

На правах рукописи

РЯБУХИН АНТОН ДМИТРИЕВИЧ

**МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРСКИХ
СВОЙСТВ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ
ПЛАСТОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2026

Работа выполнена на кафедре недропользования и нефтегазового дела инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы» (РУДН).

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук (25.00.12), доцент, **Страхов Павел Николаевич**, профессор кафедры недропользования и нефтегазового дела ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук (25.00.12), заведующий кафедрой нефтегазовой седиментологии и морской геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ), **Калмыков Георгий Александрович**, заместитель директора института перспективных исследований нефти и газа

кандидат геолого-минералогических наук (04.00.04), доцент, **Милосердова Людмила Вадимовна**, доцент кафедры поисков и разведки нефти и газа Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина

Ведущая организация: ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

Защита состоится «28» октября 2026 г. в 15 часов 00 мин. на заседании постоянно действующего диссертационного совета ПДС 2022.014 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д.3., ауд. 208.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре (Научной библиотеке) при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Объявление о защите размещено на сайтах ВАК и РУДН:
<https://vak.minobrnauki.gov.ru>, <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета ПДС 2022.014
 кандидат технических наук

Я.А. Тчаро

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время разработка месторождений с низкопроницаемыми коллекторами становится все более актуальной задачей нефтегазовой отрасли. Традиционные подходы к оценке и разработке таких месторождений часто оказываются неэффективными из-за специфических свойств низкопроницаемых пород, требующих применения специализированных методов и технологий.

Выработка наиболее проницаемых залежей нефти и газа вынуждает добывающие компании исследовать и вовлекать в разработку все менее проницаемые объекты. Последнее сопряжено с рядом технических сложностей. В частности, изучение низкопроницаемых залежей, осложняется тем, что большинство практикуемых в РФ методик исследования керна были разработаны и валидированы на терригенных верхнемеловых отложениях Западной Сибири. Данные методики не учитывают специфики низкопроницаемых отложений и, зачастую, приводят к получению неоднозначных и недостоверным результатам.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы петрофизического изучения низкопроницаемых коллекторов освещены в трудах ряда отечественных (Г.И. Теодорович, А.И. Конюхов, Н.В. Дёмин и др.) и зарубежных (Брэйс, Леверет, Джонсон, Хагурт и др.) исследователей, однако степень их разработанности остается недостаточной. Основной массив стандартизованных методик (в частности, ОСТ 39-204-86, ГОСТ 26450.1–85 и др.) разработан для высокопроницаемых терригенных пород и не учитывает специфику низкопроницаемых пород. Для сланцевых и низкопроницаемых пород традиционные стационарные методы газопроницаемости неприменимы. Применяемые нестационарные методы (Pulse Decay, Pseudo Steady State) не унифицированы, а процедуры пробоподготовки не стандартизированы, что увеличивает риск техногенных микротрещин и снижает воспроизводимость результатов. Комплексные литолого-петрофизические модели, интегрирующие данные томографии, ЯМР, ртутной порометрии и минералогического картирования, для сложных коллекторов практически отсутствуют.

Несмотря на значительное число публикаций, системные методические решения для повышения точности определения коллекторских свойств низкопроницаемых пород до настоящего времени не разработаны, что обосновывает актуальность работы.

Объект исследования: коллекторские свойства низкопроницаемых пород нефтегазоносных пластов.

Предмет исследования: методологические подходы, петрофизические зависимости, лабораторные и геофизические методы, направленные на минимизацию погрешностей при определении пористости, проницаемости и водонасыщенности.

Цель и задачи диссертационного исследования

Целью работы является повышение точности определения коллекторских свойств низкопроницаемых пород.

Для достижения вышеуказанной цели в рамках диссертационного исследования были поставлены следующие задачи:

- Анализ существующих методик исследований низкопроницаемых пород.
- Повышение точности проведения петрофизических экспериментов по центрифугированию.
- Повышение точности оценки высоты капиллярного поднятия воды над уровнем свободной воды при помощи применения комбинированной методики интерпретации результатов центрифугирования.
- Повышение достоверности моделирования строения переходной зоны в диапазоне проницаемостей $(0.01-1) \cdot 10^{-3}$ мкм² при помощи улучшенной методики построения капиллярных петрофизических моделей.

Научная новизна

- Предложена улучшенная методика построения капиллярных петрофизических моделей.
- Комбинированная методика интерпретации результатов центрифугирования адаптирована под низкопроницаемые породы.
- Дополнена классификация воды пустотного пространства, введено понятие сложноподвижной воды.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что полученные результаты могут использоваться для:

- Уточнения и расширения существующих методов работ с коллекторами нефти и газа.
- Создания новой классификации вод в поровом пространстве.

- Создания базы для будущих научных изысканий в области исследования ФЕС низкопроницаемых пород.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что полученные результаты могут использоваться для:

- Повышения достоверности лабораторных исследований за счет учета специфики низкопроницаемых пород.
- Учёта растворения солей на всех этапах: от отбора проб до лабораторных экспериментов.
- Оптимизации выбора методов интенсификации добычи (гидроразрыв пласта, кислотные обработки) на основе более точных данных о свойствах коллектора;
- Снижения риска при оценке извлекаемых запасов и проектировании систем разработки.

Методология исследований

В основу работы положены результаты личных исследований автора, полученные при проведении экспериментов на образцах горных пород, нефти и пластовых водах в лаборатории центра науки и технологий добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий. Общая методологическая концепция работы представляет собой комплексный экспериментально-аналитический подход, сочетающий лабораторное моделирование пластовых условий, петрофизические измерения, современные методы цифровой визуализации порового пространства и математическое моделирование капиллярных процессов. Методологическая стратегия предполагала последовательное решение задач: от совершенствования пробоподготовки и метрологического обеспечения экспериментов до разработки интерпретационных алгоритмов, адаптированных для низкопроницаемых пород различного генезиса (терригенные ачимовские отложения, карбонатные засоленные породы Восточной Сибири, низкопроницаемые отложения баженовской и доманиковой свит). Для решения поставленных задач были использованы методы, включавшие:

- Определение проницаемости горных пород при помощи стационарных и не стационарных методов фильтрации газа (порозиметр ПИК-ПП, Darcy Press).
- Определение пористости образцов керна на порозиметре ПИК-ПП, на сланцевом матричном пермеатре SMP-200, методом Преображенского, с использованием ЯМР и CT-scan.

- Определение остаточной водонасыщенности и построение кривых капиллярного давления на более, чем 100 образцах керна диаметром от 25 до 38 мм на ультрацентрифуге RC-4500, полупроницаемой мембране, методом самопроизвольной пропитки.

- Получение на центрифуге кривых капиллярного давления в различных термобарических условиях (температуры от 0 °С до 90 °С и обжимом до 30 МПа).

- Определение удельных электрических сопротивлений по двухконтактной методике.

- Ряд других рутинных и специальных методов исследований.

Были систематизированы, обработаны и обобщены более 100 научных статей и различные фондовые данные, в том числе и с керновым описанием.

