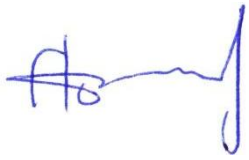
На правах рукописи



АБРОСИМОВ АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ И ОСТАТОЧНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена на кафедре геофизических информационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

Научный руководитель: **Стрельченко Валентин Вадимович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хозяинов Михаил Самойлович**
доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой управления проектами
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
Московской области «Университет «Дубна»

Корост Дмитрий Вячеславович
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник кафедры
геологии и геохимии горючих ископаемых
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: ООО «Арктик-ГЕРС»

Защита диссертации состоится 11 апреля 2017 г. в 15:00 на заседании учёного совета Д 212.200.05 при ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, дом 65, корп. 1, ауд. 523.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» и на официальном сайте http://www.gubkin.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук Хохлова М.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности извлечения углеводородного сырья из продуктивных пластов является актуальной задачей, решение которой невозможно без знания фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора. Керновый материал является одним из базовых источников информации о месторождениях нефти и газа. Для ряда месторождений керновый материал не отбирают из-за низкой экономической рентабельности. Традиционно свойства коллекторов таких месторождений принимают аналогичными свойствам соседних месторождений. Подобные решения могут вносить ошибку в результаты прогнозирования показателей разработки. Бывают ситуации, когда скважины характеризуются малым выносом кернового материала вследствие его слабой консолидированности, из-за чего традиционные лабораторные методы становятся непригодными для исследований, либо не позволяют получить статистически достоверные петрофизические зависимости.

Решение вышеперечисленных проблем возможно с помощью применения технологий неразрушающего контроля. Одной из инновационных и активно развивающихся технологий в нефтегазовой отрасли является «Цифровой керн» (в англоязычной терминологии – «Digital Rock»). База данных, получаемых на её основе, определяется как «цифровое кернохранилище». В основе технологии лежит создание трёхмерной цифровой модели керна с помощью метода рентгеновской томографии (РТ). Полученная модель используется для определения набора петрофизических характеристик керна, а также для апробации методов воздействия на пласт путём математического моделирования.

Данная технология находится на стадии развития и решения научных и методических проблем. Среди них можно выделить проблемы недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии, нехватки вычислительных ресурсов, ограничения математических алгоритмов при расчёте фильтрационных характеристик.

Метод рентгеновской томографии не позволяет построить гидродинамически связанное пустотное пространство и рассчитать проницаемость образцов, поры и каналы которых имеют размер меньше разрешающей способности томографа. Недостаток разрешения также является преградой к выделению в пустотном пространстве остаточных флюидов, глобулы и плёнки которых имеют размеры меньше разрешающей способности прибора.

Другая важная проблема связана с недостаточностью вычислительных ресурсов, поскольку для расчёта проницаемости стандартного петрофизического образца необходимо применять суперкомпьютеры. В связи с этим распространенность и применимость метода рентгеновской томографии ограничена.

Таким образом, выбранное в диссертационной работе направление в области «цифровой петрофизики» является современным, актуальным и развивающимся.

Цель работы

Разработка и апробация новых методик определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

Основные задачи

1. Создание информационной базы для определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород с использованием метода рентгеновской томографии.

2. Разработка методики определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

3. Разработка алгоритма, обеспечивающего гидродинамическую связанность модели пустотного пространства горных пород в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии.

4. Разработка методик определения остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

5. Апробация разработанных методик на примере четырёх месторождений Российской Федерации.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород для оценки проницаемости и её анизотропии в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии.

2. Разработана методика определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования с использованием сформированного из цифровой модели керна массива виртуальных кубов.

3. Разработана методика анализа интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения для количественного определения остаточной водонасыщенности горных пород.

4. Разработана методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе данных поля скоростей однофазной фильтрации.

Практическая значимость

1. Предложены методики, позволяющие строить петрофизические связи $К_{пр}=f(К_п)$ и $К_{ов}=f(К_п)$ из ограниченного числа образцов керна, близкие к фактическим лабораторным связям для всего геологического объекта (пласта). Полученные результаты позволяют рекомендовать данный подход для использования на объектах, где проведение традиционных лабораторных исследований по оценке пористости, проницаемости и остаточной водонасыщенности невозможно.

2. Предложенная методика с созданием виртуальных кубов позволяет формировать массив петрофизических данных по ограниченному количеству

кернового материала и устанавливать петрофизические связи для отдельных литотипов.

3. Методики с использованием массива виртуальных кубов не требуют больших вычислительных мощностей, позволяют экономить время получения данных, ресурс рентгеновской трубки томографа.

4. Алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород позволяет оценивать проницаемость и её анизотропию в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии.

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в постановке целей, задач по выбранной теме диссертационной работы и формулировке её основных идей. Автор лично проводил экспериментальные исследования, обрабатывал и анализировал полученные данные. Положения и результаты, представленные в диссертации, получены при определяющем участии автора. На основании результатов исследования и их обобщения автором сформулированы выводы и заключения, вошедшие в диссертационную работу.

Достоверность предложенных автором выводов и рекомендаций проверялась путем сравнения результатов исследования керна с использованием метода рентгеновской томографии и численного моделирования с традиционным комплексом петрофизических исследований. Разработанные методики позволяют восстанавливать петрофизические зависимости с высокой степенью достоверности, что подтверждено сопоставлениями данных лабораторных исследований керна с модельными значениями тех же параметров на представительной коллекции керна четырёх месторождений.

Методы исследования

При выполнении диссертационного исследования применялись следующие методы: анализ и систематизации литературных источников, посвященных определению фильтрационно-емкостных свойств и остаточной

водонасыщенности методом рентгеновской томографии; метод рентгеновской томографии; метод численного моделирования однофазной фильтрации флюида; метод сравнения результатов численных экспериментов и лабораторных данных.

