

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА»

На правах рукописи



БЕЛОЗЕРОВ ИВАН ПАВЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕРРИГЕННЫХ
КОЛЛЕКТОРОВ**

Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор геолого-минералогических наук,
профессор М.Г. Губайдуллин

Архангельск - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД.....	12
1.1 Актуальность технологий цифрового моделирования керна терригенных пород.....	12
1.2 Выбор основных параметров терригенных коллекторов нефти для формирования цифровой модели керна.....	15
1.3 Аналитический обзор технологий создания цифровой модели керна.....	21
1.4 Обоснование алгоритма создания цифровой модели керна.....	26
Выводы по главе 1.....	31
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КЕРНА.....	33
2.1 Анализ математических моделей и методов, применяемых в цифровом моделировании керна.....	33
2.2 Создание структуры цифровой модели керна с применением метода молекулярной динамики.....	42
2.3 Анализ эффективности методов, используемых при цифровом моделировании керна с применением метода молекулярной динамики.....	49
Выводы по главе 2.....	54
ГЛАВА 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА.....	55

3.1 Анализ результатов экспериментальных исследований по оценке фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.....	55
3.2 Анализ экспериментальных исследований по оценке литолого- петрографических характеристик терригенных коллекторов.....	62
3.3 Сравнительный анализ результатов исследований терригенных коллекторов нефти с результатами цифрового моделирования керна.....	72
3.4 Применение теории перколяции при цифровом моделировании керна	75
Выводы по главе 3.....	85
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН В ЦИФРОВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КЕРНА.....	86
4.1 Анализ геофизических данных нейтронного каротажа для установления зависимости проницаемости по керну от пористости по ГИС в целях применения в цифровой модели керна.....	86
4.2 Анализ возможностей использования данных ГИС в целях применения в цифровой модели керна.....	94
Выводы по главе 4.....	98
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Технология цифрового моделирования керна является востребованным и развивающимся научным направлением, позволяющим решать целый ряд задач, связанных с исследованиями керна материала. Данная технология получает всё большее распространение в связи с развитием компьютерных и нанотехнологий. Основные попытки применения цифровой модели керна на практике были предприняты в последнее десятилетие, хотя первые примеры ее использования для анализа пород–коллекторов относятся к 80-м годам прошлого века.

Актуальность развития технологии цифрового моделирования керна, прежде всего, определяется тем, что у специалистов не всегда имеется достаточное количество керна материала со скважин для проведения исследований, в ряде случаев возможность отобрать керна материал вовсе отсутствует.

Совершенствование технологии цифрового моделирования керна позволит в той или иной степени справиться с проблемой нехватки или отсутствия керна материала, а также решить вопросы исследования рыхлых, слабосцементированных и других горных пород, «проблемных» с точки зрения возможности проведения физических экспериментов. Кроме того, актуальным представляется создание блока цифрового керна, вписывающегося в общую платформу цифровизации технологий, связанных с фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) коллекторов при разработке месторождений углеводородов.

С помощью цифровой модели керна также появляется возможность эффективно уточнять и дополнять расчетные параметры при лабораторных исследованиях керна, снижая вероятность ошибки в получаемых результатах.

Технология цифрового моделирования керна используется в операциях по контролю за разработкой нефтяных месторождений в качестве эффективного инструмента для уточнения геологического строения, изучения динамического состояния залежей и процессов, протекающих при их разработке.

Степень разработанности темы исследования. Технология цифрового моделирования керна является востребованным и развивающимся направлением в имитационном исследовании процессов, протекающих в пласте-коллекторе при оценке геологических запасов нефти в мире. Большой вклад в развитие данной технологии внесли S.M. Alizadeh, H. Andraa, M. Andrew, B. Bijeljic, M.J. Blunt, C.H. Arns, M.A. Knackstedt, W.V. Pinczewski, J. Bear, C. Carpenter и многие другие.

В России данная технология только начинает развиваться. Первая в России лаборатория по цифровому моделированию керна была открыта в 2016 году, а основные отечественные работы, посвященные цифровому моделированию керна были опубликованы в последние годы (А.Н. Шандрыгин, С.В. Степанов, Г.С. Бембель и др.).

Значительный вклад в изучение вопросов моделирования процессов фильтрации пластовых флюидов в пористых средах внесли такие ученые и специалисты как А.А. Абросимов, И.С. Путилов, С.И. Грачев, А.П. Куршин, В.А. Коротенко, Н.Н. Михайлов, С.В. Галкин, Р.Г. Сарваретдинов, С.К. Сохошко и др.

Целью работы является научное обоснование и создание технологии цифрового моделирования керна для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов и геолого-информационного обеспечения успешной имитации процессов, протекающих в пласте.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить аналитический обзор работ о результатах, достигнутых в области создания и совершенствования технологии цифрового моделирования керна.
2. Разработать технологию цифрового моделирования керна для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.
3. Обосновать комплекс моделей и методов для формирования структуры порового пространства цифровой модели керна терригенных коллекторов и выполнить верификацию результатов теоретических исследований с

экспериментальными данными при оценке литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных характеристик пород-коллекторов.

4. Оценить возможность использования данных геофизических исследований скважин (пористость по ГИС, глинистость и др.) для установления и использования некоторых параметров при цифровом моделировании ядра.

Объектом исследования является цифровая модель ядра терригенных коллекторов, перспективных на скопление углеводородов.

Предметом исследования являются основы цифрового моделирования ядра для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.

Методология и методы исследований. Поставленные задачи решались с применением лабораторных методов изучения литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных характеристик терригенных коллекторов, а также методами молекулярной динамики и стохастической упаковки для формирования структуры цифровой модели ядра. Для определения проницаемости использовался метод электродинамической аналогии с применением теории перколяции при цифровом моделировании ядра.

Научная новизна работы:

1. Обосновано применение методов стохастической упаковки для математического моделирования структуры порового пространства цифровой модели ядра терригенных пород-коллекторов нефти.

2. Установлены экспериментальные зависимости проницаемостей по флюиду, определенные на ядровом материале, от пористости по ГИС, которые методически используются для прогнозирования проницаемости терригенных коллекторов по нефти при цифровом моделировании ядра, а также для калибровки модели.

3. Разработан междисциплинарный подход для реализации процессов создания и функционирования технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования, основанного на объединении нескольких программных продуктов

в единый программно-аппаратный комплекс, в котором полученные результаты цифрового моделирования сопоставимы с результатами лабораторных исследований образцов кернового материала.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Технология определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования на цифровой модели керна, основанная на применении методов стохастической упаковки и молекулярной динамики.

2. Обоснование методов стохастической упаковки и молекулярной динамики для формирования структуры порового пространства цифровой модели керна терригенных коллекторов.

3. Применение основ теории перколяции и метода электродинамической аналогии течения электрического тока и движения газа для симуляции определения абсолютной газопроницаемости цифровой модели керна терригенных коллекторов.

Теоретическая и практическая значимость

1. Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании применения результатов исследований кернового материала эталонного коллектора, представленного терригенным песчаником Berea Sandstone, кернового материала и петрографических шлифов продуктивных пластов месторождений Тимано-Печорской провинции и геофизических исследований скважин при создании цифровой модели керна, а также установлении и обосновании этапов моделирования порового пространства цифровой модели керна, необходимых для успешной имитации фильтрационных процессов в пористой среде пласта.

2. Результаты выполненных автором исследований послужили составной частью научного проекта РФФИ № 16-29-15116 офи_м «Разработка математического и программного обеспечения на основе методов молекулярной динамики для виртуального моделирования керна на Супер ЭВМ с целью прогнозирования основных параметров фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов нефти и газа».

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана технология цифрового моделирования керна, заключающаяся в использовании большого количества данных, которые могут быть получены без использования керна с применением методов стохастической упаковки и молекулярной динамики при математическом моделировании с целью определения фильтрационно-емкостных характеристик пласта.

2. Проведенные исследования по оценке литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных характеристик терригенного коллектора, а также анализ результатов геофизических исследований скважин позволяют расширять возможности цифрового моделирования керна и эффективно прогнозировать фильтрационно-емкостные характеристики пласта методами математического моделирования.