Физические объёмы исследований

- Была произведена пробоподготовка (выбуривание, торцевание, экстракция, сушка, насыщение) 1 560 образцов.

- На порозиметре-пермеамetre ПИК-ПП мною определены пористость и проницаемость на 847 образцах керна диаметром 30 мм и 254 образцах диаметром 38 мм.

- Методом жидкостенасыщения определение пористости – 316 образцов.

- На порозиметре Darcy Press проницаемость – 348 измерений.

- Удельное электрическое сопротивление определено по двухконтактной методике – выполнено 840 измерений.

- На групповом капилляриметре было - 186 образцов.

- Центрифугирование на ультрацентрифуге RC-4500 было выполнено на 1 014 образцах.

Защищаемые положения

1. Повышена достоверность определения неснижаемой водонасыщенности в залежи на основании разработанной методики построения литолого-петрофизической модели сложных коллекторов, актуализирована типизация вод в поровом пространстве.

2. Установлена дифференциация определяемой неснижаемой водонасыщенности пород благодаря экспериментально обоснованной методике пересчёта за растворение солей во время лабораторных экспериментов, повышающая достоверность получаемых петрофизических данных при работе с образцами, насыщенными водой с минерализацией более 300 г/л.

3. Повышена достоверность определения коллекторских свойств пород с проницаемостью в диапазоне $(0.001 - 1) \cdot 10^{-3}$ мкм² на основании предлагаемых методик пробоподготовки с созданием дополнительного обжима эпоксидной смолой и предварительного тестирования образцов для распределения по типам экспериментов, уменьшающего общее время эксперимента для каждого образца на срок до 120 минут.

Достоверность и личный вклад

В лаборатории центра науки и технологий добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий автором были выполнены серии экспериментов на ультрацентрифуге, порозиметре, капилляриметре, прессе Дарси и ЯМР релаксометре. Также были спланированы, организованы и обработаны данные экспериментов по томографии, ртутной порометрии. За время написания диссертации в работе было более 200 образцов, однако наиболее ценные, редкие и кондиционные образцы низкопроницаемых отложений использовались повторно, так как их было около 40–50 штук, а производство кондиционного образца зачастую связано с большими рисками разрушения породы. Образцы экстрагировались, высушивались и заново насыщались. Производился контроль смачиваемости, пористости, проницаемости и внутреннего строения для достижения повторяемости результатов. При необходимости проводилось искусственное старение кернов. Автором были систематизированы, обработаны и обобщены более 100 научных статей и различные фондовые данные, в том числе и с кернавым описанием.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Международная конференция SPE ADIPEC 2024, Абу-Даби, ОАЭ, 2024 год.
- BalticPetroModel-2024 VIII Балтийская научно-практическая конференция «Петрофизическое моделирование осадочных пород», 2024 год.
- Конференция «Санкт-Петербург 2024. Геонауки: современные вызовы и пути решений».
- Наука о сланцах 2023. Новый опыт. 4-й специализированный научно-практический семинар. Москва, 2023.

- Геомодель 2023. 25-я юбилейная научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 04–07 сентября 2023 года.

- Геосочи-2023. актуальные проблемы геологии и геофизики; международная научно-практическая конференция, 2023 год.

- BalticPetroModel-2022. VI Балтийская научно-практическая конференция. ООО «ГеоЕвразия» — Петергоф 4-6 сентября 2022.

Методики были апробированы и на их основе сформированы и дополнены КОСТы, используемые в центре науки и технологий добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в МБЦ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести основных глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 157 страницы, включая 27 таблиц и 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ существующих методик лабораторных исследований

В первой главе диссертации, посвящённой анализу существующих методик центрифугирования, рассматриваются современные методики центрифугирования для изучения остаточной водонасыщенности и построения кривых капиллярного давления в пористых породах. Устаревшие стандарты (например, ОСТ 39-204-86) не подходят для современных исследований, особенно для низкопроницаемых образцов и образцов из нетрадиционных коллекторов.

Основные методики:

- Модифицированный Hassler-Brunner – основана на центробежной силе и требует точного контроля температуры и объема жидкости.

- Ультрацентрифугирование – применяется для образцов с низкой проницаемостью при высоких скоростях (до 20 000 об/мин).

- Интеграция с ЯМР и микро-КТ – позволяет получать детальные 3D-модели распределения фаз в порах.

- Специальные методики для глинистых пород – включают низкоскоростное центрифугирование и химическую стабилизацию.

Автор отмечает, что современные технологии (автоматизация, ИИ, томография) значительно улучшили точность исследований, но отсутствие единых стандартов затрудняет сравнение данных между лабораториями. Необходимо разработать актуальные стандарты, объединяющие передовые методики центрифугирования и цифровые технологии.

Глава 2. Теоретические основы капиллярных процессов нефтяных залежей

Во второй главе диссертации, посвященной теоретическим основам капиллярных процессов в нефтяных залежах, рассматривалась общая информация о капиллярных процессах. Рассматривались вопросы структуры порового пространства горных пород и роли капиллярных сил в распределении флюидов.

Пространства пустот в горных породах – это участки, не занятые твердыми компонентами, и которые могут быть заполнены жидкостями или газами. В природных условиях пустоты часто содержат флюиды. Существует несколько видов пустот, среди которых выделяют поры, трещины и каверны. Капиллярные силы играют важную роль в распределении флюидов в поровом пространстве коллекторов нефти и газа. Они определяют высоту капиллярного поднятия воды над уровнем свободной воды (УСВ), форму кривых капиллярного давления и величину остаточной водонасыщенности. На величину капиллярного давления влияют поверхностное натяжение на границе раздела фаз, смачиваемость породы и радиус пор. В низкопроницаемых породах с малым размером пор капиллярные силы преобладают над силами гравитации, что приводит к высоким значениям капиллярного давления и остаточной водонасыщенности.

В главе также детально рассматривались факторы, влияющие на капиллярные явления, такие как поверхностное натяжение, угол смачивания, радиус пор и термодинамические условия. Приводился анализ различных моделей капиллярного давления и их применимости для различных типов коллекторов. Подчеркивалась важность учета капиллярных эффектов при моделировании процессов вытеснения нефти водой и прогнозировании нефтеотдачи пластов.

- Капиллярные силы играют ключевую роль в формировании зон водонасыщенности и нефтенасыщенности в пористой среде.

- Анализ теоретических основ капиллярных явлений позволяет лучше понимать процессы, происходящие в пласте, и разрабатывать более эффективные методы разработки месторождений.

- Для корректного моделирования капиллярных процессов необходимо учитывать широкий спектр факторов, таких как литология, петрофизические свойства пород, свойства флюидов и термодинамические условия.

Глава 3. Методика построения литолого-петрофизической модели порового пространства с целью изучения водной составляющей при помощи порометрических методов и математического моделирования

В третьей главе диссертации была представлена разработанная автором методика построения литолого-петрофизической модели порового пространства с целью изучения водной составляющей при помощи порометрических методов и математического моделирования. Данная методика была разработана для сложных коллекторов ачимовских отложений с целью изучения водонасыщенности. Использованы порометрические методы и математическое моделирование. Подход позволил повысить точность определения неснижаемой водонасыщенности до 20 %.

