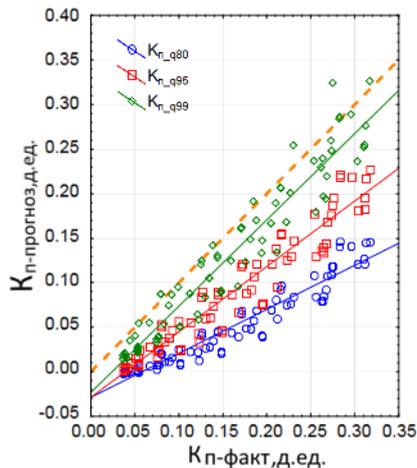
Для устранения влияния общей плотности моделей, в дальнейших расчетах используется разность ( $dD$ ) между исходным значением плотности в каждом вокселе ( $D_i$ ) и медианой рентгеновской плотности образца ( $D_n$ ) в ремасштабированного куба:

$$dD = D_i - D_n, \quad (2).$$

На рис.9. приведены гистограммы  $dD$ .

В результате статистического анализа и сопоставления значений пористости фантома, получаемого при разных «отсечках» (рис.10), установлено, что ха-

рактической, являющейся наилучшей прогнозной характеристикой  $D_{gr}$  является 99 % квантиль в распределении «пустота» ( $D_{q99}$ ).



$$K_{п\_q80} = -0.028 + 0.495 * x, r = 0.964, p < 10^{-5}$$

$$K_{п\_q95} = -0.028 + 0.733 * x, r = 0.964, p < 10^{-5}$$

$$K_{п\_q99} = -0.023 + 0.969 * x, r = 0.963, p < 10^{-5}$$

Рис. 10. Корреляционное поле между  $K_{п-факт}$  и значениями  $K_{п}$  квантилей в распределении пустота

стандартной методике, где показала высокую степень соответствия фактическим данным (рис.11)

При помощи данной зависимости можно оценить значение отсечки  $D_{gr}$ , обеспечивающей выделение и визуализацию наиболее достоверно существующего пустотного пространства в ремасштабированном кубе.

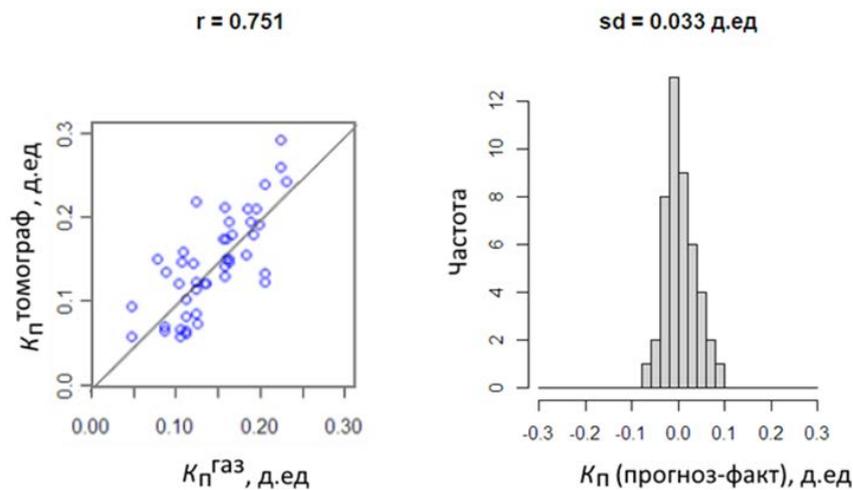


Рис. 11. Проверка зависимости на 46 моделях реальных образцов ( $r$  - коэффициент корреляции,  $sd$  - среднеквадратическое отклонение)

Таким образом, для выделения обоснованной границы отсечки (трешхолдинга) может быть рекомендован следующий алгоритм получения граничного значения:

С помощью регрессионного анализа на 124 фантомах имитирующих различную структуру порового пространства была установлена следующая модель прогноза граничного значения:

$$D_{q99} = -34.99 + 50.96 \times (K_{п}^{ГАЗ})^2 + 2.34 \times (q50 / (q50 - q25)) - 1.29 \times Ek - 2.79 \times (Mean / SD) - 7.21 \times \lg(K_{п}^{ГАЗ}),$$

$$(R^2 = 0.974, \text{ скоррект. } R^2 = 0.972), \quad (3)$$

где  $Ek$  – эксцесс образца ;  $Mean$  - среднеарифметическое значение условной рентгеновской плотности ремасштабированного куба в пределах цилиндрического образца;  $SD$  - среднеквадратическое отклонение условной рентгеновской плотности ремасштабированного куба в пределах цилиндрического образца

Данная формула была проверена на 46 моделях реальных образцов керн, отснятых ранее по

- 1) Исследование пористости образца газоволюметрическим методом и определение значения  $K_{II}$  по газу ( $K_{II}^{GA3}$ ).
- 2) Проведение рентгеновской томография образца и его реконструкция
- 3) Получение граничного значения  $D_{gr}$  по зависимости.

