

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.15
по диссертации Савицкого Яна Владимировича
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Диссертация «Изучение особенностей структуры пустотного пространства коллекторов методом рентгеновской томографии керна» по специальности 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. принята к защите 24 октября 2023 г. (протокол заседания № 13) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.15, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от 6 апреля 2022 г. № 34-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Геология нефти и газа» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор геолого-минералогических наук (25.00.12. Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений), профессор Галкин Сергей Владиславович, декан Горно-нефтяного факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

1. Татаркин Алексей Викторович – доктор технических наук (25.00.08. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение), заместитель генерального директора по науке Общества с ограниченной ответственностью

Научно-исследовательское, проектное и производственное предприятие по природоохранной деятельности «НЕДРА» в г. Пермь;

2. Юрьев Александр Вячеславович – кандидат технических наук (25.00.12. Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений), ведущий инженер Управления поддержки бизнеса по лабораторным исследованиям Центра исследований керна 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. Отзыв по диссертации заслушан на заседании Объединенного ученого совета Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (протокол № 6/23 от 27 ноября 2023 г.) Министерства образования и науки Российской Федерации, отзыв подписан заместителем директора по научной работе ПФИЦ УрО РАН, доктором физико-математических наук (1.1.8) Пантелеевым Иваном Алексеевичем и утвержден директором ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, член-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук (01.02.04) Плеховым Олегом Анатольевичем.

По теме диссертационной работы соискателем опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 из них в ведущих рецензируемых изданиях, 8 из них – в изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus, получено 2 патента РФ на изобретение в соавторстве. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Опубликованные научные работы по теме диссертации:

1. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна 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. (Web of Science, Scopus, перечень ВАК).

Соискателем изучена структура порового пространства карбонатных и терригенных пород на образцах стандартного и полноразмерного диаметра, выполнена визуализация результатов соляно-кислотной обработки образцов карбонатных коллекторов, проведено исследование механических свойств каменных солей (вклад автора 30%).

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 (Scopus)

Соискателем изучены образцы керн диаметром 30 – 100 см, определены оптимальные характеристики рентгеновского излучения для образцов керн различного диаметра и литологии и указан ряд геологических задач, которые можно решить указанным методом, предложена процедура выявления емкостного пространства в различных типах коллекторов с оценкой их объемов (вклад автора 50%).

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 (Web of Science, Scopus)

Соискателем проведено исследование степени смачиваемости образцов керн визейских терригенных коллекторов нескольких месторождений Пермского края с помощью метода рентгеновской томографии, в результате которого выделены гидрофобные и гидрофильные образцы (вклад автора 30%).

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. (Web of Science, Scopus, перечень ВАК)

Соискателем изучена смачиваемость пород методом рентгеновской томографии керн. Исследования заключались в сопоставлении томограмм образцов керн в сухом состоянии и при насыщении раствором йодида натрия, выступающим рентгеноконтрастным аналогом пластовой воды (вклад автора 40%).

5. Перспективы применения пропантного гидроразрыва пласта на кашировейских эксплуатационных объектах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции / С. В. Галкин, **Я. В. Савицкий**, И. Ю. Колычев, А. С. Вотинков // SOCAR Proceedings. - 2021. - Iss. Спец. вып. № 2. - С. 257-265. (Web of Science, Scopus)

Соискателем с помощью комплексирования геофизических исследований скважин, стандартных и томографических исследований керна выделены следующие литотипы карбонатных пород: высокопористый кавернозный, слоистый неоднородный пористый, неоднородный трещиновато-пористый, плотный (вклад автора 40%).

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. (Scopus, перечень ВАК).

Соискателем предложен метод количественной оценки разделения объема горной породы на твердый минеральный каркас и емкостное пространство, заполненное жидкостной или газообразной фазой. Подтверждена возможность применения метода рентгеновской томографии при изучении крупных пор на стандартных образцах и количественной оценке их фильтрационно-емкостных характеристик (вклад автора 70%).

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. (Web of Science, Scopus)

Соискателем проведен анализ и выделено несколько различных литотипов карбонатного керна, который использовался в экспериментах по механическому воздействию, проведен расчет параметров их пористости и трещиноватости (вклад автора 30%).

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 (Scopus, перечень ВАК).

Соискателем изучены методом рентгеновской томографии образцы керна до и после нагружения, выполнявшегося с целью моделирования гидроразрыва пласта (вклад автора составил 20%).

9. Experience of study of core from carbonate deposits by X-ray tomography / A. A. 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 (Перечень ВАК).

Соискателем изучены образцы карбонатного керна диаметром 30 мм, а также кубические образцы со стороной 5 мм, проведена типизация керна, определена пористость, а также проведены эксперименты по изучению возможностей применения рентгеноконтрастных растворов (вклад автора составил 30%).

10. Изучение механизма перераспределения фильтрационных потоков при закачке синтезированных сшитых гелей методом рентгеновской томографии керна / С. В. Галкин, Ю. А. Рожкова, **Я. В. Савицкий**, Б. Сарсенбекулы, К. Ванли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, № 11. - С. 127-136 (Web of Science, Scopus, перечень ВАК)

Соискателем с помощью метода рентгеновской томографии керна установлен механизм воздействия суспензии частиц полимерного геля на пласт до и после проведения фильтрационных испытаний на установке для исследования керна при пластовых условиях (вклад автора составил 20%).