Защищаемые положения

1. Алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород для оценки проницаемости и её анизотропии в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии.
2. Формирование массива виртуальных кубов из цифровой модели горной породы для определения её фильтрационно-емкостных свойств по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.
3. Использование интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения для количественного определения остаточной водонасыщенности горных пород.
4. Методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе данных поля скоростей однофазной фильтрации.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «XX Губкинские чтения» (Москва, 2013), 2-ая Всероссийская конференция «Практическая микротомография» (Москва, 2013), 10-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» (Москва, 2014), Республиканская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы нефтегазогеологической науки, техники и технологии глубокого бурения, исследований скважин» (Ташкент, 2014), Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы» (Санкт-Петербург, 2015), 19-ая Международная конференция и выставка «Нефть и газ Сахалина 2015» (Южно-Сахалинск, 2015), 11-ая Всероссийская конференция

«Новые технологии в газовой промышленности (нефть, газ, энергетика)» (Москва, 2015), 8-ое Всероссийское литологическое совещание «Эволюция осадочных процессов в истории Земли» (Москва, 2015), 7-ой Международный Молодежный научно-практический конгресс «Oil and Gas Horizons» (Москва, 2015), «XXI Губкинские чтения» (Москва, 2016), Международная научно-техническая конференция «Geopetrol 2016» (Краков, 2016), 5-ая Международная конференция «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Москва, 2016).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 7 статей – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Подана 1 заявка на патент на изобретение.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 4 глав, выводов. Содержание диссертации изложено на 107 страницах, содержит 57 рисунков, 7 таблиц и список использованной литературы из 93 наименований.

Благодарности

Автор благодарен научному руководителю, д.т.н., профессору Стрельченко В.В., за постоянное внимание и поддержку. Автор глубоко признателен к.г-м.н., доценту Языниной И.В. за всестороннюю помощь при написании диссертации. Автор благодарен к.т.н. Шеляго Е.В., к.ф.-м.н. Д.А. Бикулову, к.г-м.н., доценту Городнову А.В., к.г-м.н., доценту Черноглазову В.Н., а также всему профессорско-преподавательскому составу кафедры геофизических информационных систем за ценные советы и замечания, полученные в ходе написания и обсуждения работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 13.2653.2014/K.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследований, научная новизна работы, практическая значимость и защищаемые положения.

В первой главе представлен обзор работ отечественных и зарубежных исследователей, в разное время занимавшихся определением ФЕС и остаточной водонасыщенности по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

Первые исследования образцов горных пород методом РТ были проведены за рубежом в 1987 г. (Vinegar H.J., Wellington S.L.), в нашей стране - в 1992 г. (Хозяинов М.С., Вайнберг Э.И.), и уже в настоящее время в нефтегазовой отрасли существует идея создания «Цифрового кернохранилища», которое подразумевает определение набора петрофизических характеристик керна на базе метода РТ, а также апробацию методов воздействия на пласт путём математического моделирования.

Проблемами прогноза ФЕС с использованием данных рентгеновской томографии в разное время занимались Арсеньев-Образцов С.С., Баюк И.О., Васильев Р.В., Варфоломеев И.А., Герке К.М., Гилязетдинова Д.Р., Динариев О.Ю., Еременко Н.М., Ефимов А.А., Закиров Т.Р., Казак А.В., Карсанина М.В., Корост Д.В., Коротеев Д.А., Кривощеков С.Н., Михайлов Д.Н., Надеев А.Н., Рыжиков Н.И., Хозяинов М.С., Черемисин А.Н., Чугунов С.С., Шако В.В., Якимчук И.В., Akanji L.T., Al-Kharusi A.S., Bakke S., Bauer D., Bentz D.P., Blunt M.J., Dong H., Dvorkin J., Garcia X., Gland N., Kunz P., Øren P.E., Patzek T.W., Talon L., Tartakovsky A.M., Valvatne P.H., Youssef S. Авторы отмечают проблемы ограниченности математических алгоритмов для моделирования фильтрации, недостатка разрешающей способности РТ для построения связанной модели пустотного пространства и нехватки вычислительных ресурсов. Актуальной задачей сегодня является расчёт согласованных между собой величин пористости и проницаемости пород в широком диапазоне значений для построения петрофизических связей.

Вопросами РТ-съёмки насыщенных образцов и выделения флюидов в поровом пространстве образцов занимались Корост Д.В., Скрипкин А.Г., Bounoua N., Carnerup A., Coles M.E., Dodd N., Falus P., Fogden A., Frank S., Hopmansc J.W., Knackstedt M., Marathe R., Marquez X., Martins T., Merino J.M., Middleton J., Mogensen K., Porter M.L., Riverse M.L., Vazd C.M.P., Wildenschild D., Withjack E.M. Основной проблемой в данном направлении является недостаток разрешающей способности РТ для выделения в пустотном пространстве остаточных флюидов, глобулы и плёнки которых имеют размеры ниже разрешающей способности рентгеновского томографа.

Для решения обозначенных проблем в настоящей работе предлагается ряд новых методик по определению ФЕС и остаточной водонасыщенности, позволяющих расширить возможности применения РТ для анализа керна.

Во второй главе представлены объекты и методы исследования.

Объектами исследования выступают карбонатные и терригенные коллекторы четырёх месторождений Российской Федерации.