После этого возможна визуализация и расчеты морфологических характеристик пустотного пространства в объеме образца.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод об эффективности использования разработанной в диссертации процедуры выбора отсечки при томографировании образцов терригенных коллекторов. Предложенный подход позволяет исследовать структуру капиллярных и сверхкапиллярных пор диаметром более  $10^{-7}$  мкм, имеющих определяющее значение при фильтрации флюидов в пласте.

**В четвертой главе** приводятся примеры применения метода компьютерной рентгеновской томографии при изучении результатов влияния на породы различных технологий воздействия, применяемых при разработке нефтегазовых месторождений. Подобные исследования керна методом рентгеновской томографии достаточно распространены в мировой практике и весьма разнообразны.

К первой группе относятся исследования сухого керна без присутствия жидких флюидов. Данный метод технически является наиболее простым для проведения исследований, поскольку контраст рентгеновского излучения между пустотным пространством и твердой фазой скелета породы позволяет проводить расчеты объема пористости и трещиноватости. В рамках изучения воздействия технологии гидроразрыва пласта [5, 7] томографический метод использован при лабораторном моделировании механических воздействий на образцы керна, что позволило получить объемные 3D-модели развития трещин гидроразрыва.

Вторая группа включает в себя исследования керна, насыщенного одной или несколькими жидкими фазами. Данная группа методов позволяет визуализировать, например, распределение флюидов при определении фазовых проницаемостей и характера распределения остаточной водонасыщенности.

Еще одним перспективным направлением применения томографии является исследование эффективности создаваемых полимеров, применяемых при контроле эффективности технологий снижения обводненности нефтяных пластов. В рамках исследования эффективности рецептуры предварительно сшитых гелей (preformed particle gel – PPG) применен метод рентгеновской томографии. При этом на стадии синтеза геля в него вводилось рентгеноконтрастное вещество (иодид натрия), что позволило визуализировать степень кольматации пустотного пространства при фильтрационных испытаниях гелей разных рецептур [10].

Отдельным видом томографических исследований являлись съемки образцов, подвергавшихся кислотной обработке. Данный вид работ выполнялся в рамках исследований по составлению рецептуры и технологии новых составов, применяемых для повышения нефтеотдачи пластов. Визуализация полученных каналов позволила наглядно оценить эффективность разработанных кислот и провести дополнительный лабораторный контроль испытаний

Изучение флюидонасыщенности коллекторов методом компьютерной рентгеновской томографии керна ограничивается низкой плотностью практически всех

жидкостей, в том числе стандартной модели пластовой воды (четырёхнормального раствора хлорида натрия), которая используется при насыщении керна в лабораторных исследованиях. Для повышения эффективности проведения томографии на предварительном этапе были проведены опытные работы по использованию растворов, позволяющих сделать модель пластовой воды в керне рентгеноконтрастной. Томографирование проведено на каждом этапе эксперимента по насыщению образца: на сухом образце без флюида, полностью насыщенном и после вытеснения пластовой воды с остаточной водонасыщенностью [4].

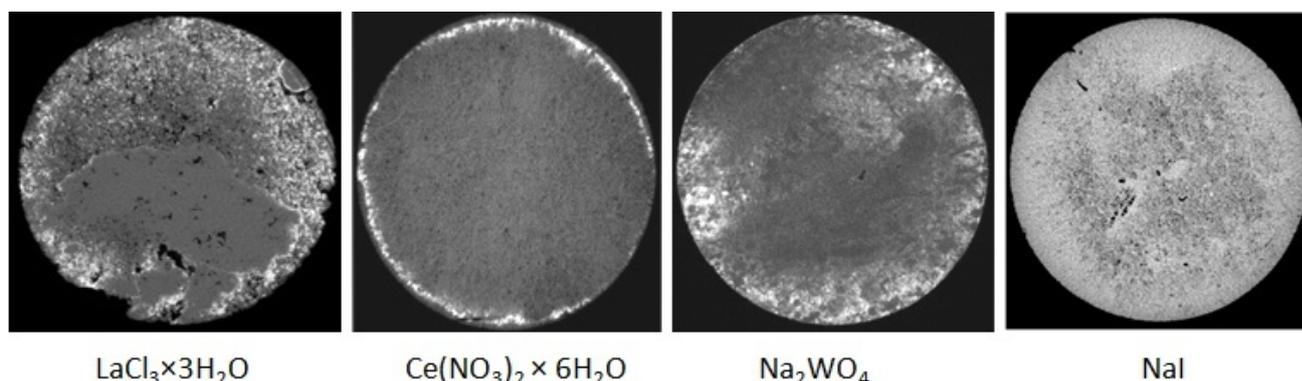


Рис. 12. Сравнение различных рентгеноконтрастных составов в экспериментах с томографированием флюидонасыщенных образцов керна