3. Использование результатов исследований фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели керна позволило повысить эффективность прогнозирования фильтрационно-емкостных характеристик пород-коллекторов нефти в ИТЦ АНГЛИ САФУ при выполнении хоздоговорных работ по заказам нефтегазовых предприятий, а также качественный уровень практической подготовки студентов, обучающихся по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело» в САФУ.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, обосновании выводов, апробации и подготовке публикаций по результатам выполненной работы. Соискателем выполнены экспериментальные исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств образцов керна (120 определений), на представительном объеме экспериментальных данных обосновано применение методов стохастической упаковки и молекулярной динамики для математического моделирования структуры порового пространства цифровой модели керна терригенных коллекторов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований определяется корректностью математической модели, базирующейся на методах стохастической упаковки и молекулярной динамики, положенной в основу технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели ядра, ее адекватностью, применением стандартизированных методов моделирования, сходимостью полученных результатов с данными значительного объема результатов литолого-петрографических и фильтрационных исследований терригенных пород-коллекторов нефти.

Научные, методические и практические результаты, полученные в диссертации, доложены на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Перспективы и проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктической зоны России» (Архангельск, 2016); Всероссийская конференция с международным участием «Глубинное строение и геодинамика Приладожья» (Петрозаводск, 2017); XI Международная конференция «Суперкомпьютерные дни в России» (Москва, 2017); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Управление инновационным развитием арктической зоны Российской Федерации» (Архангельск, 2017); Международная научно-практическая конференция на базе Кубанского государственного технологического университета совместно с Российской академией естественных наук, посвященная 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (Краснодар, 2017); «Геонауки — ключ к рациональному освоению недр» (Тюмень, 2017); XVII Международная конференция «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты» (Киев, 2018); Международная конференция Российской академии наук «Суперкомпьютерные дни в России» (Москва, 2018); I Международная молодежная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (Архангельск, 2018); VI Международная научно-практическая конференция «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (Пермь, 2018); VII Международная

научной-практической конференция «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (Пермь, 2019); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы освоения месторождений нефти и газа приарктических территорий» (Архангельск, 2019).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных трудах, в том числе 3 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 6 публикаций в изданиях, включенных в международную реферативную базу цитирования Scopus.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 25.00.17 (2.8.4.) - Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки), а именно п. 1 «Промыслово-геологическое (горно-геологическое) строение залежей и месторождений углеводородов и подземных хранилищ газа, пластовых резервуаров и свойства насыщающих их флюидов с целью разработки научных основ геолого-информационного обеспечения ввода в промышленную эксплуатацию месторождений углеводородов и подземных хранилищ газа» и п. 5 «Научные основы компьютерных технологий проектирования, исследования, эксплуатации, контроля и управления природно-техногенными системами, формируемыми для извлечения углеводородов из недр или их хранения в недрах с целью эффективного использования методов и средств информационных технологий, включая имитационное моделирование геологических объектов, систем выработки запасов углеводородов и геолого-технологических процессов».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста; состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы; включает 7 таблиц, 19 рисунков и 2 приложения. Библиографический список содержит 149 наименований, в том числе 59 иностранных.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, заслуженному геологу РФ, доктору геолого-минералогических наук, профессору

М.Г. Губайдуллину за постоянное внимание и поддержку при выполнении данной работы. Признательность за ценные советы и замечания автор адресует доктору технических наук, профессору А.Б. Золотухину.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

1.1 Актуальность технологий цифрового моделирования керна терригенных пород

В настоящее время технология цифрового моделирования керна является востребованным и развивающимся направлением в оценке геологических запасов нефти в мире [91, 92, 94, 96, 98, 101, 117, 119, 120, 123, 124, 133, 136, 148, 149]. Технология цифрового моделирования керна получает всё большее распространение в силу развития компьютерных и нанотехнологий. Основные попытки применения данной технологии на практике были предприняты в последнее десятилетие, хотя первые исследования по ее использованию для анализа реальных пород–коллекторов начались еще в 80-х годах прошлого века [117, 126].

Однако в России данная технология только начинает развиваться. Первая в России лаборатория по цифровому моделированию керна была открыта в 2016 году, а основные российские работы, связанные с цифровым моделированием керна были опубликованы в последние годы [6, 137]. Тем не менее интерес к развитию данной технологии в России огромен и может быть связан, как с разработкой шельфовых месторождений и залежей Баженовской свиты, так и с разработкой традиционных месторождений нефти.

Вопрос о цифровом моделировании керна представляется актуальным в силу того, что у специалистов не всегда имеется достаточное количество кернового материала со скважин для проведения исследований, в ряде случаев нет возможности отобрать керновый материал [11]. Например, в случаях если керн с исследуемых скважин представлен рыхлыми, слабосцементированными и другими породами. Иногда керн с исследуемых скважин и вовсе отсутствует.

В связи с этим специалистам керновых лабораторий часто приходится ограничиваться недостаточным количеством кернового материала для

определения искомых характеристик пласта. В то же время, когда керновый материал из интересующих скважин и вовсе отсутствует, приходится ограничиваться данными геофизических исследований скважин и результатами других исследований.

Совершенствование технологий цифрового моделирования керна позволит в той или иной степени решить проблему нехватки или отсутствия кернового материала, вопросы исследований рыхлых, слабосцементированных и других «проблемных» с точки зрения возможности проведения физических экспериментов горных пород. Также использование цифровой модели керна может позволить снизить затраты нефтегазовых компаний на проведение керновых исследований. Кроме того, актуальным представляется создание блока цифрового керна, вписывающего в общую платформу цифровизации технологий, связанных с исследованием ФЕС коллекторов при разработке месторождений углеводородов.

На сегодняшний день возникает большой интерес со стороны крупных нефтегазовых компаний к разработке шельфовых месторождений Арктической зоны России. По последним оценкам [26], на арктическом шельфе сосредоточено до 80 % потенциальных углеводородных запасов России. В то же время разработка шельфовых месторождений Арктической зоны России в ряде случаев осложняется их приуроченностью к сложнопостроенным коллекторам, а также удаленным географическим положением [89]. Сложность геологического строения продуктивных горизонтов также является одним из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на эффективность разработки нефтяных месторождений [17]. Данные факторы требуют совершенствования существующих методов, применяемых при изучении кернового материала. Разработка низкопроницаемых горных пород, к примеру отложений Баженовской свиты также в значительной степени обусловлены трудностями исследования кернового материала. Внедрение адекватной цифровой модели в исследования керна является очень актуальным, в качестве дополнительного инструмента, с помощью которого возможно эффективно снизить неопределенности в исследованиях и повысить их точность при исследованиях кернового материала подобного рода месторождений.

С помощью цифровой модели керна также появляется возможность эффективно уточнять и дополнять расчетные параметры, получаемые в процессе лабораторных исследований керна таким образом снижая вероятность ошибки в результатах. Так после проведения экспериментов по определению проницаемости керна при моделировании пластовых условий, специалист сможет проверить полученный результат путем математического моделирования в цифровой модели керна на суперкомпьютере. В случае возникновения серьезных противоречий в результатах между лабораторными экспериментами и математическим моделированием может быть принято решение о повторном проведении физического эксперимента или его аннулирование. Всё это позволяет говорить о цифровом моделировании керна как об эффективном и актуальном дополнительном инструменте необходимым для повышения обоснованности результатов лабораторных исследований керна.

Устранение ошибочных результатов исследований керна – актуальная проблема для многих нефтегазовых компаний. В силу невозможности обоснования микропроцессов, протекающих в пласте на микроуровне при лабораторных исследованиях керна, технологического несовершенства оборудования, ошибок специалистов иногда результаты, получаемые в процессе лабораторных исследований керна, могут оказаться ошибочными, что может привести к неправильному обоснованию геолого-гидродинамической картины пласта и убыткам добывающей компании. Поскольку эффективность разработки нефтяных месторождений во многом зависит от достоверности геологического строения пластов и точности геологического моделирования, то использование адекватной цифровой модели керна способно снизить подобного рода риски. [74].

Результаты геофизических исследований скважин могут быть использованы для прогнозирования ряда параметров пород-коллекторов нефти и газа при цифровом моделировании керна. По данным [127] за последнее десятилетие достижения в преобразовании геофизической информации в цифровой вид достигли того уровня, когда современные компьютерные методы могут

применятся ко многим типам геофизических данных с незначительными временными затратами.

Разработка алгоритмов использования результатов геофизических исследований скважин для прогнозирования параметров пород-коллекторов нефти и газа является особенно актуальной в случаях, когда керн с исследуемых скважин полностью отсутствует.

1.2 Выбор основных параметров терригенных коллекторов нефти для формирования цифровой модели керна

Терригенные отложения - это обломочные осадки и обломочные горные породы, состоящие из снесённых с суши обломков горных пород и минеральных зёрен [19]. К терригенным отложениям относят песчаники, алевролиты и другие горные породы.