Объектом исследования Харьягинского месторождения являются терригенные отложения среднего отдела девонской системы афонинского горизонта (D_2af). Для РТ-исследований были отобраны образцы с проницаемостью от 9 до $800 \cdot 10^{-3}$ мкм^2, пористостью от 7 до 18.5% и остаточной водонасыщенностью от 2 до 70%. Выбранные образцы относятся к песчаникам средне- и мелкозернистым, по минеральному составу кварцевым (90-95%). Цементирующая часть представлена глинистым (каолинитовым) цементом порового типа. Пустотное пространство представлено порами межзернового типа и распределено равномерно.

Объектом РТ-исследований Красноленинского месторождения являются терригенные отложения Викуловской свиты (K_1vk). В отобранных образцах пористость изменяется в диапазоне от 22 до 27.6 %, проницаемость от 34 до $254 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 и остаточная водонасыщенность от 22 до 42 %. Данные образцы представлены песчаниками средне- и мелкозернистыми, а также крупнозернистыми алевролитами. По минеральному составу обломочная часть

представлена кварцем – 50-60%, полевыми шпатами – 35-45%. Цементирующая часть представлена глинистым (каолинитовым) цементом сгусткового, порового типа. Пустотное пространство представлено порами межзернового типа и внутризерновой пористостью.

Объектом исследования Москудьинского месторождения являются карбонатные отложения среднего отдела каменноугольной системы башкирского яруса (C_2b). В отобранных образцах пористость изменяется в диапазоне от 2.5 до 27 %, проницаемость – от 0.1 до $2610 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 и остаточная водонасыщенность – от 2 до 60 %. Образцы представлены известняками органогенно-детритовыми, микрокомковато-сгустковыми водорослевыми, фораминиферо-водорослевыми. Пустотное пространство представлено преимущественно кавернами, размеры которых достигают 400 мкм и более, а также крупными пустотами (30-40 мкм). Встречаются внутриформенные и межформенные пустоты. На основании результатов лабораторных исследований, изучения структуры пустотного пространства в шлифах, образцы пород коллектора башкирского яруса можно отнести к каверно-поровому типу.

Объектом исследования Возейского месторождения являются карбонатные отложения верхнего отдела девонской системы фаменского яруса (D_3fm). Коллектор представлен известняком микрозернистым, неравномерно доломитизированным, трещиноватым. В отобранных образцах пористость изменяется в диапазоне от 2.5 до 18 %, проницаемость – от 0.1 до $100 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 и остаточная водонасыщенность – от 2 до 48 %. Пустотное пространство в них представлено межкристаллической пористостью, а также микропористостью, приуроченной к водорослевым комкам. Образцы пород коллектора фаменского яруса Возейского месторождения относятся к трещинно-каверно-поровому типу.

Исследование образцов керна в настоящей работе проводилось с помощью рентгеновского томографа SkyScan (Бельгия). Процесс получения информации с использованием вышеупомянутого прибора можно разделить на три основных этапа: сканирование образца керна в камере томографа, его компьютерная реконструкция и обработка данных (рис.1).

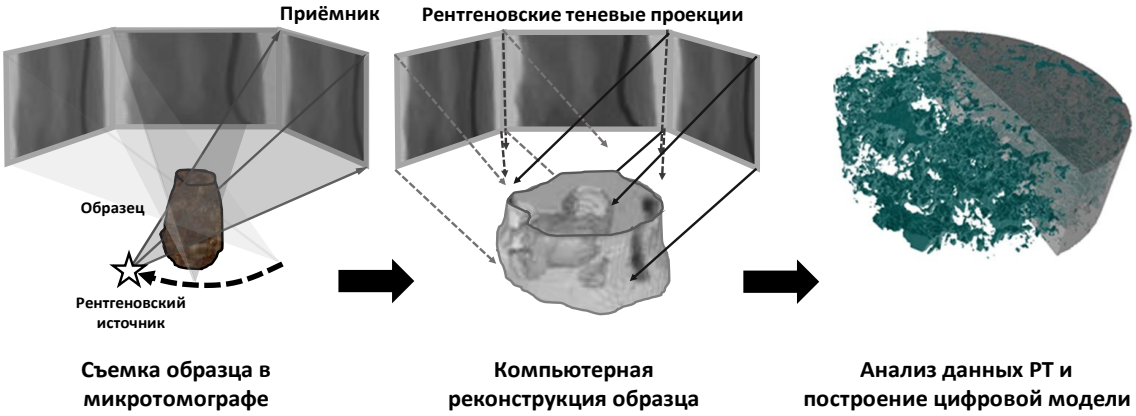


Рисунок 1 - Процесс получения информации на рентгеновском томографе

На первом этапе получают серию теневых изображений образца. Для получения распределения поглощающей способности рентгеновского излучения внутри образца используют процедуру реконструкции. Конечным результатом является набор поперечных срезов образца. На этапе обработки представляется возможным выделить отдельные компоненты образца и создать их объёмные модели. Построение модели пустотного пространства для её дальнейшего использования в гидродинамическом моделировании производится путём выделения газовой компоненты.

Для моделирования флюидодинамики на микроуровне использовался метод решёточных уравнений Больцмана (РУБ), являющийся одним из универсальных методов вычислительной физики и использующийся для моделирования различных процессов: динамики разреженных газов, теплопереноса, а также течения жидкости в поровом пространстве. Алгоритм РУБ явно учитывает морфологию пустотного пространства, но в отличие от стандартных методов расчёта течения флюида, использующих уравнения Навье-Стокса, рассматривает течение как движение квазичастиц, перемещение которых происходит между проницаемыми ячейками согласно заданному шаблону скоростей.

В третьей главе приводится методика расчёта ФЕС по данным РТ и численного моделирования, результаты её апробации.