Из анализа результатов исследования флюидонасыщенности методом рентгеновской томографии следует, что наиболее контрастными в рентгеновском излучении являются водные растворы иодида натрия и хлорида лантана. Однако по совокупности показателей эффективности и удобства практического использования, наиболее подходящим веществом признан иодид натрия (рис. 12).

В рамках исследований флюидонасыщенных образцов разработан метод определения гидрофобности керна, на который в соавторстве получен патент [15]. Суть метода заключается в том, что некоторые породы-коллекторы, обладающие существенной гидрофобностью, не пропускают часть флюида, оставляя визуально видимые на томограммах незаполненные флюидом участки. Степень заполненности участков флюидом может быть основой для классификации образцов по степени смачиваемости [3].

Определяется показатель пропитки: как отношение разности объема пор между сухим  $V_1$  и насыщенным образцом  $V_2$  к объему пор в сухом образце  $V_1$ , по следующей формуле:

$$K \text{ пропитки} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\%, \quad (4).$$

По полученному значению показателя пропитки судят о смачиваемости керна, посредством установления категории его гидрофильности или гидрофобности, исходя из следующих условий:

- если  $K$  более 90% - образец относится к гидрофильным,
- если  $K$  в диапазоне от 90 до 50% - образец с признаками гидрофобности,
- если  $K$  в диапазоне 50-10% - образец преимущественно гидрофобный,
- если  $K$  менее 10% - образец гидрофобный.

Отсюда можно заключить, что при исследовании распределения флюидов в образце методом рентгеновской томографии должно проводиться маркирование флюида рентгеноконтрастным раствором. Тестирование рентгеноконтрастных растворов показало наилучшие результаты при моделировании остаточной воды для составов NaI с концентрацией 200 г/л и  $\text{LaCl}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$  с концентрацией 100 г/л.

В целом, по итогам проведенных исследований, можно сделать вывод, что использование метода компьютерной рентгеновской томографии при изучении результатов механического либо химического воздействия на образцы существенно повышает информативность исследований и может стать стандартом в исследованиях керна.

### **Основные выводы и результаты:**

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие выводы и результаты:

1) Установлено, что изучение керна методом рентгеновской томографии требует разномасштабного подхода для коллекторов различных литологических типов вследствие особенностей структуры их емкостного пространства. Для карбонатных пород метод показал большую эффективность в выделении пор, каверн и трещин среднего и крупного размера, а также в качественном установлении типа коллектора на основании структуры пустотного пространства, что связано с подходящим параметром разрешающей способности метода.

2) Исследование количественных характеристик емкостного пространства в терригенных породах определяется проведением процедуры отсечки, отделяющей моду скелета горной породы и пустот. Предлагается проводить границу, по виду распределения рентгеновской плотности, а для наибольшей точности возможно привлекать данные газоволюметрической съемки, при использовании которой возможно установление параметров отсечки расчетным способом.

3) Данный метод можно использовать при оценке эффективности мероприятий по воздействию на керн различных технологий, применяемых при разработке нефтегазовых месторождений, в том числе при применении рентгеноконтрастных веществ в исследовании воздействий жидких агентов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science:**

1. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна материала нефтяных и газовых месторождений / С. В. Галкин, А. А. Ефимов, С. Н. Кривощёков, **Я. В. Савицкий**, С. С. Черепанов // Геология и геофизика = Russian Geology and Geophysics. - 2015. - Т. 56, № 5. - С. 995-1007.

2. Estimation of heterogeneity of Oil & Gas field carbonate reservoirs by means of computer simulation of Core X-Ray Tomography data / A. A. Efimov, S. V. Galkin, **Y. V. Savitsky**, V. I. Galkin // Ecology, Environment and Conservation. - 2015. - Vol. 21, Nov, Iss. Suppl- P. 79-85.