Терригенные горные породы являются одними из наиболее распространенных коллекторов нефти и газа. К ним, по разным оценкам, приурочены до 80 % залежей нефти [76]. Исследования терригенных горных пород – важный вопрос в изучении коллекторов нефти и газа.

Терригенные горные породы состоят из зерен различных минералов, сцементированных цементом различного типа. Пустотное пространство терригенных горных пород, как правило, представлено первичными порами и поровыми каналами, которые в своей совокупности проходят в межзерновом пространстве горной породы.

Размер поровых каналов терригенных горных пород может значительно отличаться как для различных коллекторов, так и в пределах одного коллектора. В терригенных горных породах размер пор, чаще всего, составляет меньше одного миллиметра. По размеру выделяются поры сверхкапиллярные $> 0,1$ мм; капиллярные 0,0002-0,1 мм; субкапиллярные $< 0,0002$ мм; ультракапиллярные $< 0,1$ мкм² [76]. При этом по данным [2] анализ керна показывает, что длина поровых каналов на 3 порядка и более превышает их диаметры.

Поры и поровые каналы в терригенной горной породе составляют сложную структуру порового пространства, через которую происходит миграция нефти из пласта к забою скважины. Поровые каналы являются сложными капиллярными системами и располагаются в терригенных горных породах хаотичным образом, имеют различные размеры, форму, направление, физико-химический состав зерен горной породы и цемента, слагающих матрицу горной породы. Стоит также отметить, что не все поры и поровые каналы терригенных пород являются открытыми и сообщающимися. Часть из них является закрытыми и не участвует в процессах миграции нефти.

Таким образом, можно отметить, что даже образец керна терригенной горной породы стандартного размера, диаметром 30 миллиметров и длиной 30 миллиметров в своём объеме может иметь огромное количество поровых каналов, в которых на процесс фильтрации жидкостей и газов оказывают влияние большое количество факторов. К таким факторам относят геометрию поровых каналов, пластовое и горное давления, пластовую температуру, капиллярное давление, препятствующее вытеснению флюида и многие другие факторы.

Изучение процессов фильтрации жидкости и газа в поровых каналах осложняется тем, что в крупных порах на движение жидкости наибольшее негативное влияние оказывает сила трения, возникающая в процессе движения жидкости и газа в поровых каналах, в то время как в более мелких порах на процесс фильтрации также оказывают влияние капиллярные и другие силы. В мелких порах влияние капиллярных сил становится настолько большим, что движение жидкости становится практически невозможным.

В исследованиях терригенных коллекторов нефти и газа важное значение имеет вопрос определения гранулометрического состава горных пород. Гранулометрическим составом породы называют количественное, как правило, массовое содержание в породе частиц различной размерности. Им в значительной степени определяются многие свойства породы, такие как пористость, проницаемость, удельная поверхность, капиллярные свойства и т. п. [70].

Коллекторские свойства терригенных горных пород характеризуются целым

рядом показателей, к которым относятся гранулометрический состав горных пород, пористость, проницаемость, капиллярные свойства горных пород, насыщенность горных пород и другие показатели.

Основным критерием, определяющим тип коллектора, является способность породы пропускать через себя флюид, т.е. проницаемость [72].

Фильтрационно-емкостные свойства горных пород определяются пористостью и проницаемостью, а также их вещественным составом. ФЕС являются одними из наиболее важных параметров терригенных коллекторов нефти. Диапазон проницаемости терригенных коллекторов нефти лежит в широких пределах и может меняться от величины менее $0,0001 \text{ мкм}^2$ до нескольких мкм^2 в зависимости от породы и других факторов. Коэффициент открытой пористости терригенных пород-коллекторов нефти также лежит в широких пределах и может меняться от долей процента до 50 и более процентов.

Проницаемость терригенных горных пород зависит от объема поровых каналов, их размеров и формы, горного и пластового давлений, пластовой температуры и многих других параметров. Пористость терригенных горных пород определяется объемом пустотного пространства горной породы и зависит от гранулометрического состава горных пород, сцементированности частиц и других параметров.

Пористость горных пород характеризуется коэффициентами полной пористости, открытой пористости, эффективной пористости и динамической пористости.

Для терригенных коллекторов коэффициенты полной пористости и открытой пористости, по сравнению с карбонатными, отличаются незначительно. Так по данным [9] в песчаниках и алевролитах полная пористость может на 5 - 6% превышать открытую.

Проницаемость горных пород характеризуется коэффициентами абсолютной проницаемости, фазовой проницаемости и относительной фазовой проницаемости.

Согласно [79] для выяснения свойств песчано-алевритовых пород как коллекторов нефти и газа важно определить их гранулометрический состав. Гранулометрический состав является важным показателем физических свойств и структуры горной породы. Общепринятой классификации по данным гранулометрического состава не существует. Это связано с тем, что цели и объекты, для которых производится определение гранулометрического состава, очень различны по своим физическим и структурным характеристикам.

По гранулометрическому составу горной породы можно судить о геологических условиях отложения пород залежи. Так как размеры частиц породы обуславливают общую их поверхность, контактирующую с нефтью, от гранулометрического состава породы зависит количество нефти, остающейся в пласте после окончания его разработки в виде пленок, покрывающих поверхность зерен, и в виде капиллярно удержанной нефти [70].

Для подробной характеристики песчано-алевритовых и глинистых пород и выяснения сочетания в них гранулометрических элементов применяют различные методы определения гранулометрического состава горных пород, основанные на полном разделении частиц по фракциям и на учете частиц без разделения по фракциям путем изучения структур породы в шлифе при помощи микроскопа [79]. В настоящее время всё большее распространение получает технология определения гранулометрического состава горных пород в лазерных дифракционных анализаторах размеров частиц, определяющих гранулометрический состав горной породы посредством лазерной дифракции, при которой используется физический принцип рассеяния электромагнитных волн. Использование такой технологии способно значительно повысить точность и скорость определения гранулометрического состава горных пород.

Терригенные горные породы имеют в своей структуре огромное количество поровых каналов сложной геометрической формы, могут значительно отличаться по своему вещественному составу по всей протяженности пласта. Наличие капиллярных сил, различные по силе и характеру взаимодействия контакты породообразующих минералов с нефтью и многие другие факторы значительно

затрудняют возможность математического моделирования терригенных горных пород и вынуждают исследователей и специалистов использовать физическое моделирование керна в качестве основного метода для определения петрофизических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов нефти и газа. Фильтрационно-емкостные свойства пласта, зависящие от коэффициентов насыщенности, геологического строения залежи, размещения скважин влияют на изменение характера течения флюидов в пласте и, следовательно, на выработку подвижных запасов нефти [24].

Те же факторы затрудняют математическое моделирование порового пространства горных пород и вынуждают исследователей использовать различные методы и приборы, позволяющие работать с горной породой на микроуровне. К таким методам можно отнести исследования петрографических шлифов, использование компьютерной микротомографии, определение гранулометрического состава частиц слагающих горную породу при помощи лазерных дифракционных анализаторов размеров частиц, использование метода ЯМР-релаксации для высокоточного определения петрофизических свойств горных пород и другое.

Однако, несмотря на это, попытки создания адекватной цифровой модели керна и перевода части исследований керна с физического моделирования на математическое, а также попытки использования цифровой модели керна в случаях нехватки или вовсе отсутствия кернового материала, постоянно предпринимаются отечественными и зарубежными исследователями.

В качестве исходного материала для последующего создания цифровой модели керна на начальном этапе целесообразно использовать образцы керна терригенных горных пород в связи с тем, что терригенные коллектора, как правило, обладают меньшей анизотропией фильтрационно-емкостных и других свойств, а также сложностью строения, чем, например, карбонатные коллектора. Помимо этого, важными положительными факторами при моделировании терригенных пород являются их гомогенность и относительно невысокая степень распределения частиц по размерам.

В дальнейшем, представляется возможным осуществление перехода к цифровому моделированию более сложных моделей порового пространства и фильтрационных систем с учетом введения дополнительных факторов, таких как высокая степень анизотропии среды, высокая степень глинистости и другие.