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Комплексные лабораторные исследования керна: отбор представительной коллекции образцов керна и выполнение комплекса литолого-петрофизических исследований, включающих определение ФЕС, исследование шлифов, микрофотографию, ЯМР, РСА, РФА, FIB-SEM, минеральное картирование, ионообменный комплекс, удельную поверхность, смачиваемость, пиролиз, хромато-масс – спектрометрию, ртутную порометрию, центрифугирование с послойной ЯМР-спектрометрией и УЭС.
2. Анализ и интерпретация данных: обработка и анализ полученных данных с целью выявления основных литолого-петрофизических факторов, влияющих на распределение воды в поровом пространстве.
3. Построение литолого-петрофизической модели: Создание трехмерной модели порового пространства, учитывающей литологию, минералогию, структуру порового пространства и распределение флюидов (таблица 1).
4. Математическое моделирование: Использование математических методов для моделирования капиллярных процессов и определения водонасыщенности в различных условиях.

Таблица 1 – Результаты оценки доли капиллярно - неподвижной воды

Обр. №	Кпо (N2), д.ед.	Кпрг (N2), 10 ⁻³ мкм ²	Квн, д.ед.	Квн', д.ед.	Кв(кн)'
x1	0,114	0,071	0,655	0,435	0,220
x2	0,117	0,033	0,735	0,560	0,175
Кпо(N2) – открытая пористость по азоту; Кпрг (N2) – газопроницаемость по азоту; Квн – неснижаемая водонасыщенность определённая методом центрифугирования; Квн' - оценочное значение доли неподвижной воды в поровом пространстве; Кв(кн)' – оценочное значение доли капиллярно-неподвижной воды;					

Преимущества методики:

- Учет всего комплекса геолого-физических параметров.
- Повышение точности определения неснижаемой водонасыщенности.
- Возможность прогнозирования поведения залежи при разработке.

Применимость методики:

- Сложные коллекторы ачимовских отложений.
- Низкопроницаемые коллекторы.
- Коллекторы с высокой глинистостью.

В главе детально описывались все этапы построения модели, начиная от отбора представительной коллекции образцов керна и заканчивая математическим моделированием капиллярных процессов. Приводились примеры применения методики для различных типов коллекторов и давались рекомендации по выбору оптимальных параметров моделирования.

Разработанная методика позволяет создавать детальные литолого-петрофизические модели порового пространства, учитывающие широкий спектр геолого-физических параметров.

Применение методики позволяет повысить точность определения неснижаемой водонасыщенности, что особенно важно для оценки запасов и прогнозирования поведения залежей с низкопроницаемыми коллекторами.

Предложенная методика может быть успешно использована для решения задач, связанных с моделированием капиллярных процессов и прогнозированием нефтеотдачи пластов.

Глава 4. Методика повышение точности получаемых центрифугических данных для карбонатных пород Восточной Сибири

В четвёртой главе диссертации рассматривались вопросы повышения точности получаемых центрифугических данных для карбонатных пород Восточной Сибири. В данной главе представлена разработанная мной методика, повышающая точность получаемых центрифугических данных на величину от долей процента до десятков процентов. Достигнуто это за счёт модернизации метода определений поправок за деформацию кернодержателей ультрацентрифуг (рисунок 1), увеличенного времени центрифугирования на максимальных оборотах для введения в систему дренирования микропористости (рисунок 2) и создания метода пересчёта за растворение солей в образце.

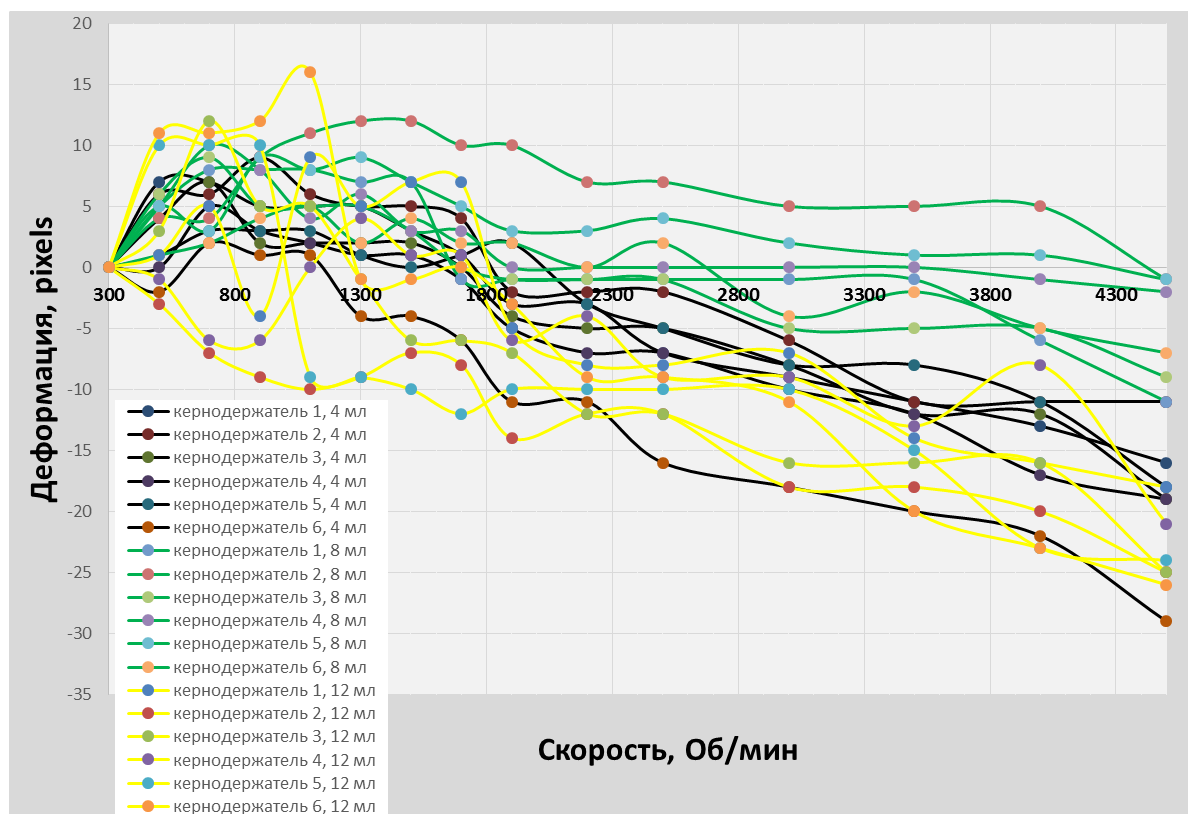


Рисунок 1 – Поправки за деформацию для кернодержателей с наполненностью флюидом мерного стакана на 30, 60 и 90 % от максимума