3. Исследование смачиваемости коллекторов нефтяных месторождений методом рентгеновской томографии керн / А. А. Ефимов, **Я. В. Савицкий**, С. В. Галкин, Е. В. Соболева, В. Ш. Гурбанов // SOCAR Proceedings [Электронный ресурс]. - 2016. - № 4. - С. 55-63. - Режим доступа: <http://proceedings.socar.az/uploads/pdf/47/8.Yef-55-63.pdf>. – Загл. с экрана. - DOI 10.5510/OGP20160400298

4. Возможности исследования гидрофобизации коллекторов комплексированием методами рентгеновской томографии керн и электрического каротажа / С. В. Галкин, И. Ю. Колычев, **Я. В. Савицкий** // Геология и геофизика = Russian Geology and Geophysics. - 2019. - Т. 60, № 10. - С. 1496-1507.

5. Перспективы применения пропантного гидроразрыва пласта на каширо-верейских эксплуатационных объектах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции / С. В. Галкин, **Я. В. Савицкий**, И. Ю. Колычев, А. С. Вотинов // SOCAR Proceedings. - 2021. - Iss. Спец. вып. № 2. - С. 257-265.

6. Применение процедуры треш-холдинга при изучении емкостного пространства горных пород методом рентгеновской томографии / **Я. В. Савицкий**, С. В. Галкин // Горный журнал. - 2021. - № 7 (2288). - С. 34-39.

7. Modeling of crack development associated with proppant hydraulic fracturing in a clay-carbonate oil deposit / S. Galkin, **I. Savitckii**, D. Shustov, A. Kukhtinskii, B. Osovetsky, A. Votinov // FDMP-Fluid Dynamics & Materials Processing. - 2023. - Vol. 19, № 2. - P. 273-284.

8. Изучение изменений структуры пустотности горных пород при создании напряженного состояния методами электронной микроскопии / Б. М. Осовецкий, К. П. Казымов, И. Ю. Колычев, **Я. В. Савицкий**, С. В. Галкин // Георесурсы. - 2023. - Т. 25, № 2. - С. 228-235.

#### **Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

9. Experience of study of core from carbonate deposits by X-ray tomography / А. А. Efimov, **I. V. Savitckii**, S. V. Galkin, S. Shapiro // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas engineering and mining. - 2016. - Т. 15, № 18. - С. 23-32.

10. Изучение механизма перераспределения фильтрационных потоков при закачке синтезированных сшитых гелей методом рентгеновской томографии керн / С. В. Галкин, Ю. А. Кетова, **Я. В. Савицкий**, К. Ванли, Б. Сарсенбекулы, // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, № 11. - С. 127-136.

#### **Публикации в прочих изданиях:**

11. Опыт использования рентгеновской томографии при исследованиях коллекторских и механических свойств горных пород / А. А. Ефимов, **Я. В. Савицкий**, С. В. Галкин // Практическая микротомография : материалы Всерос. конф., Москва, 2-4 окт. 2013 г. / Почв. ин-т В. В. Докучаева Россельхозакадемии. - Москва : [б. и.], 2013. - С. 124-128.

12. Метод рентгеновской томографии в исследовании пород-коллекторов / **Я. В. Савицкий** ; науч. рук. С. В. Галкин // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых : материалы VII Всерос. конф., [посвящ. 85-летию Перм. нефти и в рамках III Всерос. мол. форума Нефтегазовое и горное дело], г. Пермь, 28-31 окт. 2014 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2014. - С. 67-70

13. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений / **Я. В. Савицкий** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas engineering and mining. - 2015. - № 15. - С. 28-37.

14. Виды и причины появления основных типов артефактов, проявляющихся при проведении рентгеновской томографии керна горных пород / **Я.В. Савицкий**, С.В. Галкин // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции "Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021" ( г. Пермь, 18–20 ноября 2021 г ). - 2021. - Т.1. - С.130-133

#### **Патенты:**

15. Патент №2682098 Российская Федерация, МПК G01N 13/02 (2006.01)G01N 13/02 (2018.08); G01N 23/046 (2018.08). Способ определения смачиваемости горных пород методом рентгеновской томографии керна : №2018112528, заявл 06.04.2018: опубл. 14.03.2019 / Галкин С.В., Ефимов А.А., Колычев И.Ю., **Савицкий Я.В.**, Черепанов С.С. . – 16 с. : ил. – Текст : непосредственный.

16. Патент №2777714 Российская Федерация, МПК G01N23/46 G01N15/08. G01N 23/046 (2022.02); G01N 15/08 (2022.02). Способ получения трехмерной модели керна горных пород по данным компьютерной томографии для определения межзерновой эффективной пористости. № 2021135882 заявл. 12.07.2021 : опубл. 08.08.2022 / Галкин С.В., **Савицкий Я.В.** – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.