



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ФГБУН Пермский
федеральный исследовательский
центр УрО РАН, чл.-корр. РАН
О.А. Плехов
2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

на диссертационную работу Савицкого Яна Владимировича «Изучение особенностей структуры пустотного пространства коллекторов методом рентгеновской томографии керна», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений.

1. Актуальность проблемы.

Петрофизическое и петрологическое исследование кернового материала является неотъемлемой частью комплекса мер для подготовки и эксплуатации месторождений углеводородов различного типа. При этом повсеместно применяющиеся методы оптической и сканирующей электронной микроскопии, аналитические методы оценки фильтрационно-емкостных характеристик имеют недостатки и ограничения, связанные как с размерностью анализируемых объектов, так и с погрешностью измерений используемых этими методами величин. В качестве дополнительного, а в ряде случаев альтернативного, метода неразрушающего контроля для характеристики порово-трещинного пространства образцов керна рассматривается метод рентгеновской компьютерной томографии. Многообразие производителей оборудования, использование различных механо-оптических схем, множество управляющих параметров для томографической съемки и последующих процедур реконструкции и визуализации объекта исследования приводят к существенно различным результатам съемки и количественного анализа внутренней структуры образцов керна, с одной стороны, к необходимости разработки методик и подходов для исследованию керна методом компьютерной рентгеновской

томографии, с другой стороны. Указанные обстоятельства определяют **актуальность выбранной темы** диссертационного исследования.

Цель диссертационной работы – разработка методики исследования керна и способа определения емкостных характеристик карбонатных и терригенных пород-коллекторов методом компьютерной рентгеновской томографии.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 139 наименований, содержит 146 страниц печатного текста, включая 67 рисунков и 15 таблиц. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во **введении** сформулированы актуальность исследования, цель, задачи и методы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, апробация, публикации, личный вклад соискателя и благодарности.

В **первой главе** излагаются общие принципы метода рентгеновской томографии, приведен обзор работ, посвященных использованию метода компьютерной томографии для исследования кернового материала, дается краткое описание основных производителей современных рентгеновских томографов. Приведено описание основных этапов томографической съемки и последующей обработки полученных изображений, отдельно уделено внимание классификации пористости образцов керна и описанию способов ее определения.

Во **второй главе** приведены результаты исследования емкостного пространства карбонатных пород методом компьютерной рентгеновской томографии. Показано, что при томографической съемке полноразмерных карбонатных образцов успешно выявляются рентгеноконтрастные включения, каверны и сомкнутые либо раскрытые до 1 мм трещины. На основе проведенных многочисленных съемок предложена типизация порового пространства горных пород по данным томографии стандартного керна. Для образцов диаметром 30 и 5 мм проведено сопоставление значений коэффициента пористости, оцененного по томографическим данным, предложено уравнение регрессии, связывающей две оценки. Отдельное внимание уделено сопоставлению результатов гидродинамических и рентгентомографических исследований трещиноватости породы, показано их качественное соответствие.

Третья глава посвящена исследованию емкостного пространства керна терригенного состава методом компьютерной рентгеновской томографии. Сопоставляются результаты определения коэффициента пористости и характерного линейного размера пор по томографическим данным для терригенных образцов двух различных размеров: цилиндры с диаметром 30 и 5 мм. Проведенные исследования позволили установить минимальный размер наиболее надежно выявляющихся по данным томографии пор в зависимости от размера образца. Отдельно рассмотрена задача формализованного определения порога бинаризации, позволяющего обоснованно разделять на томографических изображениях области, относящиеся к материалу, и области, относящиеся к порово-трещинному пространству. Для ее решения рассматриваются синтетические цифровые фантомы образцов с заранее заданной пористостью и внесенным шумом, моделирующим искажения, вносимые на этапе съемки и реконструкции изображений образца. На основе анализа гистограмм градаций серого фантомных изображений предложено в качестве порога бинаризации выбирать 99% квантиль в распределении «пустота» ремасштабированного куба. На основе проведенного анализа фантомных изображений с различной структурой порового пространства и коэффициентом пористости установлено регрессионное уравнение для этого параметра от параметров кривой условной рентгеновской плотности и величины пористости, оцененной газоволюметрическим методом. В конце главы сформулирован алгоритм определения порога бинаризации, базирующийся на полученных результатах, показана его эффективность на 46 моделях реальных образцов.

В *четвертой главе* приводятся результаты исследования влияния на кернаый материал различных технологий воздействия, применяемых при разработке нефтегазовых месторождений, методов компьютерной рентгеновской томографии. В частности рассмотрены результаты кислотной обработки керна различными составами. Показано, что визуализация внутренней структуры керна позволяет выявить и оценить количественные характеристики каналов растворения минеральной фазы. В рамках исследования флюидонасыщенности керна методом рентгеновской томографии показано, что наиболее контрастными в рентгеновском излучении являются водные растворы иодида натрия и хлорида лантана. Предложен метод определения гидрофобности керна, основанный на оценке степени заполненности флюидом его порово-трещинного пространства.

В *заклучении* сформулированы основные выводы и научные результаты работы.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

- определена регрессионная зависимость для пористости, оцененной на образцах керна различного диаметра по их томографическим изображениям;
- на основе анализа синтетических изображений предложен формализованный алгоритм определения порога бинаризации для выявления порового пространства.