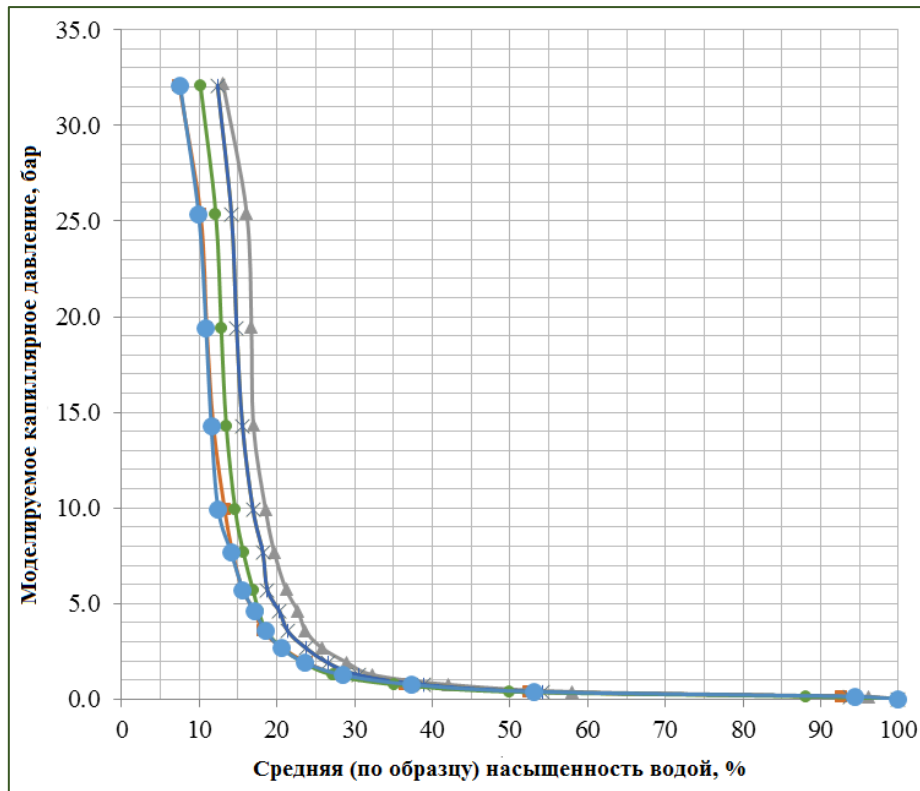


Рисунок 2 – Кривые капиллярного давления для 6 образцов карбонатного керна Восточной Сибири со средним $K_p = 11,2 \%$, $K_{пр} = 0,8$ мД с удлинённым временем центрифугирования на последней скорости

Описание методики:

1. Модернизация методики определений поправок за деформацию кернадержателей ультрацентрифуг: учет деформации кернадержателей при высоких скоростях вращения позволяет более точно определить объем вытесненной жидкости.
2. Увеличенное время центрифугирования на максимальных оборотах: длительное центрифугирование обеспечивает достижение равновесного состояния и более полное дренирование микропор.
3. Создание методики пересчёта за растворение солей в образце: учет растворения солей при контакте с моделью пластовой воды позволяет избежать ошибок при определении пористости и водонасыщенности. В методике проводится пересчёт значений водонасыщенности с учётом нового порового объёма. Порода изучается в четырёх состояниях: состояние 1 – пластовое (естественное) состояние, состояние 2 – после подъёма керна на поверхность и высыхания поровой воды, 3 состояние – после насыщения моделью пластовой воды, 4 состояние – после высушивания.

Необходимо рассчитать кажущуюся пористость в состоянии 3:

$$K_{\text{пок(в с3)}} = \frac{M_{3(c3)} - M_{1(c2)}}{M_{3(c3)} - M_{2(c3)}} = \frac{M_{3(c2)} + \Delta M_{(c2-c3)} - M_{1(c2)}}{M_{3(c2)} + \Delta M_{(c2-c3)} - M_{2(c2)} + \Delta M_{(c2-c3)}} = \frac{M_{3(c2)} + \Delta M_{(c2-c3)} - M_{1(c2)}}{M_{3(c2)} - M_{2(c2)}}, \quad (1)$$

$$\Delta M_{(c2-c3)} = V_{c(c2-c3)} \cdot (\delta_B - \delta_C), \quad (2)$$

где ΔM – это разница масс в 2 состояниях,

δ_B – плотность воды, г/см³

δ_C – плотность солей, г/см³

с2 – состояние 2,

с3 – состояние 3.

Расчёт коэффициента пористости с учётом кажущейся пористости в состоянии 3 позволит определить изменения в породе после измерений:

$$K_{\text{по(р с3)}} = K_{\text{по(He с2)}} + \frac{(K_{\text{пок(в с3)}} - K_{\text{по(He с2)}}) \cdot (M_{3(c3)} - M_{2(c3)})}{(\delta_B - \delta_C)} \cdot \frac{1}{V_{\text{обр}}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{по(р с3)}}$ – расчётный коэффициент пористости в состоянии 3,

$V_{\text{обр}}$ – объём образца, см³

$K_{\text{по(He с2)}}$ – коэффициент пористости, определённый по гелию в состоянии образца 2

Значение коэффициента пористости в состоянии 3 позволяет рассчитать объёмную плотность в состоянии 3:

$$\delta_{\text{п(р с3)}} = \delta_{\text{п(He с2)}} - (K_{\text{по(р с3)}} - K_{\text{по(He с2)}}) \cdot \delta_C, \quad (4)$$

И кажущуюся минералогическую плотность в состоянии 3:

$$\delta_{\text{кмп(р с3)}} = \frac{M_{1(c2)} - V_{\text{обр}} \cdot (K_{\text{по(р с3)}} - K_{\text{по(He с2)}}) \cdot \delta_C}{V_{\text{обр}} \cdot (1 - K_{\text{по(р с3)}})}, \quad (5)$$

В методе присутствуют 2 допущения: предполагается только внутреннее растворение солей и раствор солей не вызывает изменения плотности воды.

Результаты применения методики:

- Повышение точности определения кривых капиллярного давления.
- Более достоверная оценка остаточной водонасыщенности.
- Улучшение качества моделирования процессов вытеснения нефти водой.

Применимость методики:

- Карбонатные коллекторы.
- Засолоненные породы.
- Низкопроницаемые коллекторы.
- Коллекторы с микропористостью.

Эксперименты проводились на экспериментальной коллекции (62 образца, открытая пористость 0.109–0.262 д.ед, газопроницаемость $(0.25\text{--}1672) \cdot 10^{-3}$ мкм²), отобранной из трещинно-кавернозных карбонатных пластов одного из месторождений Восточной Сибири. Образцы содержали водорастворимые соли природного происхождения. Насыщение образцов выполнялось моделью пластовой воды с общей минерализацией 519 г/л.

В главе подробно описывались все этапы модернизации центрифугических исследований, а также приводились результаты сравнительного анализа точности получаемых данных с использованием традиционных и модернизированных методов (рисунок 3).



Рисунок 3 – Результаты подсчёта кажущейся минералогической плотности

Особое внимание уделялось учету влияния растворения солей на результаты центрифугирования (рисунок 4).