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. 120-124.

Соискателем описан опыт изучения различных типов горных пород с помощью метода рентгеновской томографии в лаборатории петрофизики ПНИПУ (вклад автора составил 40%).

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

Соискателем изложено описание принципа рентгеновской томографии и возможности применения его в исследованиях керна пород-коллекторов нефти и газа. Описаны основные направления и виды рентгентомографических исследований,

проводящихся в Пермском национальном исследовательском политехническом университете(вклад автора составил 40%).

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

Соискателем изложены физические основы метода рентгеновской томографии, описано современное состояние метода и особенности применения в исследовании пород-коллекторов нефти и газа. Описан опыт применения метода в лаборатории петрофизики ПНИПУ(вклад автора составил 100%)

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.

Соискателем рассмотрены основные виды встречающихся при томографировании пород-коллекторов, а также артефактов изображений, дано их описание и классификация, предложены возможные причины и способы их устранения (вклад автора составил 80%).

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.

Соискателем разработана методика рентгеновской томографии для определения смачиваемости горных пород методом рентгеновской томографии с помощью последовательной съемки образца керна в сухом виде и насыщенном рентгеноконтрастным составом (вклад автора составил 20%)

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.

Соискателем предложен способ получения объемной трехмерной цифровой модели зерна с помощью рентгеновской томографии с целью определения пористости образца путем выделения границы пора-порода по гистограмме распределения рентгеновской плотности (вклад автора составил 50%).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан способ оценки объема порового пространства в породах-коллекторах методом компьютерной рентгеновской томографии с учетом их структуры на образцах различного размера и литологического состава;

предложен способ наиболее достоверной визуализации порового пространства для пород с межзерновым типом пористости путем определения граничного значения бинаризации, полученного с помощью проведения вычислительного эксперимента по моделированию образцов зерна с различной структурой порового пространства;

доказано, что предложенный способ определения граничного значения бинаризации обеспечивает высокую точность оценки порового пространства на реальных образцах зерна, что позволяет повысить качество и информативность оценки воздействия технологий, применяемых для решения задач повышения эффективности разработки месторождений нефти и газа.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что применение результатов компьютерной рентгеновской томографии образцов зерна позволяет более достоверно выделять и количественно описывать пустотное пространство в высокопористых карбонатных коллекторах;

разработана методика для реконструированных кубов моделей зерна, позволяющая формализовать критерий проведения бинаризации, позволяющий наиболее достоверно выделять поровое пространство для пород терригенного состава, основываясь на относительных характеристиках распределений рентгеновской плотности образцов и результатах стандартных исследований зерна.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан алгоритм оценки граничного значения, позволяющий наиболее полно визуализировать и характеризовать поровое пространство зерна терригенных

пород с помощью комплексного использования метода рентгеновской томографии и газоволюметрического метода;

разработан метод, позволяющий оценивать степень гидрофобности зерна путем расчета степени заполненности объема пор в насыщенном рентгеноконтрастным флюидом образце зерна с применением рентгеноконтрастных растворов из которых наиболее оптимальным является иодид натрия.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

получена **сходимость** оценки коэффициента пористости по результатам томографии с данными, замеренными по стандартной методике газоволюметрического измерения пористости, обычно применяемой при петрофизических исследованиях зерна;

корректно **применены** методики исследования зерна, методы математической статистики, что подтверждается результатами апробации в научной работе и непротиворечивостью полученных результатов и данных, опубликованных в открытой печати.

Личный вклад соискателя состоит в изучении проблемы, постановке задач, проведении измерения емкостных характеристик горных пород, проведении съемок зернов методом рентгеновской томографии, обработке результатов исследований образцов в программном комплексе Avizo, подготовке графического материала результатов съемок, анализе результатов томографии, систематизации и обработке научных данных, разработке модели прогноза граничного значения бинаризации, построении объемных моделей зернов (томограмм).

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 9 декабря 2021 г. № 4334-В: в ней изложены и научно обоснованы теоретические решения по выделению методом рентгеновской томографии пустотного пространства в высокопористых карбонатных коллекторах, разработана методика выделения порового пространства для пород терригенного состава, даны практические рекомендации по проведению граничного значения, позволяющего характеризовать поровое пространство терригенных коллекторов,

разработан метод, позволяющий оценивать гидрофобность керна с помощью метода рентгеновской томографии, что повышает качество лабораторных исследований керна пород-коллекторов нефти и газа.

На заседании 27 декабря 2023 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.05.15 принял решение присудить Савицкому Яну Владимировичу ученую степень кандидата технических наук (протокол заседания № 17).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 14, против присуждения ученой степени – 0.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.05.15,

д-р геол.-мин. наук
профессор

____ / Галкин Владислав
Игнатьевич /

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

5,
____ / Мелехин Александр
Александрович /

27 декабря 2023 г.