На начальном этапе формирования цифровой модели ядра следует использовать методы, при помощи которых возможно определить форму и размеры зерен, слагающих горную породу. В дальнейшем из смоделированных зерен формируется модель пористой среды, в которую закладываются различные процессы и параметры. К таким методам относят определение гранулометрического состава частиц при помощи лазерных дифракционных анализаторов размеров частиц, микротомографию горных пород, исследования петрографических шлифов. Для понимания объемных характеристик порового пространства породы, важно определять коэффициенты открытой, эффективной и динамической пористости горной породы. Для изучения структуры порового пространства, оценки эффективной пористости, характера водонасыщенности может быть использована микротомография образцов горных пород даже при отсутствии ядерного материала [73]. Томографические исследования — оценить литологическую неоднородность на микроуровне, получить трехмерную модель структуры пустотного пространства [13]. В зависимости от того, какие цели преследует специалист при цифровом моделировании важными для определения параметрами могут являться проницаемость породы по флюиду или газу, фазовые проницаемости, коэффициенты остаточной водонасыщенности, петрофизические параметры горных пород и другое.

1.3 Аналитический обзор технологий создания цифровой модели керна

Проблема создания, использования и внедрения цифрового моделирования керна описывалась в целом ряде российских и зарубежных работ [56, 92, 94, 101, 120, 137]. Самая идея использования адекватной в плане решения геолого-промысловых задач цифровой модели керна в силу естественных причин является востребованной со стороны нефтегазовых компаний.

Помимо очевидных преимуществ, технология цифрового моделирования керна имеет и ряд недостатков. Одной из основных проблем цифрового моделирования керна является невозможность полного описания и обоснования микропроцессов, протекающих в пласте, путем математического моделирования на современном этапе развития науки и техники.

Данная проблема может быть частично решена путем увеличения разрешения снимков при томографических исследованиях керна и точного определении гранулометрического состава горных пород методом лазерной дифракции.

Так, для определения гранулометрического состава образцов керна в работе [27] использовался лазерный дифракционный анализатор размеров частиц, способный улавливать частицы размером от 0.012 до 2800 микрон. Также в данных исследованиях нашла своё применение технология "Tri-Laser", которая позволяет с высокой степенью полноты улавливать частицы образца.

По информации [133] результаты гранулометрического анализа гранулярных терригенных пород, в особенности пересчитанные на гранулометрические коэффициенты, в определенной мере позволяют судить об их структурном облике. Так, в работе [27] для определения плотности упаковки шаров использовался именно показатель гранулометрического состава горных пород. Современные лазерные дифракционные анализаторы размеров частиц способны не только с высокой точностью определять распределение частиц горных пород по размерам в широком диапазоне, но и выдавать геометрические характеристик частиц с их изображением. Всё это позволяет говорить о возможности определения

гранулометрического состава горных пород методом лазерной дифракции, как об альтернативном инструменте, способном с достаточной степенью точности частично получать необходимые данные аналогичные тем, которые выводятся при микротомографических исследованиях горных пород.

В работе [120] указано, что для изучения и описания внутренней структуры горных пород широко используется 3D томография образцов керна. Последующая обработка полученных изображений позволяет построить трехмерную цифровую модель керна, с помощью которой возможно провести цифровое моделирование различных физических процессов для получения искомых характеристик пласта. Цифровой анализ керна с использованием трехмерных томографических изображений внутренней структуры пористых сред получил существенное развитие в последние годы [86].

В мировой практике для моделирования цифрового керна используется масштабная микротомография внутреннего пространства горной породы с высоким разрешением, контрастностью изображений и получением рентгенограмм под несколькими углами обзора. В работе [120] для получения 2048-воксельной томограммы терригенного коллектора было сделано 3600 рентгенограмм. Для создания томограммы понадобилось 4-часа рабочего времени суперкомпьютера, что не является затратным с точки зрения времени показателем в исследованиях керна. Дальнейшее создание цифровой модели и сравнение результатов определения капиллярных давлений, проницаемости и параметра пористости в процессе лабораторных экспериментов и путем математического моделирования было названо исследователями удовлетворительным.

По данным [123] в настоящее время для определения характеристик пласта начинают применяться образцы шлама, получаемого в процессе бурения скважин. Сама возможность применения образцов шлама, получаемых в процессе бурения, в целях определения свойств пород-коллекторов нефти и газа может стать очень востребованной со стороны нефтегазовых компаний. Особенно это актуально в тех случаях, когда керн с исследуемых скважин полностью отсутствует, а значения тех

или иных параметров и характеристик пласта необходимы для грамотной разработки месторождений.

В работе [96] указано, что нефтяная промышленность нуждается в эффективной характеристике пласта для того чтобы снизить риски связанные с разработкой новых месторождений. На сегодняшний день, основными источниками, служащими для получения характеристик пласта являются керновый материал и геофизические данные. Получение информации из данных источников является необходимым для того чтобы снизить неопределенность в характеристиках пласта. В то же время одной из основных проблем исследований керна и получения геофизических данных по скважинам является невозможность полного описания микропроцессов протекающих в поровом пространстве.

Цифровое моделирование керна позволяет более глубоко и детально описывать микропроцессы в пласте, что является одной из причин почему оно является столь востребованным направлением для решения многих задач при разведке и добыче запасов нефти, а также представляет интерес для научного сообщества. При должном подходе цифровое моделирование керна способно повысить уровень достоверности геолого-промысловых данных в силу возможности частичного описания и обоснования микропроцессов протекающих в поровом пространстве в масштабе пор на микроуровне.

Для получения исходных параметров цифровой модели керна в зарубежных исследованиях применялись различные подходы и методы. Так в работе [101] для моделирования пор и частиц образцов горных пород использовалась 3D-томография образцов керна и петрографических шлифов. В ходе проведения томографических исследований было получено 23 гигабайта данных по томографическим снимкам с высоким разрешением с использованием микротомографов. В дальнейшем при помощи автоэлектронного микроскопа на стенках поровых каналов была обнаружена связанная вода с отсорбированными в ней частичками асфальтенов размером порядка 10 нанометров, которые были

связаны в более крупные частички и теоретически могли являться индикатором водонасыщенности.

При проведении петрофизических исследований по полученным 3D изображениям и снимкам с автоэлектронного микроскопа были получены петрографические свойства горных пород, такие как пористость и электрическая проводимость. Важной составляющей подобных петрографических исследований является то, что в силу высокого разрешения получаемых изображений и возможности рассмотреть керн на микроуровне исследователи получают возможность изучить те или иные петрофизические свойства горных пород в различных направлениях и таким образом учесть влияние анизотропии среды и правильно построить ряд аналитических кривых и диаграмм, например, тензор проницаемости.

Использование тензоров проницаемостей позволяет корректно учитывать особенности процессов, значительно различающихся по времени [5]. Как известно процесс фильтрации (миграции) жидкостей и газов в пласте происходит в течение длительного времени и использование тензоров проницаемостей может позволить учитывать особенности изменения скорости и характера течения жидкостей и газов в поровых каналах с учетом анизотропии среды и других факторов. Таким образом использование тензоров проницаемостей, может привести исследователя к вопросам использования различных математических моделей, способных учитывать данные процессы в цифровом моделировании керна. Также следует учитывать, что тензоры проницаемости могут быть получены по результатам исследований совсем небольших по размерам фрагментов горной породы, что невозможно при стандартном физическом моделировании керна.

Результаты томографических исследований керна являются очень важными для изучения горных пород, характеризующихся широким распределением частиц по размерам и значительными отличиями в геометрических параметрах частиц, так как позволяют рассмотреть структуру поровых каналов породы на микроуровне.

Для получения коэффициентов открытой пористости горных пород могут использоваться различные методы. Коэффициент открытой пористости может

быть определен методом И.А. Преображенского, газовольюметрическим методом, методом ЯМР и другими методами.

Коэффициенты эффективной пористости могут быть определены в соответствии с [69].

Коэффициент динамической пористости характеризует относительные объемы пор и пустот, через которые возможна фильтрация нефти и газа в пластовых условиях, что делает его важным параметром при моделировании фильтрационных процессов в масштабе пор. Способ определения коэффициента динамической пористости описан в [45].

В мировой практике для определения поровой структуры горных пород широко применяется метод ртутной порометрии, который позволяет не только определять пустотную характеристику породы, но и распределение пор по размерам. Однако, данная технология не всегда безопасна, так как ртуть является высокотоксичным веществом.

Для определения фильтрационных характеристик горных пород на практике используются различные фильтрационные системы, способные определять проницаемость в режимах 1-о, 2-х и 3-х фазной фильтрации методами стационарной и нестационарной фильтрации. Так в работе [9] для определения проницаемостей горных пород использовалась фильтрационная установка УИК-5.