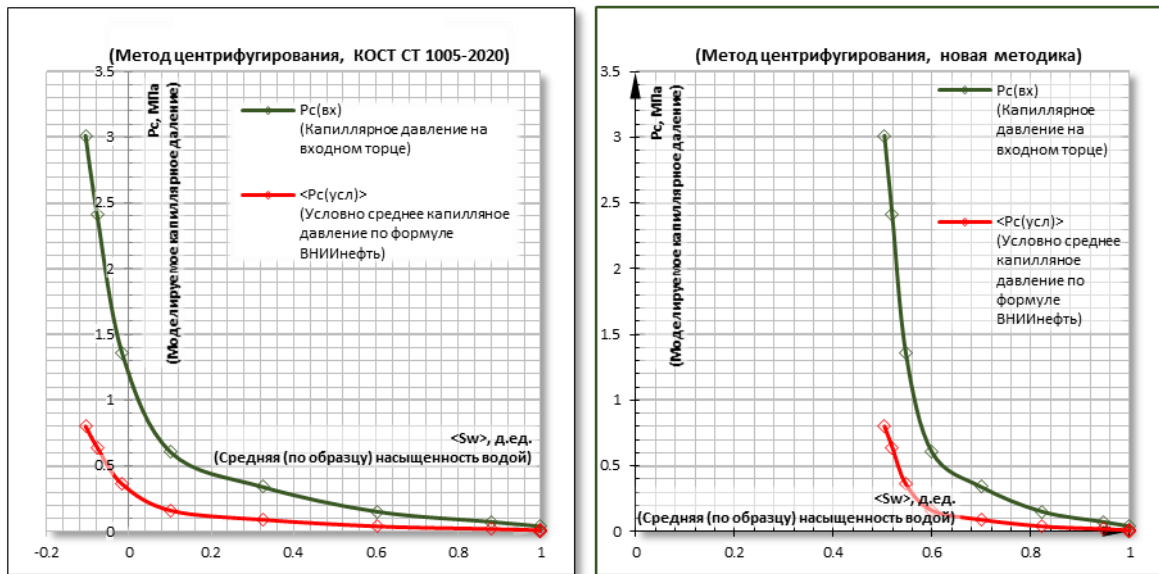


Рисунок 4 – Результаты измерений капиллярных характеристик сильно засоленного образца по стандартной (КОСТ СТ 1005 -2020) и новой методике

Модернизация центрифугических исследований позволяет существенно повысить точность определения капиллярных свойств карбонатных пород.

Учет деформации кернодержателей, увеличение времени центрифугирования и коррекция на растворение солей являются важными факторами для получения достоверных результатов.

Разработанная методика может быть рекомендована для использования при исследовании карбонатных коллекторов, содержащих водорастворимые соли.

Глава 5. Методические советы по комбинированию лабораторных методов для повышения точности исследований отложений ачимовской свиты

В пятой главе диссертации рассматривались вопросы комбинирования лабораторных методов для повышения точности исследований отложений ачимовской свиты. При изучении отложений ачимовской свиты комбинировались различные методы для достижения максимальной точности.

Комплексное исследование, включающее:

1. Изучение современных гидрогеологических классификаций поровых вод: анализ различных форм воды в поровом пространстве и их влияния на фильтрационные свойства коллектора.
2. Комплексное изучение физико-химических свойств ачимовских отложений: детальное исследование литологического состава, минералогии, структуры порового пространства, смачиваемости и других параметров.

3. Построение литолого-петрофизической модели: создание трехмерной модели, учитывающей все полученные данные и позволяющей прогнозировать поведение залежи при разработке.

Используемые методы:

Литолого-петрофизические исследования (ФЕС, исследования шлифов, микротомография, ЯМР, РСА, РФА, FIB-SEM, минеральное картирование, ионообменный комплекс, удельная поверхность, смачиваемость, пиролиз, хромато-масс – спектрометрия, ртутная порометрия, центрифугирование с послойной ЯМР-спектрометрией и УЭС).

Результаты применения подхода:

- Более точная оценка остаточной водонасыщенности.
- Выявление причин подвижности остаточной воды.
- Повышение эффективности разработки ачимовских отложений.

Изучены современные гидрогеологические классификации поровых вод.

Выбран объект ачимовской толщи для комплексного изучения.

На представительной коллекции образцов выполнены комплексные литолого-петрофизические исследования

Результаты комплексного анализа полученных данных показали, что подавляющий объем межзерновых пор в изученном объекте имеет диаметр горловин в диапазоне 0,02-0,52 мкм, вследствие чего обладают высоким капиллярным давлением (0,27 МПа и выше). Межзерновые поры заняты преимущественно капиллярно – подвижной водой. Данная вода образует при незначительном увеличении водонасыщенности с приложением определенного градиента давления становится подвижной. При выполнении стандартных экспериментов методом центрифугирования данная вода остается в образце и принимается за остаточную. Основные причины невыхода данной воды при центрифугировании - высокое капиллярное давление и появление разрывов сплошности данного типа воды (рисунок 5), что было подтверждено результатами послойной ЯМР – спектроскопии. При доле межзерновых пор более 24% в поровом пространстве появляется капиллярно-легкоподвижная вода, которая достаточно легко фильтруется при наличии градиента давления.

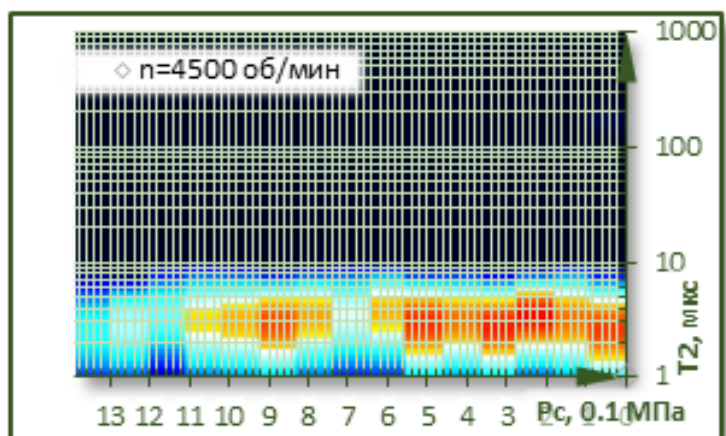


Рисунок 5 – Локальные разрывы сплошности водной фазы при центрифугировании на максимальной скорости

В главе приводились результаты исследований влияния различных факторов на фильтрационные свойства ачимовских отложений, таких как глинистость, минералогический состав и структура порового пространства. Детально описывались особенности применения различных лабораторных методов для изучения этих отложений, а также давались рекомендации по выбору оптимальных методов и методик исследований.

Комплексный подход, основанный на комбинировании различных лабораторных методов, позволяет получить наиболее полную и достоверную информацию о фильтрационно-емкостных свойствах ачимовских отложений (рисунок 6).