Для решения проблемы недостаточной производительности вычислительных ресурсов предлагается новый подход с выделением сравнительно небольших фрагментов из разных областей образца – виртуальных кубов. Все горные породы на микроуровне неоднородны, поэтому при таком подходе из данных каждой РТ-съёмки можно рассчитать сразу несколько парных значений пористости и проницаемости и построить по ним корреляционную связь. Чем больше неоднородность образца, тем шире будет область расчётных значений ФЕС. Аналогично с этим по данным анализа петрофизических цилиндров 3×3 см строят петрофизические связи для целых пластов. Такой подход является традиционным в петрофизике, но новым в области цифрового керна (рис.2).

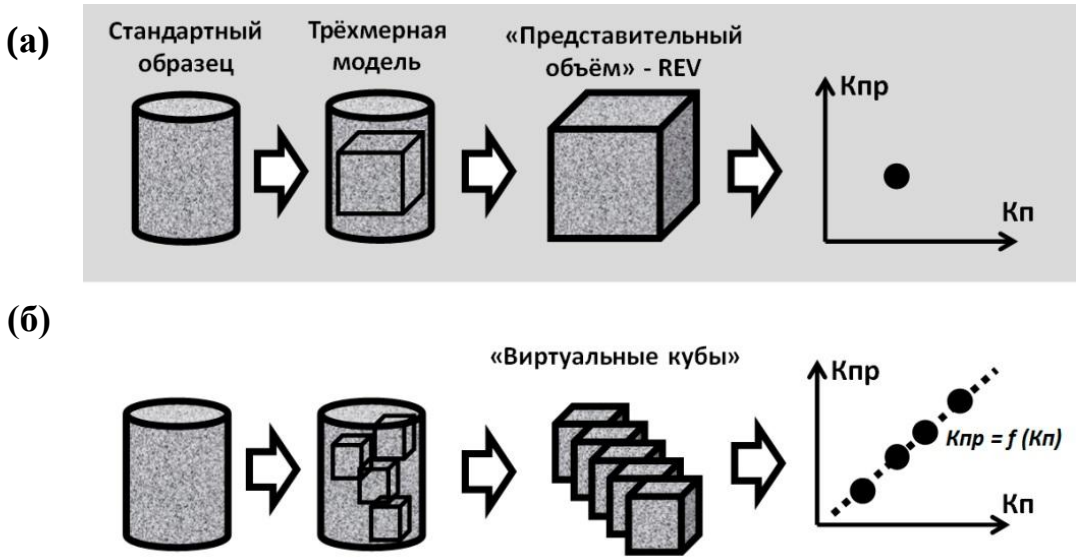


Рисунок 2 – Традиционный (а) и новый (б) подходы к определению ФЕС и построению петрофизической связи $К_{пр} = f\ (К_п)$

Основное преимущество предложенного подхода – его доступность по отношению к оборудованию для съёмки и дальнейшей работы с данными, возможность экономить ресурс томографа, изучать небольшие коллекции кернового материала, получая из ограниченного количества РТ-снимков больше информации, чем при традиционном подходе.

Известной проблемой метода РТ при работе с низкопроницаемыми породами является отсутствие связанности модели пустотного пространства

из-за недостатка разрешающей способности РТ для регистрации мелких пор и каналов и, как следствие, невозможность расчёта проницаемости и её анизотропии.

Для решения этой проблемы предложен подход, базирующийся на математическом восстановлении модели пустотного пространства (рис.3). На первом шаге каждая ячейка сегментированной томографии, соответствующая матрице породы и имеющая в окрестности одну ячейку порового пространства вдоль любой из координат, заменяется на пустотное пространство. На следующем шаге каждая ячейка пустотного пространства, граничащая непосредственно с ячейками породы (содержащая в окрестности одну ячейку вдоль любой из осей координат ячейку породы), помечается как матрица. Применение данного алгоритма приводит к искусственному увеличению пористости виртуальных кубов, появлению связанности пустотного пространства, что дает возможность рассчитать проницаемость по данным РТ.

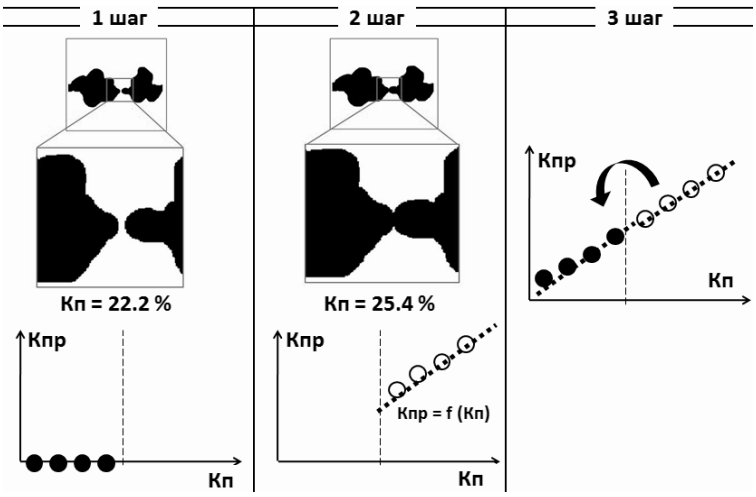


Рисунок 3 – Алгоритм восстановления связности пустотного пространства и построение петрофизической связи $К_{пр} = f (К_п)$

Рассчитанные значения проницаемости соответствуют искусственно увеличенной пористости. Для того чтобы получить проницаемость при исходных значениях пористости, по выборке виртуальных кубов строят зависимость, в соответствии с которой завышенные значения проницаемости экстраполируют в область меньших или исходных значений пористости.

Достоинством разработанного алгоритма является то, что восстановление модели пустотного пространства производится во всех направлениях. Это в первую очередь повлияет на направления, в которых каналы или пережимы не соединяются вследствие недостатка разрешения РТ-съёмки, что будет положительно сказываться при расчёте анизотропии проницаемости.