Во многих исследовательских работах, тематически связанных с цифровым моделированием керна, большое внимание уделяется исследованиям петрографических шлифов. Литолого-петрографические исследования шлифов широко используются в рамках работ по петрофизическим исследованиям керна в нефтяной промышленности. Шлифы могут применяться для определения коэффициента полной пористости, плотности горной породы, минералогического состава пород. Помимо этого, петрографические шлифы являются важной составляющей в проведении исследований горных пород в масштабе пор. Так, в работе [33] для определения микроструктуры пространства осадочных горных пород использовался рентгеноструктурный анализ петрографических шлифов, который в дальнейшем был использован для построения 3D структуры

пространства горных пород при моделировании многофазной фильтрации осадочных горных пород в масштабе поры. Помимо этого, в данной работе использовались результаты исследований горных пород методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Это позволило описать проницаемость горной породы, основываясь на корреляции между проницаемостью горной породы и критическим диаметром поры, под которым понимается диаметр наиболее узкого порового канала в поровой системе горной породы. Корреляция между результатами лабораторных исследований керна и результатами математического моделирования керна была названа удовлетворительной.

В конечном итоге, можно сказать что в качестве исходного материала для цифрового моделирования керна исследователями использовались различные результаты, данные, подходы и методы. К наиболее распространенным из них можно отнести, результаты томографических исследований горных пород, результаты литолого-петрографических исследований шлифов, а также результаты исследований горных пород методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР).

1.4 Обоснование алгоритма создания цифровой модели керна

В ходе анализа, выполненного с участием автора, было установлено, что при создании цифровой модели керна целесообразно использовать плотную стохастическую упаковку, из которой слагается микроструктура керна, или применить для её создания методы молекулярной динамики.

Разработка методов обоснования природы явлений с использованием молекулярной динамики может позволить более точно охарактеризовать процессы, протекающие в пласте. Высокая точность характеристики процессов, протекающих в пласте, может быть достигнута путем изучения данных процессов на микроуровне, и их дальнейшего интегрирования в более крупную модель.

Методы молекулярной динамики позволяют рассматривать модели, состоящие из миллионов отдельных элементов, однако для применения данных методов требуются большие вычислительные мощности, которые в настоящее

время может обеспечить использование суперкомпьютеров. По данным [130] моделирование методом молекулярной динамики способно описывать фильтрационные потоки на наноуровне.

Под молекулярной динамикой понимается метод моделирования, позволяющий проследить изменения системы взаимодействующих частиц во времени при помощи интегрирования некоторых уравнений движения.

По информации [128] метод молекулярной динамики является одним из наиболее распространенных методов, которые могут быть использованы для моделирования потока в наноразмерных порах. Для пористых структур метод молекулярной динамики обычно используется для исследования потока в мембранах. В рамках данных исследований могут проводиться различные виды симуляционного моделирования с целью исследования свойств и параметров в потоке непрерывной среды.

В работе [104] изучались фильтрационные потоки гелия, азота и углекислого газа в кремниевой пористой мембране с использованием гибридного метода молекулярной динамики и Монте-Карло. Было обосновано влияние давления и температуры на характеристики потока. В методе Монте-Карло исходные параметры задаются в виде непрерывных функций распределения, считающихся типичными для каждой из величин (нормально, логнормальное и другое) [14].

В работе [147] методы молекулярной динамики использовались для расчета сдвиговой вязкости жидкого аргона в пористой среде при различных температурах и плотности среды. В работе также была представлена корреляционная зависимость, предназначенная для прогнозирования вязкости ньютоновских жидкостей в поровом пространстве в зависимости от температуры, плотности и пористости среды.

В настоящее время важной задачей и одновременно серьезным вызовом для научного сообщества является разработка молекулярно-динамической модели, предназначенной для исследований фильтрационно-емкостных свойств в наноразмерных поровых каналах. С использованием различных программных пакетов для моделирования молекулярной динамики типа LAMMPS у

исследователей появляется возможность моделировать потоки газа в пористой среде и исследовать влияние различных параметров, таких как движущая сила, пористость и поле распределения скоростей на фильтрационные параметры потока. Уже проведенные исследования показывают, что для исследования различных явлений потока в пористых средах, определяемых по законам фильтрации Дарси и Форхгеймера подобное моделирование является применимым.

В основе метода молекулярной динамики лежит уравнение Ньютона, которое для каждой молекулы принимает вид:

$$m_i \frac{d^2 \bar{r}_{ij}}{dt^2} = \sum_{j \neq i}^N \bar{F}_{ij} + \bar{F}_{\text{внешняя}} \quad (1.1)$$

где $\bar{F}_{\text{внешняя}}$ - сила, направленная со стороны внешней среды на каждую молекулу, Н; r_{ij} – расстояние между молекулами, м; d – диаметр молекул, нм; t – время, с; m_i – масса молекулы, г.

Сила \bar{F}_{ij} рассчитывается через функцию потенциалов взаимодействия:

$$\bar{F}_{ij} = \nabla \varphi_{ij} = \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial r_{ij}} \quad (1.2)$$

где φ_{ij} – потенциал взаимодействия; r_{ij} – расстояние между молекулами, м.

Основным преимуществом использования метода молекулярной динамики является возможность моделирования системы при заданной температуре или при заданных скоростях движения частиц. Кроме того, использование метода молекулярной динамики позволяет рассчитывать необходимые значения показателей фильтрационно-емкостных и других свойств горных пород с достаточно высокой скоростью.

Использование данного подхода представляется возможным положить в основу для создания цифровой модели ядра.

Помимо технических и аналитических вопросов, в процессе создания цифровой модели ядра исследователям необходимо провести выбор тех научных методов, которые бы позволили наиболее полно описать породы-коллекторы

нефти и газа и создать наиболее объективную цифровую модель применительно к практическим исследованиям.

Для решения данной задачи необходимо использовать комплекс теоретических и эмпирических научных методов. Автором предложен логический алгоритм по созданию цифровых моделей ядра.

На первоначальном этапе работы алгоритма проводится наблюдение и формирование гипотезы создания цифровой модели ядра, а также предсказания её свойств, далее следует проведение физических и математических экспериментов, которые предусматривают сравнение результатов, полученных путем математического моделирования с результатами, полученными на реальных ядерных моделях. Сравнение данных результатов является основой для формирования дальнейшего вывода о приемлемости применения математической модели в качестве дополнения, частичной или полной замены физических экспериментов.

После проведения сравнения полученных результатов и набора статистических данных по физическим и математическим экспериментам необходимо провести проверку для возможного нахождения факторов, противоречащих сделанным выводам. Очевидно, что выводы, сделанные без проверки, могут являться недостоверными и иметь в себе ошибки. В случае возникновения таких ошибок необходимо перейти к стадии формированию гипотезы и продолжить формирование цифровой модели ядра по предложенному выше алгоритму.

В процессе создания цифровой модели ядра этапом наблюдения может являться процесс формирования знаний по физическим, петрофизическим, фильтрационно-емкостным свойствам пород-коллекторов нефти, а также процесс формирования умений по проведению экспериментов на ядерном материале и другим исследованиям. В процессе формирования знаний и умений у исследователя формируются идеи по воспроизведению физических явлений в математической форме. Исследователь преобразует свои идеи в гипотезу по формированию цифровой модели ядра с её свойствами и особенностями.

После этого исследователь анализирует, каким образом могут быть получены экспериментальные данные, необходимые для воспроизведения путем математического моделирования. Далее идет стадия эксперимента. В ходе проведения экспериментов на начальном этапе предпочтительным является использование образцов горных пород, отличающихся низкой степенью анизотропии по своим свойствам и вещественному составу. Таким образом, процесс получения результатов будет более «простым», чем при использовании образцов «неоднородных» по своим свойствам и «разнообразным» по своему вещественному составу. В дальнейшем возможен переход от «простых» горных пород к «более сложным».

В ходе проведения экспериментов исследователем могут быть получены данные по гранулометрическому составу горных пород, литологическому составу, фильтрационно-емкостным свойствам и многие другие параметры.

В дальнейшем путем применения математических методов и создания микроскопических виртуальных частиц пород различной геометрической формы моделируется пористая среда и различные физические процессы, происходящие породах-коллекторах нефти и газа.

В случае появления значительных расхождений в результатах между физическим и математическим моделированием исследователю стоит перейти к стадии формирования гипотезы и повторить процесс по предложенному выше алгоритму до появления положительных результатов.

После появления минимальных допустимых расхождений между результатами, полученными на физических и математических моделях, цифровая модель керна должна быть подвергнута процедуре валидации для подтверждения факта, что результаты, полученные на модели, являются достаточно точными для её применения на практике.

Из-за высокой сложности вопроса создания цифровой модели керна, а также его вариативности следует понимать значимость использования научной интуиции на каждом этапе создания цифровой модели керна. Грамотное использование

научной интуиции без противопоставления логическому мышлению способно придать дополнительный импульс развитию данной технологии [42].