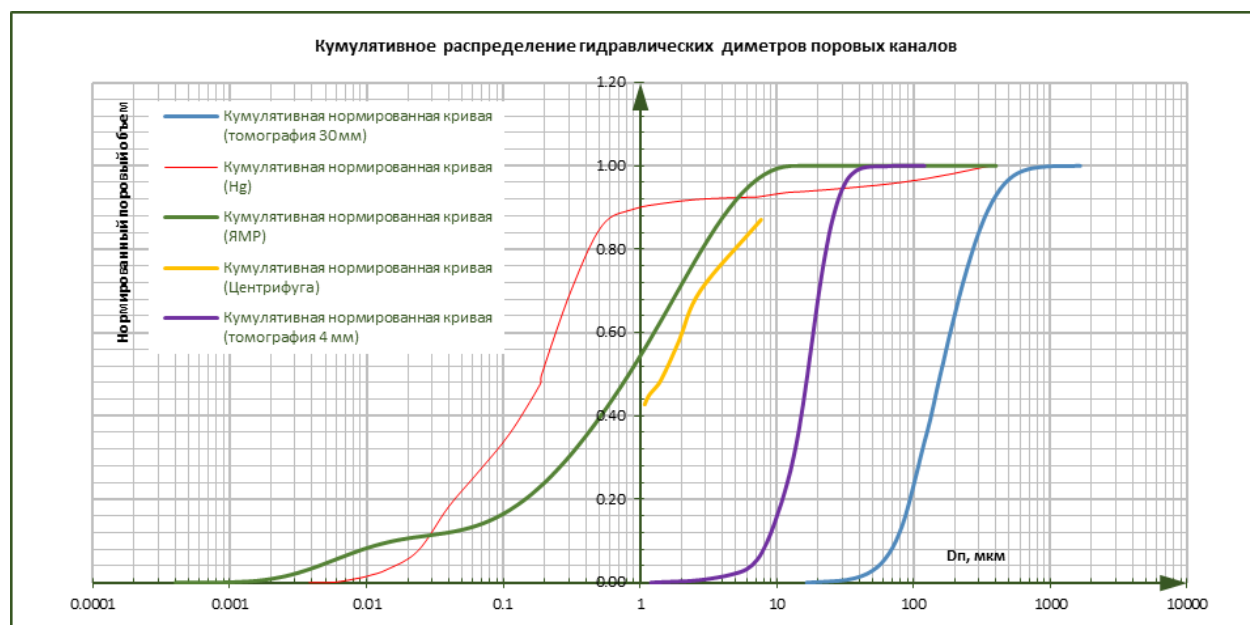


Рисунок 6 – Сопоставление распределений диаметров поровых каналов, полученных по результатам ртутной порометрии и других методов

Изучение гидрогеологических классификаций поровых вод и физико-химических свойств отложений позволяет выявлять причины подвижности остаточной воды и разрабатывать эффективные методы повышения нефтеотдачи.

Полученные результаты могут быть использованы для построения более точных геолого-гидродинамических моделей ачимовских залежей и оптимизации процессов их разработки.

Глава 6. Методики повышения достоверности определения коллекторских свойств пород с проницаемостью в диапазоне $(0.001 - 1) \cdot 10^{-3}$ мкм²

В шестой главе была представлена разработанная методика исследования фильтрационно-емкостных характеристик сланцевых отложений до и после воздействия методов увеличения нефтеотдачи (МУН).

Сланцевые породы обладают аномально низкой проницаемостью, которая, как правило, на несколько порядков ниже, чем в традиционных коллекторах. В связи с этим методы измерения проницаемости сланцевых пород существенно отличаются от стандартных методик. В данном случае была применена специальная методика проницаемости сланцевых пород, разработанная для сланцевого пермеаметра Darcy Press.

В данной методике применен ряд специальных технических решений:

1. Для измерения используются тонкие образцы (толщина 3-6 мм), т.к. время установления фильтрации в сланцевых образцах стандартного размера весьма длительно.
2. При измерении, к образцам прикладываются высокие перепады давления 0.1-1 МПа, т.к. поток газа через образец очень мал.
3. Измерения выполняются на нестационарных и псевдостационарных режимах (Pulse Decay, Pseudo Steady State, Build Up), т.к. установление стационарного режима фильтрации в таких породах крайне длительно.
4. Для герметизации боковой поверхности образца вместо обжима эластичной манжетой используется эпоксидная заливка, т.к. просачивание газа между манжетой и образцом часто превышает поток газа через образец.
5. Для измерений из одного куска керна вырезаются несколько вторичных образцов – дублеров из-за высокого риска попадания в техногенные микротрещины, образующиеся при подъёме и обработке керна.

6. Для минимизации риска образования новых микротрещин камнерезная обработка образцов выполняется на прецизионных станках без использования СОЖ, либо щадящими СОЖ (этиловый спирт и др.).

7. Измерение одного образца происходит в течении 0.5 - 4 часов из-за крайне малого потока газа.

Описание методики:

1. Совершенствование пробоподготовки образцов: Минимизация образования трещин при отборе и подготовке образцов (рисунок 7).

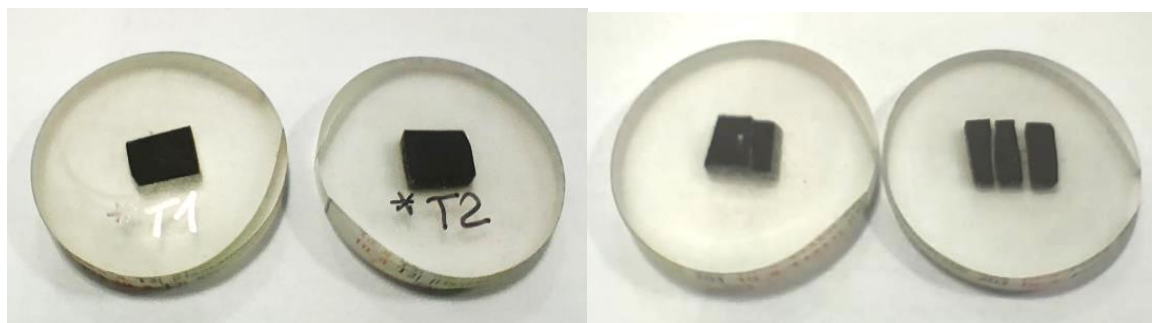


Рисунок 7 – Образцы, подготовленные для исследования на установке Darcy Press

2. Предварительное тестирование образцов: Выявление дефектных образцов с микротрещинами и другими нарушениями структуры (рисунок 8).

3. Учет влияния газового эффекта и эффекта скольжения: Корректное определение газопроницаемости с учетом особенностей фильтрации газа в сланцах.

4. Исследование ФЕС до и после воздействия МУН: Оценка изменения пористости, проницаемости и других параметров под влиянием различных методов воздействия.