Помимо вышеуказанных результатов научной новизной обладает созданная база рентгеновских моделей керна месторождений Пермской края, разработанный способ смачиваемости горных пород методом рентгеновской томографии керна, а также способ получения трехмерной модели керна горных пород по данным компьютерной томографии для определения межзерновой эффективной пористости.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Разработанные в результате проведенных исследований методики и подходы для получения количественных оценок структуры емкостного пространства образцов керна различного литологического состава, в том числе после дополнительных механических и химических воздействий, имеют практическую ценность и могут быть использованы в рутинных петрофизических исследованиях керна, осуществляемых инжиниринговыми центрами и кернохранилищами нефтегазовых компаний.

5. Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов исследований обеспечивается большим объемом исследованного материала, использованием поверенного высокотехнологичного оборудования, качественным и количественным соответствием результатов данным, полученным по стандартным гостированным методикам.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы Я.В. Савицкого опубликованы в четырнадцати научных работах, в том числе шесть работ в журналах, входящих в перечень ВАК, восемь работ в периодических изданиях, реферируемых международными базами научного цитирования Web of Science и Scopus, и докладывалась на пяти международных и всероссийских конференциях по профилю специальности. По результатам работы получены два патента (в соавторстве). Работа выполнялась в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации ФФИ, результаты которого проходят полноценную научную экспертизу.

7. Замечания и вопросы по содержанию работы.

1. В таблице 1.7.2 (стр. 32) приведены размеры пикселя снимка в миллиметрах для основных типоразмеров образцов керна. При этом размер указан с точностью до 9 знака после запятой, т.е. до единиц пикометров. Непонятно чем обеспечивается такая точность с учетом того, что размер вокселя в проведенных исследованиях был не менее 10 мкм, а разрешение матрицы детектора не превосходит единиц мегапикселей.

2. На рисунке 2.2.5 (стр. 59), рис. 3.2.10 (стр. 87) представлены гистограммы распределения диаметров пор по результатам томографии на образцах керна различного диаметра. Для количественного описания гистограмм использованы два статистических момента среднее и стандартное отклонение. Для использования этих характеристик должна была быть проверена нулевая гипотеза о нормальном распределении диаметров пор. Этого сделано не было. Более того, форма представленных гистограмм указывает на то, что эти характеристики являются не состоятельными для характеристики формы распределения.

3. На стр. 59 с ссылкой на рисунок 2.2.5 говорится, что сравнение результатов интерпретации показывает высокую сходимость результатов. В связи с тем, что две гистограммы не наложены друг на друга или не оценены параметры аппроксимирующих их функций, данное утверждение является слабо обоснованным.

4. На стр. 60 предложено уравнение регрессии для коэффициента пористости $K_{п}^{Т30}$ от коэффициента $K_{п}^{Т5}$. Из предложенного уравнения следует, что в пределе при $K_{п}^{Т5}$ стремящимся к нулю, коэффициент пористости $K_{п}^{Т30}$ будет стремиться к отрицательному числу, что противоречит здравому смыслу. Отсюда следует, что либо уравнение регрессии должно быть нелинейным, либо нужно четко указывать интервал его применимости (в тексте об этом ничего не сказано).

5. В третьей главе для дифференцирования выявленных по данным томографии пор используется линейный размер – усредненный диаметр, рассчитанный как корень кубический из объема поры. Здесь возникает два важных вопроса. Первый – насколько изменятся полученные результаты, если в качестве характерного линейного размера будет взят диаметр эквивалентной по объему или площади поверхности сферы? Второй вопрос – на каком основании принята гипотеза о сферической форме пор? Для подтверждения этой гипотезы нужно построить распределение пор по какому-либо параметру, характеризующему форму геометрической фигуры: коэффициенту сферичности, структурному модельному индексу (SMI) и т.д.

6. Для разработки обоснованного критерия выбора порога бинаризации в третьей главе были разработаны фантомные цифровые модели ядра, при реконструкции которых добавлялся Пуассоновский шум. Параметры вносимого шума в тексте диссертации отсутствуют.

7. Текст диссертации содержит значительное количество опечаток, речевых ошибок и технических неточностей, в частности:

- Стр. 10. «Серия, завершается, когда образец совершает полный оборот вокруг оси». Вращение образца на 360 градусов – один из возможных, но не единственный вариант съемки.

- Стр. 10. «Степень качества полученной в дальнейшем объемной модели зависит от того, насколько быстро вращается образец и как много снимков будет сделано за это время». Это обывательское описание. Образец во время съемки не вращается непрерывно, а поворачивается на заданный оператором угол. После каждого поворота осуществляется съемка образца за заданной оператором выдержкой и осреднением по заданному оператором количеству кадров.

- В тексте диссертации часто встречается оборот «трешхолдинг». Использование этого англицизма не обосновано и мало информативно. В научной литературе по компьютерной томографии используется понятие «порог бинаризации», который в полной мере отражает его смысл.

- Диаграммы соответствия коэффициентов пористости, оцененных либо для образцов различных размеров, либо разными методами, названы диссертантом «корреляционные поля», что вводит в заблуждение, как по смыслу, так и по размерности.

Сформулированные замечания не возмущают положений, выносимых на защиту, а побуждают к более глубокому исследованию интересной научной проблемы.

8. Заключение по диссертации.

Диссертация представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи, имеющей значение для детальных методически выверенных томографических исследований пустотного пространства коллекторов нефти и газа. Диссертационная работа Савицкого Яна Владимировича «Изучение особенностей структуры пустотного пространства коллекторов методом рентгеновской томографии ядра», выполнена на высоком научно-методическом уровне и отвечает всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.03.2013 года (в редакции