Сам, процесс формирования математической модели керна заключается в создании цифровой оболочки, которая бы по своим характеристика была сопоставима с реальными образцами керна, и могла являться заменой реальному керну на ряде этапов формирования целостного представления о пласте.

На сегодняшний день развитие технологии цифрового моделирования керна позволяет говорить о ней как об альтернативном источнике информации, позволяющем получить относительно качественные результаты исследований горных пород в случае недостатка кернового материала. Иногда она может найти своё применение и в условиях полного отсутствия кернового материала, при наличии результатов геофизических исследований скважин, или результатов исследований бурового шлама.

В ряде случаев также является актуальным использование цифровой модели керна при исследовании горных пород, которые сложно поддаются физическим исследованиям в силу их склонности к разрушению в процессе проведения экспериментов. К таким породам относятся слабосцементированные, неконсолидированные и другие горные породы.

Выводы по главе 1

Изучение терригенных коллекторов и анализ технологий цифрового моделирования керна позволили выявить, и обосновать основные параметры, необходимые для создания предлагаемой автором цифровой модели керна.

На основе анализа ранее опубликованных работ автором был сделан вывод о том, что на сегодняшний день развитие технологии цифрового моделирования керна позволяет говорить о ней как об альтернативном источнике информации, позволяющем получить относительно качественные результаты исследований горных пород в случае недостатка кернового материала. В некоторых случаях она

может найти своё применение и в условиях полного отсутствия кернового материала.

Актуальность создания цифровой модели керна обусловлена тем, что у специалистов не всегда имеется достаточное количество кернового материала со скважин для проведения исследований, когда нет возможности отобрать керновый материал.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА

2.1 Анализ математических моделей и методов, применяемых в цифровом моделировании керна

Существуют различные методики преобразования данных о строении пористой среды в математическую модель, пригодную впоследствии для расчетов течения флюидов [37].

Понимание взаимосвязей между геометрией микроструктуры и макроскопическими свойствами порового пространства является сложной задачей в описании большого количества процессов в различных науках и областях знаний, таких как гидрология, петрология, физика пласта и других. Для теоретической оценки и установления численной связи между геометрическими параметрами микроструктуры порового пространства и макроскопическими физическими свойствами пород исследователями по всему миру были приложены большие усилия [90].

Активное изучение процессов фильтрации жидкости и газа на микроуровне, наблюдающееся в последнее двадцатилетие, мотивировано появлением большого числа микроэлектромеханических систем, а позднее и нанотехнологий. В конце 80-х годов, интерес к данной тематике стал активно развиваться, но основные работы сводились к созданию различных микроэлектромеханических и биохимических систем типа “lab-on-chip”. Начиная с 90-х годов, происходит диверсификация данной тематика, расширяется область её применения. Изучение процессов фильтрации жидкостей и газов на микроуровне находит своё применение в медицине, фармакологии, биологии, теплоэнергетике, приборостроении, катализе, в вопросах изучения пород-коллекторов нефти и газа. В последнее время проявляется активный интерес к изучению процессов фильтрации жидкости и газа на наноуровне. Данная тенденция может быть связана не только с созданием нанотехнологий различного назначения, но и с исследованиями в достаточно

традиционных для науки областях, таких как биология, геофизика, теплоэнергетика и других. Активно проводятся исследования по созданию различного рода микропористых покрытий и течений.

Для пористых материалов, в том числе и для терригенных горных пород, проницаемость является важным макроскопическим параметром. Измерение проницаемости имеет важное значение для прогнозирования фильтрационных свойств пород на макроуровне. В последнее время появились значительные результаты в получении отображений внутривещного пространства на микроуровне, а применение технологий высокопроизводительных вычислений ускорило разработку и использование цифрового моделирования ядра в дополнение к физическим лабораторным экспериментам [135]. Основным плюсом использования высокопроизводительных вычислений в целях обеспечения быстрого и эффективного доступа к свойствам породы заключается в возможности извлечения свойств пород из трехмерных изображений с высокой степенью точности [94, 95, 100].

Обработка трехмерных изображений включает в себя процедуры обработки сигнала и процессы бинаризации, которые влияют на реконструкцию морфологии порового пространства и, следовательно, фильтрационные свойства пород [94]. Численно, некоторые компьютерные процессы могут влиять на вычисленную путем математического моделирования макроскопическую проницаемость.

В масштабе поры, единственный фазовый поток в пористой среде может определяться уравнением Стокса [99]. По данным [74] для анализа и обобщения результатов экспериментов двухфазной фильтрации по определению относительных фазовых проницаемостей в системе нефть – газ может быть применен принцип двойной нормировки данных, как по проницаемости, так и по насыщенности.

В макромасштабе, поток текучей среды обычно описывается с помощью численного определения проницаемости в масштабе поры с помощью закона Дарси [144] и характеризуется макроскопической проницаемостью, которая может быть оценена путем интегрирования локального поля. Этот переход между масштабами

имеет несколько важных аспектов, которые могут повлиять на полученную путем математического моделирования проницаемость. Экспериментально, основным источником неопределенности в определении проницаемости в лабораторных условиях является статистическая ошибка, вызванная недостаточно полным описанием процессов на микроуровне. Это может привести к потере существенной локальной информации по свойствам породы (микро- и мезо-пористость, геометрия порового пространства, связность поровых каналов и другое) [97].

В случае двухфазного непоршневого вытеснения может быть использована функция Баклея – Леверетта и обобщенный закон Дарси, включающий относительные проницаемости, которые зависят от водонасыщенности и вязкости воды и нефти, без учета капиллярных эффектов [67]. По данным [55] в процессе вытеснения нефтяная фаза трансформируется из непрерывной в дисперсную, образуя нефтяные кластеры, которые могут занимать значительные поровые объемы. Корректная оценка характерных неоднородностей позволяет обосновать неравномерную выработку запасов по площади месторождения и составить соответствующую программу геолого-технических мероприятий с целью рационального использования запасов углеводородов [72].

Задачи моделирования течений в поровом пространстве образцов горных пород характеризуются большой размерностью моделей ($10^6 - 10^9$ ячеек), сложной геометрией расчетной области, сложными физическими процессами, протекающими в них. Моделирование также осложняется многофазностью фильтрационных потоков, их многокомпонентность, неизотермичностью, проявлением различных химических реакций и многим другим.

В последнее время в мире разрабатывались различные подходы к имитационному моделированию пористых микроструктур. Одним из наиболее перспективных подходов является представление пористой микроструктуры в виде плотной стохастической упаковки микрочастиц, где частицы представлены сферополиэдрами, сферокубами и другими сложными геометрическими фигурами. В процесс создания упаковки частиц в цифровой модели керна может быть добавлена процедура дилатации, для учета деформации микрочастиц [61, 105, 107].

Тем не менее, расчет проницаемости в полученных структурах дает сильное отклонение при низкой проницаемости (более 100%), что может быть вызвано степенью глинистости реальных горных пород. В предлагаемых в работах [61, 105, 107] моделях не учитывается влияние глинистости, а также наблюдается общая тенденция к завышению проницаемости. В работе [61] это может быть связано с применением достаточно грубой резистивной модели для оценки проницаемости.

Для моделирования фильтрационных процессов, протекающих в пласте, используется целый ряд математических моделей и методов расчета. К наиболее распространенным из них относятся модели поровых сетей, модель решеточных уравнений Больцмана, метод сглаженных частиц, модели диффузной границы, модели основанные на решениях уравнений Навье-Стокса, методы конечных объемов [94]. Все эти модели и методы находят своё применение для решения частных задач для моделирования процессов, протекающих в пласте.

Под моделью поровой сети [9] понимается “цепочка” поровых каналов и связывающих их капилляров. Данная “цепочка” представляет собой пористую среду на микроуровне, в которой поры - узлы, а капилляры – связи. Данный метод может быть применен для решения задач, связанных с расчетом фильтрационных параметров, например, при построении стохастической упаковки цифровой модели керна.

По результатам [59] отличия фильтрационных характеристик различных моделей поровых сетей для одних и тех же распределений параметров снижаются с увеличением размеров моделей, а различия в значениях расчетных фильтрационных характеристик зависят от количества пор, закладываемых при стохастической генерации моделей.

Под моделью решеточных уравнений Больцмана [47] понимается метод для численного расчета течений жидкостей, газов и плазмы, основанный на дискретизации уравнений, описывающих динамику сплошной среды. Популярность данного метода в математическом моделировании связана с простотой его алгоритма и возможностью моделирования 2-х фазных систем.