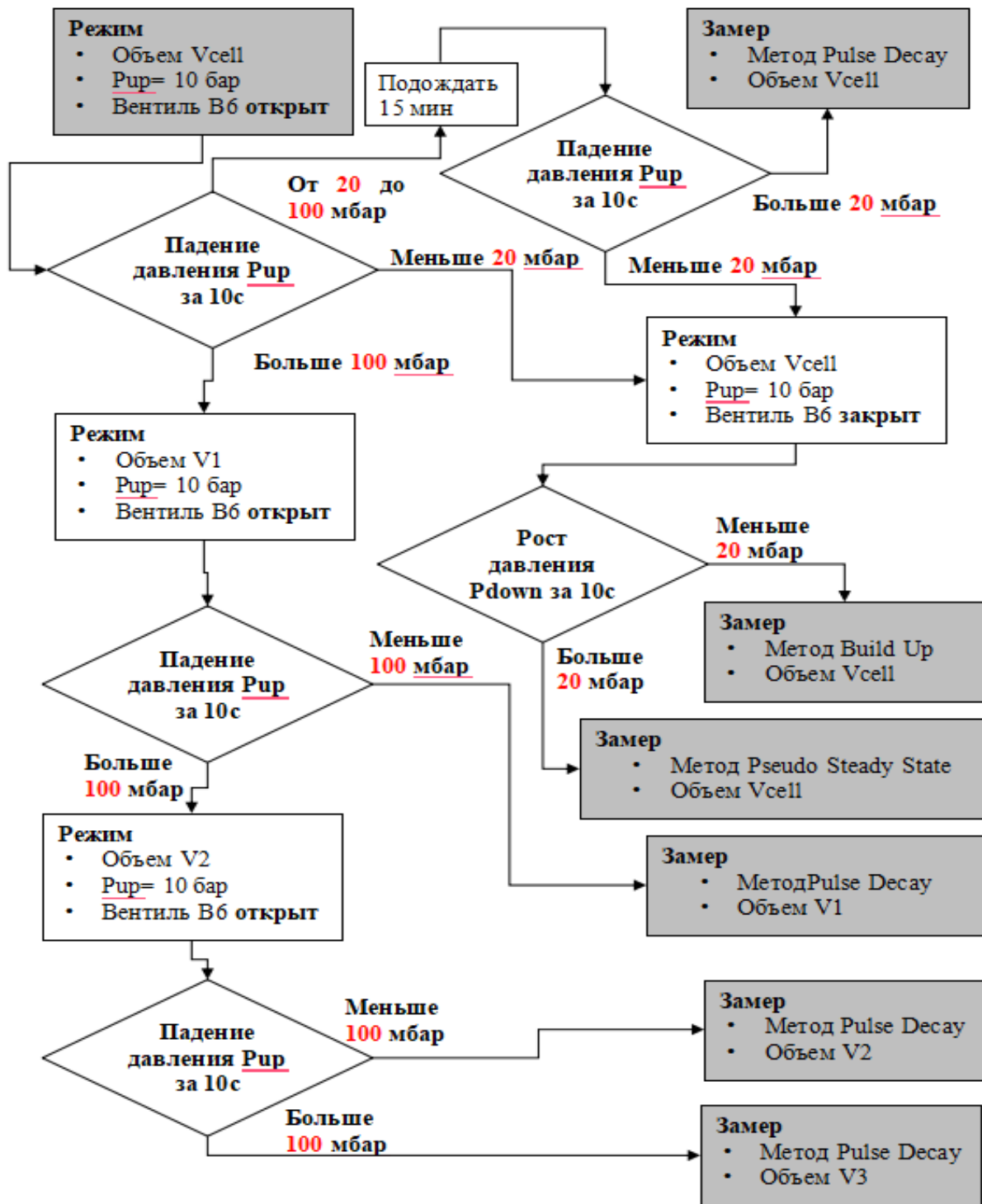


Рисунок 8 – Алгоритм выбора режима измерений для установки Darcy Press

На представительных коллекциях образцов баженовских и доманиковых отложений была выполнена серия экспериментов. Выявлены основные источники погрешностей; усовершенствована процедура пробоподготовки образцов; разработаны рекомендации по снижению погрешностей; разработана методика предварительного

тестирования образцов; разработана методика измерений; разработаны процедурные инструкции по каждому виду работ.

Методы исследований:

Определение газопроницаемости на сланцевом пермеамetre DarcyPress.

В результате выполненных работ было установлено, что основной причиной появления некондиционных образцов является появление микротрещин при камнерезной обработке. Основными источниками неопределенностей при выполнении измерений являются: техническое состояние образца; микроскопические утечки в измерительной системе; колебания температуры окружающей среды; длительный выход на режим фильтрации. Разработанные нормативные документы по выполнению пробоподготовки и измерений позволили достичь следующих показателей: в диапазоне измерений $(10^{-6} - 10^{-2}) \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ снижена расширенная неопределенность измерений общей газопроницаемости до 28 %; при пробоподготовке снижена доля выхода некондиционных образцов до 35 %.

Ожидаемые результаты:

- Повышение эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи (МУН) в сланцевых коллекторах.
- Снижение рисков, связанных с воздействием на пласт.
- Более точный прогноз добычи нефти из сланцевых залежей.

В главе детально рассматривались вопросы влияния различных методов увеличения нефтеотдачи на фильтрационно-емкостные свойства сланцевых отложений. Приводились результаты исследований влияния термических, химических и механических методов воздействия на структуру порового пространства и проницаемость сланцев. Давались рекомендации по выбору оптимальных методов увеличения нефтеотдачи для различных типов сланцевых коллекторов.

Разработанная методика позволяет более точно определять фильтрационно-емкостные свойства сланцевых отложений и оценивать эффективность различных методов увеличения нефтеотдачи.

Совершенствование пробоподготовки образцов и учет влияния газового эффекта и эффекта скольжения позволяют снизить погрешность измерений и получить более достоверные результаты.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов разработки сланцевых залежей и повышения их рентабельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в диссертационной работе решена актуальная научная и практическая задача повышения точности определения коллекторских свойств низкопроницаемых пород.

Разработанные методики и модели позволяют более достоверно оценивать запасы нефти и газа в низкопроницаемых коллекторах и повышать эффективность их разработки.

Полученные результаты могут быть использованы в практике геологических и петрофизических исследований, а также при моделировании процессов разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами.

Для дальнейшего совершенствования методов изучения низкопроницаемых коллекторов необходимо:

- развитие цифрового моделирования порового пространства на основе данных микроскопических исследований;
- разработка новых критериев интерпретации лабораторных данных с учетом влияния пластовых условий;
- создание специализированных стандартов для исследования керна низкопроницаемых отложений.