На рис.4 демонстрируется пример работы алгоритма на модели пустотного пространства песчаника среднезернистого в условиях недостатка разрешающей способности РТ. Показано, что съёмка с разрешением 2 мкм обеспечивает детализированную и связанную модель пустотного пространства, однако загрубление разрешения до 6 мкм уже приводит к отсутствию её сообщаемости. Последующее применение разработанного алгоритма к загрубленной модели позволяет восстановить её гидродинамическую связанность и оценить анизотропию проницаемости.

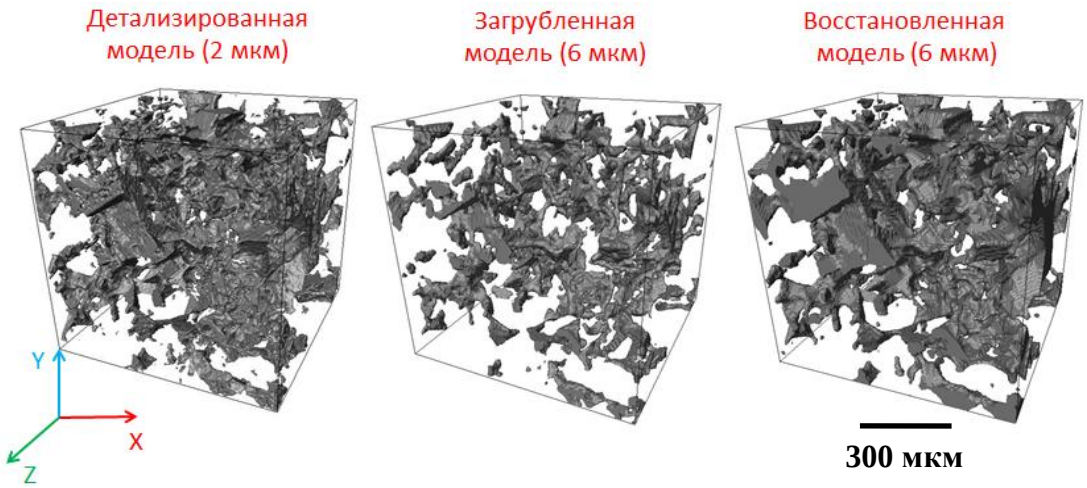


Рисунок 4 – Результат применения алгоритма на примере модели пустотного пространства песчаника

В табл.1 приводится сравнение значений анизотропии проницаемости на детализированной и восстановленной моделях, где показано, что применение алгоритма для модели с более грубым разрешением дает среднюю ошибку в 4% при оценке анизотропии в сравнении со значениями, полученными на модели более высокого разрешения. Данный факт является подтверждением корректности работы предлагаемого алгоритма.

Таблица 1 – Результат расчёта анизотропии проницаемости на примере детализированной и восстановленной моделях образца песчаника

Направления	**Коэффициент анизотропии проницаемости детализированной модели**	**Коэффициент анизотропии проницаемости восстановленной модели**
X-Z	0.70	0.74
Y-Z	0.77	0.79
X-Y	0.91	0.93

Предложенные методики были апробированы для расчёта ФЕС и построения петрофизических связей $К_{пр}=f(К_п)$ для четырёх месторождений РФ с использованием основных литологических разностей.

На рис.5 приведены лабораторные данные для образцов коллектора порового типа Харьягинского месторождения и построена расчётная зависимость по 20 виртуальным кубам, полученным из РТ-съёмок двух образцов песчаника средне- и мелкозернистого. Таким образом, по малому количеству образцов керна возможно анализировать основные литологические типы пород. Видно, что расчётная зависимость совпадает с лабораторной, полученной по всем образцам исследуемых отложений. В обеих зависимостях отмечается разброс проницаемости при единственном значении пористости. В подобных случаях прогноз проницаемости коллекторов по данным геофизических исследований скважин сопряжен с большими неопределенностями. Среди петрофизиков и интерпретаторов существуют различные способы классификации коллекторов в поле графика $К_{пр}=f(К_п)$. Довольно часто исследователи прибегают к разделению пород на литотипы с использованием минералогических, гранулометрических исследований, описания керна и шлифов, индекса FZI и т.д. Разработанную методику по определению ФЕС горных пород с формированием массива виртуальных кубов предлагается также использовать для расшифровки широкого разброса значений пористости и проницаемости с привлечением дополнительной информации, полученной по РТ, например, распределения пустот по размерам, путей фильтрации флюида.

Так, на рис.5 отмеченные образцы характеризуются одинаковой пористостью, но различной проницаемостью. Анализ показал, что в образце с меньшей проницаемостью преобладают пустоты размером 20-30 мкм, в то время как для образца с более высокой проницаемостью это значение приходится на 60-70 мкм. Для наглядности приводятся объёмные модели путей фильтрации, на которых видно, что в образце с высокой проницаемостью присутствует больше путей с высокой скоростью течения (красный цвет) и их размер больше, чем в образце с низкой проницаемостью.