Под методом сглаженных частиц понимается бессеточный лагранжевый численный метод, применяемый для расчетов структуры течений с неизвестной свободной границей, в частности высокоскоростных процессов в средах с существенно изменяющейся при интенсивном динамическом нагружении топологией моделируемых объектов [4]. В рассматриваемом методе в моделируемое физическое пространство помещается определенное количество частиц сферической формы, каждая из которых обладает массой, внутренней энергией, скоростью и движется в соответствии с законами механики [30]. По результатам [30] при помощи метода сглаженных частиц в сочетании с ИКВ-моделью и моделью “замороженного” поля массовых скоростей можно исследовать динамику состояния двухфазного течения среды с высокой концентрацией газовой фазы и описать процесс инверсии ее двухфазного состояния.

Модели типа «диффузной границы» являются альтернативным способом описания взаимодействия между фазами на границе их раздела [6].

При моделировании миграции многофазных сред на керновом материале данный метод подходит для физико-математической формализации описания процессов, происходящих на границе раздела фаз. Основным недостатком данного метода является то, что в реальных жидкостях ширина диффузного слоя настолько мала, что проводить расчет путем математического моделирования данным методом при таких условиях невозможно на современном уровне развития технологий.

Модели основанные на решениях уравнений Навье-Стокса предназначены для описания течения широко распространенного частного вида текучей среды – вязкой ньютоновской жидкости, имеет 9 неизвестных и замыкается в 6 уравнений [11]. Однако нефть в пластовых условиях не всегда проявляет свойства ньютоновской жидкости. К факторам, влияющим на реологические свойства пластовых флюидов, относят содержание асфальтенов, смол и парафинов, а также их фазовое состояние. Исследования пластовых флюидов и математическое моделирование их свойств проводятся с целью получения информации,

необходимой для подсчета запасов, проектирования процессов разработки и эксплуатации месторождений, а также прогноза составов добываемого сырья в динамике разработки месторождений, планирования балансов его промысловой подготовки и последующей переработки [76].

По данным [84] численное решение уравнений Навье — Стокса представляет большие трудности, обусловленные нелинейностью исходных уравнений, наличием областей высоких значений градиентов и другими особенностями, возникающими при определённых параметрах и режимах течений. Как следствие, у исследователей возникает необходимость создания специальных численных методов решения этих уравнений. На настоящий момент разработано огромное количество различных численных алгоритмов и специальных программных комплексов для численного решения уравнений Навье-Стокса. Тем не менее проблема создания и применения эффективных численных методов и алгоритмов для его решения по-прежнему остаётся острой и актуальной.

В ходе анализа доступной литературы было установлено, что в большинстве работ, в которых использовались численные решения уравнений Навье-Стокса при цифровом моделировании порового пространства анализировались только профили скорости потока. Однако в работе [114] численные решения уравнений Навье-Стокса также были применены для анализа профилей давления в поровом пространстве. Получена хорошая сходимость результатов анализа профилей скорости и давления для потока, проходящего через цилиндрический нанопоровый канал.

Использование методов конечных объемов основывается на выборе замкнутой области течения жидкости или газа, для которой производится поиск полей макроскопических величин (например, скорости, давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих физическим законам, сформулированным в математической форме. Метод основан на консервативной монотонной схеме дискретизации диффузионного и конвективного потоков [67].

Все вышеперечисленные модели и методы в той или иной степени применяются для решения ряда частных задач моделирования течения флюида в

пором пространстве, но несмотря на преимущества, все они имеют и определенные недостатки, как в части корректности математической модели и степени её полноты, так и в части устойчивого вычислительного алгоритма и возможности эффективной программной реализации [10]. Трудности, возникающие при моделировании, все больше затрагивают фундаментальные проблемы математической физики и математического моделирования [25].

Тем не менее, методы конечных объемов [108, 116, 122, 139, 140] и решеточных уравнений Больцмана [115, 121, 134] являются двумя наиболее часто используемыми методами для оценки свойств фильтрационных потоков в масштабе поры. Однако в работах [94, 125] было показано, что используемый в данных методах численный подход оказывает серьезное негативное влияние на точность определения проницаемости. Кроме того, учитывая непрерывный подход метода конечных объемов, уточнение сетки влияет также на моделирование локального потока и, следовательно, макроскопические расчеты свойств пород.

Уравнение Больцмана может быть записано в виде [113]:

$$\partial_t f + (\bar{\varepsilon} \nabla) f = Q(f, f') \quad (2.1)$$

где $f(t, \bar{x}, \bar{\varepsilon})$ – вероятность нахождения молекулы в положении x , двигающуюся со скоростью ε в момент времени t ; $Q(f, f')$ - интегральный член нелинейного уравнения функции f , являющейся предварительной и функции распределения вероятностей соответственно.

Теоретически с использованием уравнения Больцмана появляется возможность моделировать фильтрационные потоки газов в широком диапазоне чисел Кнудсена, включая переходный режим. Путем изменения времени релаксации в уравнении Больцмана появляется возможность относительно точно предсказывать особенности в микро- и наноканалах. Безразмерное распределение скорости и скорости потока при этом хорошо коррелируют с существующими аналитическими данными.

Для моделирования течений флюидов в цифровой модели керна могут быть использованы и другие методы, и подходы. К ним относятся метод

электродинамической аналогии, метод гидродинамики сглаженных частиц, аналитические методы.

Основными плюсами метода электродинамической аналогии является хорошо разработанная теория, незначительная численная сложность и невысокая степень длительности вычислительных процессов. Использование данного метода не требует много компьютерного времени для построения модели и существует множество проверенного программного кода для расчета подобных «электрических цепей», позволяющих в адекватные сроки получить необходимые результаты.

Метод электродинамических аналогий был разработан Н. Н. Павловским в начале 20 века и нашел широкое применение в изучении различных фильтрационных задач [87]. Используемая в методе аналогия между движением электрического тока в однородном поле и потенциальным движением несжимаемой жидкости позволяет "заменить" процесс течения жидкости в микроканалах на процесс течения тока по цепи с сопротивлением и, соответственно, "заменить" задачу нахождения проницаемости горной породы в сети микроканалов пористой среды, на задачу нахождения силы тока в электрической цепи. Осуществление данной "замены" возможно при наличии значений показателей площади поперечного сечения фильтрации, длины участка фильтрации, динамической вязкости жидкости и связности каналов.

Разработка подходящей модели проводимости поровых каналов в цифровой модели керна также требует изучения явлений адсорбции и диффузии флюидов и газов применительно к породам-коллекторам с учетом их микроструктуры.

Новое понимание массопереноса различных веществ в различных кристаллических структурах со сложной структурой микроканалов, может быть достигнуто благодаря использованию модели Максвелла-Стефана. В рамках этой модели данные для однокомпонентной адсорбции и диффузии могут быть использованы для предсказания свойств многокомпонентных смесей с высоким уровнем достоверности. Результаты, полученные с помощью симуляции

молекулярной динамики, могут быть использованы для мезоскопического описания процессов диффузии с применением модели Кнудсена.

В работе [15] указано, что математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах, протекающих в каналах, имеющих различное поперечное сечение, имеет важное практическое значение. Одним из подходов, применяемых для описания взаимодействия молекул газа с обтекаемыми поверхностями, является использование модели зеркально-диффузного отражения Максвелла [40], которая представляет собой линейную комбинацию диффузной и зеркальной моделей.

Другой моделью, используемой для описания взаимодействия молекул газа с поверхностью, является модель Черчиньяни–Лэмпис [102], в которой функция распределения молекул газа, отраженных от поверхности канала, зависит от двух параметров: коэффициента аккомодации тангенциального импульса и коэффициента аккомодации кинетической энергии, связанной с компонентой скорости, направленной по нормали к поверхности.

Тем не менее на настоящий момент времени не существует явной аналитической формулы для определения скорости потока в режиме перехода, однако существуют асимптоты для нормированной скорости потока [103, 106].

Модель зеркально-диффузного отражения Максвелла была использована в работах по изучению потоков тепла и массы в эллиптических, цилиндрических и прямоугольных каналах. Моделирование процесса массопереноса с граничными условиями Черчиньяни–Лэмпис в прямоугольном канале осуществлялось в работе [132].

Использование данных математических моделей и методов может быть реализовано в процессе создания и совершенствования технологии цифрового моделирования ядра и позволит повысить достоверность получаемых результатов в силу частной эффективности работы данных математических моделей на практике.