Переход к разработке низкопроницаемых коллекторов требует глубокого пересмотра существующих подходов к исследованию керна. Предложенные мною методические решения позволяют минимизировать ошибки при оценке ФЕС и повысить эффективность геолого-технических мероприятий. Их внедрение в практику нефтегазовых компаний будет способствовать успешному освоению трудноизвлекаемых запасов, обеспечивая устойчивость добычи в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, индексируемых в МЦБ (Scopus, Web of Science):

1. Mohamed, S. Efara. Best Practices for Designing High-Speed Centrifuge Capillary Pressure Experiments / S. Efara Mohamed, Strahinja Markovic, Anton Ryabukhin, Emad W. Al-Shalabi, Waleed Alameri // OnePetro; ADIPEC. - Abu Dhabi, UAE, 2024.
2. Shvalyuk, E. New rock typing method for diagenetically modified carbonate reservoirs / E. Shvalyuk, A. Tchistiakov, N. Bah, A. Mukhametdinova, A. Ryabukhin // Georesursy = Georesources, 25(4). – 2023. - pp. 203–218.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Борисов, А.Г. Определение емкостных и плотностных свойств карбонатных отложений, содержащих водорастворимые соли / Борисов А.Г., А. Д. Рябухин, Е.А. Никитина, В.А. Баишев // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Карбонатные отложения 2024» – Казань, 2024.
4. Рябухин, А. Д. О влиянии термобарических факторов на остаточную водонасыщенность горных пород / А.Д. Рябухин // Наука и техника в газовой промышленности №1, 2023. - 7с.

В материалах конференций:

5. Изучение структуры каналов течения флюидов низкопроницаемых пород (на примере ачимовских отложений) / Рябухин А. Д., Мухаметдинова А. З., Богданович Н. Н. // Санкт-Петербург 2024. Геонауки: современные вызовы и пути решений Санкт-Петербург, 08–11 апреля 2024 года
6. Изучение капиллярных характеристик отложений, содержащих водорастворимые соли / Борисов А. Г., Рябухин А. Д., Никитина Е. А., Баишев В.А. // Российская отраслевая энергетическая конференция (РОЭК) 2024 Сборник материалов конференции. Москва, 2024
7. Изучение взаимосвязей проницаемости и смачиваемости отложений баженовской свиты с содержанием породообразующих минералов / Борисов А.Г., Козлова Е.В., Рябухин А. Д., Маркович С., Фомичев Е.В., Казаков А.Д., Гаврилов А.Е. // ГЕОМОДЕЛЬ 2023.Сборник материалов 25-й юбилейной научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Москва, 2023
8. Методический подход к оценке изменения проницаемости сланцевых пород при применении методов увеличения отдачи / Борисов А.Г., Мухина Е.Д., Субботина М.В., Рябухин А. Д., Казаков А.Д. // Наука о сланцах '23. Новый опыт Сборник материалов 4-го специализированного научно-практического семинара. Москва, 2023
9. Методические особенности учёта влияния технологических факторов на результаты измерений остаточной водонасыщенности при использовании центрифуги с устройством видеофиксации / Борисов А.Г., Рябухин А. Д. // Balticpetromodel-2022. Петрофизическое моделирование осадочных пород

труды VI Балтийской научно-практической конференции. ООО «ГеоЕвразия». Тверь, 2022

10. Методические особенности измерения сверхнизкой проницаемости горных пород / Борисов А. Г., Рябухин А. Д., Денисенко Ф. Ю., Субботина М. В. // Balticpetromodel-2022. Петрофизическое моделирование осадочных пород труды VI Балтийской научно-практической конференции. ООО «ГеоЕвразия». Тверь, 2022

11. Определение емкостных и плотностных свойств карбонатных отложений, содержащих водорастворимые соли / Борисов А. Г., Рябухин А. Д., Никитина Е. А., Баишев В.А. // КАРБОНАТНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ 2024, Казань, 14–15 августа 2024 года

12. Опыт оценки неподвижной составляющей остаточной воды путем комбинации порометрических методов и математического моделирования / Мухаметдинова А. З., Борисов А. Г., Гришин П. А., Рябухин А. Д., Шегай В.Н., Орешко Е.С. // Санкт-петербург 2024. геонауки: современные вызовы и пути решений. Сборник материалов 11-й международной геолого-геофизической конференции. Москва, 2024

13. Построение литолого - петрофизической модели порового пространства с целью изучения капиллярно-подвижной водонасыщенности / Борисов А. Г., Рябухин А. Д., Карамов Т.И., Богданович Н.Н., Соколова Н.С., Гришин П.А., Шегай В.Н., Орешко Е.С. // Санкт-петербург 2024. геонауки: современные вызовы и пути решений. Сборник материалов 11-й международной геолого-геофизической конференции. Москва, 2024

14. Стандартизация исследований керн. Проблемы и решения / Борисов А. Г., Рябухин А. Д., Казаков А. Д // Геосочи-2023. Актуальные проблемы геологии и геофизики Сочи, 24–27

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

«МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛАСТОВ»

Автор: Рябухин Антон Дмитриевич

Ключевые слова: низкопроницаемые коллекторы, ачимовская свита, баженовская свита, карбонатные породы, неснижаемая водонасыщенность, пористость, проницаемость, центрифугирование, ядерно-магнитный резонанс (ЯМР), ртутная порометрия, капиллярное давление, засоленные породы.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы повышения достоверности определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) низкопроницаемых коллекторов. В связи с истощением традиционных запасов,

вовлечение в разработку трудноизвлекаемых ресурсов требует адаптации и совершенствования существующих лабораторных методик, разработанных для высокопроницаемых пород и не учитывающих специфику сложных коллекторов.

Цель работы – повышение точности определения коллекторских свойств низкопроницаемых пород.

В ходе исследований выполнен комплексный анализ существующих методов определения пористости, проницаемости и остаточной водонасыщенности. На основе большого объема экспериментальных данных (более 1000 образцов) автором усовершенствованы методики пробоподготовки и измерений, уточнена типизация вод в поровом пространстве, создана методика пересчета ФЕС для пород, содержащих водорастворимые соли, а также разработаны специальные подходы для исследования сланцевых пород с проницаемостью в диапазоне $(0.001-1) \cdot 10^{-3}$ мкм².

ANNOTATION

Of the Graduation Qualification work

"METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING RESERVOIR PROPERTIES OF LOW-PERMEABILITY ROCKS IN OIL AND GAS FORMATIONS"

Ryabukhin Anton Dmitrievich

Keywords: low-permeability reservoirs, Achimov formation, Bazhenov formation, carbonate rocks, irreducible water saturation, porosity, permeability, centrifugation, nuclear magnetic resonance (NMR), mercury porosimetry, capillary pressure, salted rocks.

The dissertation addresses the crucial issue of enhancing the reliability of determining the reservoir properties of low-permeability reservoirs. As conventional reserves deplete, the development of hard-to-recover resources necessitates the adaptation and improvement of existing laboratory techniques, which were originally designed for high-permeability rocks and do not account for the specifics of complex reservoirs.

The aim of the work is to improve the accuracy of determining the reservoir properties of low-permeability rocks in oil and gas bearing formations.

The research involved a comprehensive analysis of existing methods for determining porosity, permeability, and irreducible water saturation. Based on a large volume of experimental data (over 1000 samples), the author refined sample preparation and measurement procedures, clarified the classification of pore-space fluids, developed a method for adjusting reservoir properties in rocks containing water-soluble salts, and devised specialized approaches for analyzing shale rocks with permeability in the range of $(0.001-1)$ mD.