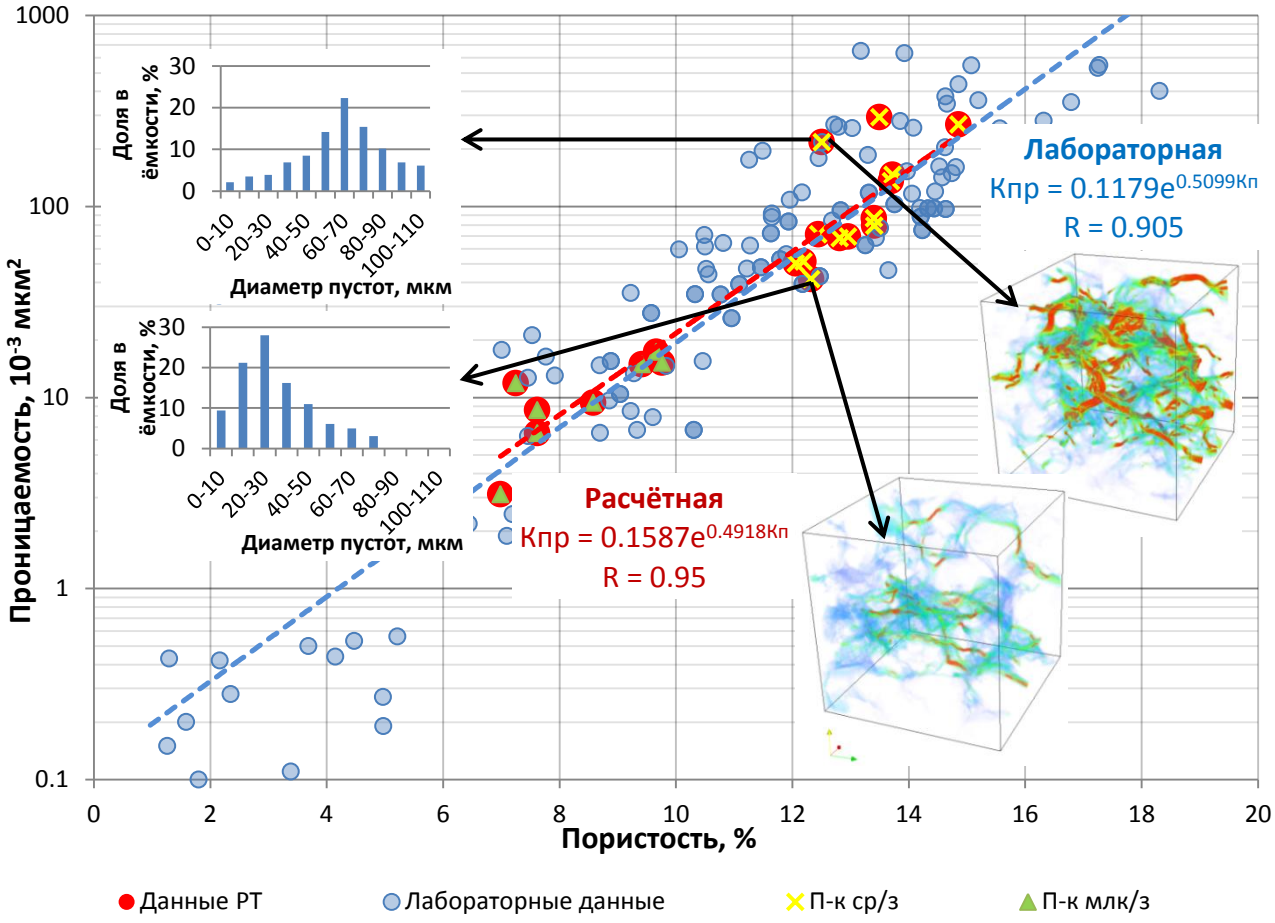


Рисунок 5 – Сопоставление расчётной и лабораторной связей $K_{пр} = f(K_п)$ для коллектора порового типа

<u>В четвертой главе</u> описываются экспериментальная и расчётная методики определения остаточной водонасыщенности, приводятся результаты их апробации на породах месторождений РФ.

В основу экспериментальной методики положена регистрация интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения.

Для её реализации требуется съёмка образца в трёх состояниях – сухом, полностью водонасыщенном и насыщенном остаточной водой. Интегральная интенсивность спектра поглощения в любом состоянии равна сумме поглощений ячейками, находящихся в данной локальной области:

$$\mathrm{I}_{\text{обр}} = 1 \cdot N_{\text{ячеек}} + 2 \cdot N_{\text{ячеек}} + \ldots + 255 \cdot N_{\text{ячеек}} \quad (1)$$

Где 1, 2, … 255 – это индексы поглощения рентгеновского излучения, а $N_{\text{ячеек}}$ – количество ячеек с заданным индексом поглощения. Зная интегральную интенсивность спектров поглощения рентгеновского излучения образца в трёх состояниях, его коэффициент остаточной водонасыщенности ($К_{ов}$) рассчитывается по формуле:

$$\mathrm{K}_{\text{ов}} = \frac{\mathrm{I}_{\text{ост.водонас}} - \mathrm{I}_{\text{сух}}}{\mathrm{I}_{\text{водонас}} - \mathrm{I}_{\text{сух}}} \quad (2)$$

Методика была апробирована на образцах песчаника мелкозернистого и известняка водорослевого с использованием пластовой воды и добавлением в неё рентгеноконтраста – KI (табл.2).

Таблица 2 – Расчёт остаточной водонасыщенности по интегральной интенсивности спектра поглощения рентгеновского излучения. Размер образцов – 30×30 мм, разрешение РТ-съёмки – 10 мкм.

Образец	**$I_{сух}$**	**$I_{водонас.}$**	**$I_{ост.водонас.}$**	**$К_{ов}$ (РТ), %**	**$К_{ов}$ (лаб), %**
№1(песчаник) без рентгеноконтраста	74642590428	78514124844	76138793875	38.6	41.3
№2 (известняк) без рентгеноконтраста	85829079667	89396132186	88355416118	70.8	74.4
№1/2 (песчаник) с KI	74642590428	78923446284	76368292884	40.3	41.3
№2/2 (известняк) с KI	85829079667	89635733932	-	-	-

Для образца песчаника использование пластовой воды (№1) показало ошибку в 6.5 %, а добавление KI (№1/2) уменьшило ошибку определения $К_{ов}$ до 2.3%. Для известняка использование пластовой воды (№2) привело к ошибке в 4.8%, а определить остаточное водонасыщение с применением KI (№2/2) не удалось из-за большого количества возникших круговых артефактов.

Таким образом, предложенная методика позволяет определить остаточное водонасыщение не прибегая к рентгеноконтрасту. Добавление в воду KI позволяет повысить достоверность определения $К_{ов}$ для образцов терригенных отложений, однако в случае карбонатных – предположительно, требуется предварительный подбор концентрации рентгеноконтраста.

Методика расчёта остаточной водонасыщенности основана на использовании поля скоростей однофазной фильтрации, полученного при численном моделировании. На первом этапе проводится РТ-съёмка образца керна с известным остаточным водонасыщением. На втором шаге производится формирование массива виртуальных кубов из данных РТ, с последующим расчётом проницаемости и построением поля скоростей для каждого куба. Метод РУБ определяет скорость течения жидкости в каждой ячейке пустотного пространства, каждая из которых занимает определенный его объём, что позволяет построить гистограмму скоростей фильтрации. Далее выбирают тот куб, пористость которого близка к пористости образца, и производят калибровку таким образом, чтобы доля ячеек в пустотном пространстве до порогового значения скорости была равна коэффициенту остаточной водонасыщенности. Все области пустотного пространства со скоростями течения ниже порогового считают заполненными остаточной водой. Для получения большого количества расчётных значений остаточной водонасыщенности пороговое значение распространяется на другие виртуальные кубы, выделенные из трёхмерной модели керна.

Для рассматриваемых месторождений коэффициент корреляции лабораторных значений пористости и остаточной водонасыщенности составляет: Москудьинское – 0.76, Возейское – 0.79, Красноленинское – 0.62 и Харьягинское – 0.81 д.ед.

На рис. 6 приведено сопоставление лабораторных и расчётных данных по пористости и остаточной водонасыщенности на примере каверно-порового типа коллектора Москудьинского месторождения. Использование подхода с формированием массива виртуальных кубов позволило выделить зависимости

для отдельных литотипов, а также показать уменьшение содержания остаточной воды с ростом размера пустот в выделенных кубах.

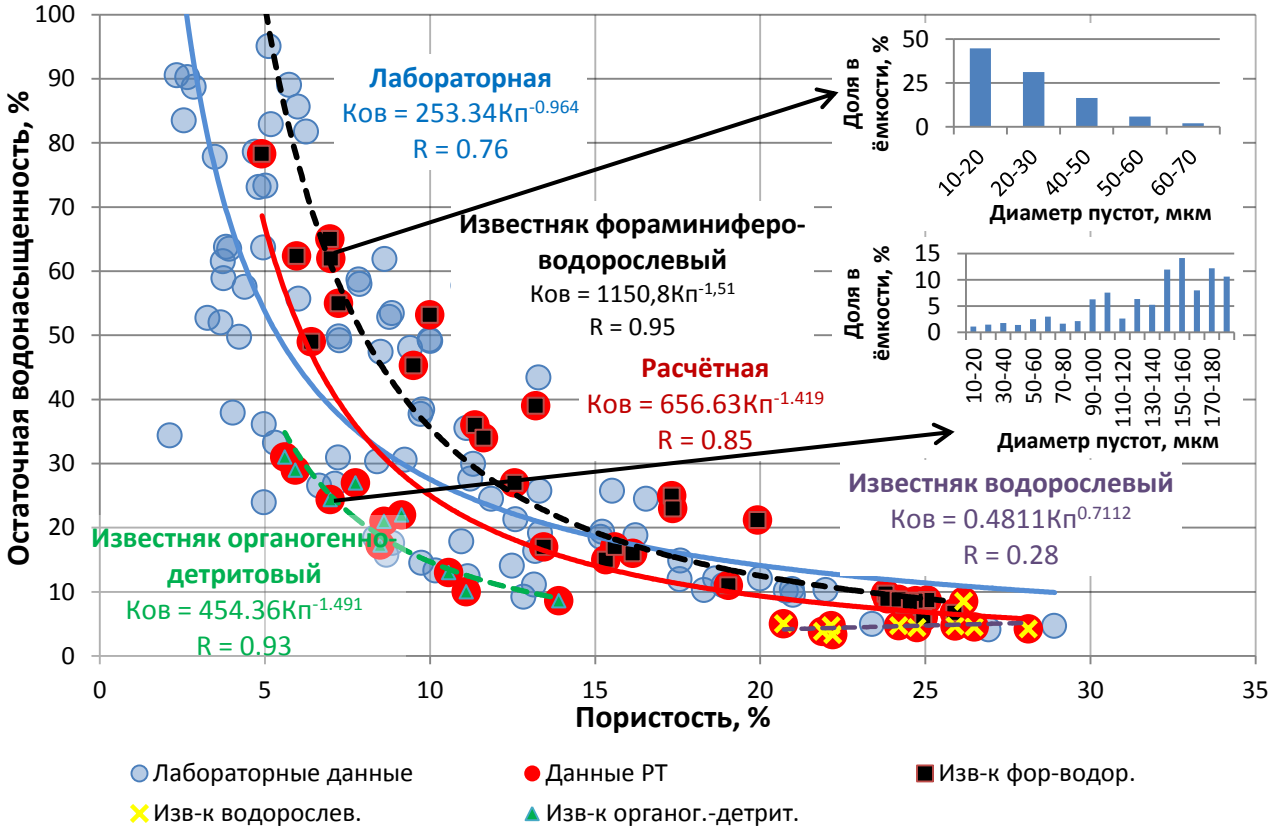


Рисунок 6 – Пример построения петрофизических связей $К_{ов} = f(К_п)$ для каверно-порового типа коллектора и его отдельных литотипов

Общие выводы

1. Разработан алгоритм восстановления гидродинамической связности модели пустотного пространства в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии. Данный подход позволяет проводить гидродинамическое моделирование для геологических объектов на микроуровне, определять значение проницаемости и её анизотропии для случаев, когда фильтрующий радиус меньше разрешающей способности рентгеновского томографа.

2. Разработана и апробирована новая методика определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования, основанная на искусственном формировании массива виртуальных кубов из разных частей образца. В рамках

методики показано, что расчётные значения пористости и проницаемости по виртуальным кубам формируют связь близкую к лабораторной для изучаемых объектов нескольких месторождений РФ.

3. Разработана и апробирована методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе поля скоростей однофазной фильтрации. Предложена и апробирована методика определения остаточной водонасыщенности горных пород, основанная на анализе интегральной интенсивности спектров поглощения рентгеновского излучения в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии. Данный подход рекомендуется для изучения распределения остаточной воды в образцах.

4. Предложенные методики с формированием массива виртуальных кубов позволят повысить достоверность петрофизических данных в условиях малого отбора керна или слабой его консолидации, а также устанавливать связи для отдельных литотипов, более обоснованно проводить расшифровку петрофизических зависимостей с низким коэффициентом корреляции.

5. Методики расчёта фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности с использованием массива виртуальных кубов не требуют высоких вычислительных мощностей, позволяют экономить время работы рентгеновской трубки и время машинного счёта.

Публикации по теме диссертации

Публикации в ведущих изданиях согласно перечню ВАК

1. Абросимов, А.А. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны и её фильтрационно-емкостных свойств при бурении / В.В. Стрельченко, Д.А. Мельничук, А.А. Абросимов // Вестник Ассоциации Буровых Подрядчиков. -2014. - №1. - С.60-62.

2. Абросимов, А.А. Информативность разноуровневого изучения процесса развития трещиноватости в коллекторах нефти и газа / В.В. Стрельченко, А.А. Абросимов, Д.А. Мельничук // Газовая промышленность. – 2015. – №1. – С. 42-45.

3. Абросимов, А.А. Влияние вторичной доломитизации на формирование коллекторских свойств продуктивных пород месторождений нефти и газа / М.А. Беляков, И.В. Язынина, А.А. Абросимов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 6. – С. 24-27.

4. Абросимов, А.А. Применение рентгенотомографии для изучения фильтрационно-емкостных систем коллекторов нефти и газа / А.А. Абросимов // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – №4. – С.5-15.

5. Абросимов, А.А. Фильтрационно-емкостные системы нефтематеринских пород (на примере нижней части майкопской серии) / Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов // Каротажник. – 2016. – № 4. – С.36-45.

6. Абросимов, А.А. Структура порового пространства различных видов пористости коллекторов талахского горизонта / Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов, В.С. Жуков, В.В. Моторыгин // Газовая промышленность. - 2016.- №6.– С. 56-59.

7. Абросимов, А.А. Новый подход к исследованиям керна с помощью рентгеновской микротомографии для решения задач петрофизики / И.В. Язынина, Е.В. Шеляго, А.А. Абросимов, Н.А. Веремко, Н.Е. Грачев, Д.С. Сенин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 19-23.

Публикации в других изданиях

8. Абросимов, А.А. «Выделение различных физико-химических фаз в фильтрационно-емкостном пространстве горных пород» / А.А. Абросимов // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: тез. докладов 10-ой Всерос. науч.-техн. конф., 10-12 февраля 2014 г., г. Москва. – Москва, 2014. – С.29.

9. Абросимов, А.А. Рентгенотомография в приложение к изучению карбонатных коллекторов месторождения Парсанкуль / А.С. Муминов, Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов, Н.Е. Лазуткина // Актуальные вопросы нефтегазогеологической науки, техники и исследований скважин: тез. Республиканской науч.-практ. конф., 20-21 нояб. 2014 г., г. Ташкент. – Ташкент, 2014. – С.41-43.

10. Абросимов, А.А. Изучение коллекторов, содержащих трудноизвлекаемые запасы [Электронный ресурс] – электронное издание на 1 CD-R диске / А.А. Абросимов, Ю.Г. Пименов // Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы: материалы Междунар. конф., 6-10 июля 2015г., г. Санкт-Петербург – СПб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2015.

11. Abrosimov, A.A. Reservoir systems research of oil source rocks/ A.A. Abrosimov // Oil and Gas Horizons VII: Abstract Book The Seventh International Youth Scientific and Practical Congress, 24-26 November 2015, Moscow. – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2015. - p.10.

12. Абросимов, А.А. Изучение нетрадиционных источников углеводородов с использованием рентгеновской томографии / А.А. Абросимов, В.В. Стрельченко // Geopetrol 2016: материалы 10-ой Междунар. науч.-техн. конф., 19-22 сент. 2016 г., г. Закопане – Zakopane, 2016. – С.751-755.

13. Абросимов, А.А. Расчёт малых значений проницаемости горных пород по данным рентгеновской томографии / И.В. Язынина, Е.В. Шеляго, А.А. Абросимов // Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям: материалы V междунар. конф., 22-23 ноября 2016 г., г. Москва. – Москва, 2016. - С.179-183.

Патентная заявка

14. Способ исследования фильтрационно-емкостных свойств горных пород: заявка на пат. Рос. Федерация № 2016128482 / Язынина И.В., Шеляго Е.В., Абросимов А.А., Бикулов Д.А., Грачев Н.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина». – № 1027739073845; заявл. 13.07.2016.

Соискатель **Абросимов А.А.**