2.2 Создание структуры цифровой модели зерна с применением метода молекулярной динамики

Предлагаемая цифровая модель зерна представляет из себя плотную стохастическую упаковку, из которой слагается её микроструктура, для создания которой могут применяться методы молекулярной динамики.

При использовании плотной стохастической упаковки частицы зерна в цифровой модели изначально представлены сферами, размер которых выбирается исходя из данных, полученных в ходе определения гранулометрического состава образцов, микротомографии или результатов литолого-петрографических исследований шлифов.

Однако следует учитывать, что частицы горных пород по своим физическим и геометрическим свойствам не являются однородными, и редко имеют форму близкую к форме сферы. Это подтверждается целым рядом работ, в том числе [55]. Частицы терригенных пород могут иметь кубическую, призматическую, таблитчатую и другие структуры, характеризуются степенью окатанности и другими геометрическими параметрами. Всё это делает стохастическую упаковку цифровой модели зерна, состоящую из сфер неэффективной и вынуждает исследователей формировать упаковку из фигур другой геометрической формы.

Исходя из этого по информации [10] целесообразным при создании цифровой модели зерна является использование в качестве моделируемых частиц фигуры сложной геометрической формы, например, сфероцилиндры, сфероквадраты и сферокубы.

В процессе использования плотной стохастической упаковки предлагаемой цифровой модели зерна первоначально случайным образом раскидываются в объеме центры роста сфер, после этого происходит их рост до тех пор, пока они не столкнутся с соседними, далее происходит распределение положения сфер, соответствующих заданному. В дальнейшем производится переход от сфер к более сложным геометрическим фигурам.

В процессе генерации плотной стохастической упаковки для моделирования структуры породы исходя из распределения размеров зерен горных пород может найти свое применение метод Монте-Карло. Размеры и другие параметры зерен при этом могут быть определены по изображениям шлифов, по данным гранулометрического анализа горных пород методом лазерной дифракции или другими методами.

В дальнейшем при формировании цифровой модели могут быть использованы методы молекулярной динамики.

При создании цифровой модели зерна при помощи методов молекулярной динамики проводится симуляция молекулярной динамики атомов, с соответствующим заданному распределению радиусом Ван-дер-Ваальса,двигающихся под действием сил гравитации и сил Ван-дер-Ваальса в ограниченном объеме, до тех пор, пока, не произойдет потеря их кинетической энергии. В дальнейшем по аналогу осадка, т.е. по количественному и качественному содержанию частиц, потерявших кинетическую энергию, судят о свойствах цифровой модели зерна.

При моделировании методом молекулярной динамики проводится имитация движения частиц на основе уравнений движения Ньютона, которая состоит из двух повторяющихся в замкнутом цикле шагов. Имея систему из взаимодействующих друг с другом частиц и действие внешних сил, на первом шаге происходит расчет сил, действующих на каждую из частиц, которая зависит от ее положения и положения остальных частиц в системе. На втором шаге, имея силу, действующую на каждую частицу, посредством интегрирования уравнения Ньютона определяются координаты частицы в следующий через Δt момент времени. Таким образом, для системы с определенными начальными координатами частиц и определенными силами взаимодействия, постоянно производя выше описанные расчеты, можно проследить ее эволюцию во времени и пространстве.

В итоге, можно сказать, что реализация предлагаемой цифровой модели зерна требует многомасштабного математического моделирования в виде решения целой цепочки задач.

При реализации предлагаемой цифровой модели зерна, необходима разработка ряда технологических решений, с использованием высокопроизводительных вычислений. К таким технологическим решениям относятся моделирование микроструктуры зерна, 3D реконструкция и анализ порового пространства зерна, литолого-петрографический анализ шлифов при помощи микроскопа и другое.

Моделирование порового пространства зерна осуществляется в несколько этапов. Изначально моделируются примитивы форм зерен, распределение частиц по размерам, текстура горной породы. Затем каждому слою частиц в модели назначаются изображения, полученные с соответствующего шлифа, необходимые для калибровки модели по пористости, после этого задаются коэффициенты заполнения порового пространства глинистым цементом в модели. На последнем этапе указываются параметры физической модели, алгоритма калибровки и представления результатов. В итоге, формируется модель пористой среды. Полученная модель используется для моделирования фильтрационных процессов в пористой среде пласта [7].

Модель микроструктуры зерна, полученная с помощью алгоритма стохастической упаковки микрочастиц с уплотнением, может быть использована в качестве основы для последующего анализа порового пространства. После проведения перехода от упаковки частиц к поровой сетевой модели, с помощью молекулярной динамики рассчитывается проводимость одиночных каналов. Для оценки абсолютной проницаемости смоделированной микроструктуры в дальнейшем может быть использована электрогидродинамическая аналогия, при этом для каждой неизолированной поры (открытая пористость) выполняется закон сохранения массы. Таким образом, для сетевой модели порового пространства составляется система линейных уравнений относительно давления в каждой поре. Оценка падения давления на образце дает возможность рассчитать абсолютную проницаемость по закону Дарси. Для численного моделирования потоков газа и флюидов на макроскопическом масштабе также может быть использован метод конечных объемов. Реализация данного метода должна быть адаптирована для

многофазных систем, а алгоритм должен позволять достигать высокой точности поля давлений.

В предлагаемой цифровой модели ядра адсорбция веществ в его микроструктуре может быть исследована с помощью метода Монте-Карло в жесткой, то есть с неподвижными частицами, модели ядра. В данном случае в качестве входного параметра модели используется химический потенциал, а не давление, поэтому для определения давления адсорбированного вещества при определенном химическом потенциале используется специальная симуляция метода Монте-Карло для одного резервуара в изобарическо-изотермальном ансамбле. Расчет методом молекулярной динамики запускается из равновесной конфигурации, полученной с помощью симуляций методом Монте-Карло, затем модель приводится в равновесное состояние. Для интегрирования уравнений движения используется скоростной алгоритм Верле. Температура модели контролируется с «помощью» термостата Берендсона или Нойза-Хувера. Из симуляций молекулярной динамики, с помощью расчета среднеквадратичного смещения, используя уравнение Эйнштейна, получают величины диффузности для требуемых условий. Для описания свойств фильтрационного потока рассчитывается среднеквадратичное отклонение центра масс частиц в модели, что соответствует скорректированной диффузности или диффузности Максвелла-Стефана. Полученные коэффициенты диффузии в дальнейшем используются для оценки проводимости одиночных каналов цифровой модели ядра с помощью модели Кнудсена.

При этом число Кнудсена для может быть определено в соответствии с [128] как:

$$K_n = \frac{1}{2 * \sqrt{2 * \pi * l_y * d_i^2}} \quad (2.2)$$

где l_y – толщина наноканалов, нм; d_i – диаметр молекулы, нм.

Стоит отметить, что при увеличении числа Кнудсена, сила, действующая на каждую частицу, увеличивается, таким образом и скорость движения частиц также

увеличивается. Кроме того, при увеличении числа Кнудсена скорость скольжения вблизи стенок поровых каналов тоже должна расти, но из-за изменения количества числа частиц также изменяются и потенциалы взаимодействия между частицами фильтрующей среды и частицами, слагающими стенки поровых каналов, и поэтому можно наблюдать некоторое уменьшение скорости скольжения вблизи стенок поровых каналов.

Таким образом, вопросы создания и совершенствования технологии цифрового моделирования керна, приводят к необходимости многомасштабного моделирования и нахождения решений ряда задач. На практике, каждый из вышеприведенных методов реализован в одном, или чаще всего, нескольких программных пакетах, имеющих близкую сферу применения, но часто в данных пакетах применяются различные алгоритмы и подходы к решению задач, различна их реализация. При проведении комплексных исследований, подобных тем, которые описаны в выше приведенном примере, необходимо организовать последовательную работу различных программных пакетов, таким образом, чтобы результат работы одного пакета подавался в качестве входных данных для последующего. Следует отметить, что универсальные стандарты на форматы входных и выходных данных для подобного рода исследований отсутствуют, и как следствие, у специалистов появляется необходимость постоянной корректировки данных в промежутке от вывода одного вычислительного пакета на ввод для другого. В некоторых случаях данная проблема может быть решена с помощью использования дополнительного программного обеспечения необходимого для конвертации форматов, или простого преобразования одних структур данных в другие, но, тем не менее, универсальных средств, применимых к данной задаче, на сегодняшний день не существует. Автоматизация построения рабочих потоков, когда с помощью промежуточного программного обеспечения организуется последовательное выполнение задач необходимыми программными пакетами и передача данных от одного пакета к другому, позволила бы значительно сократить время, требуемое для проведения вычислительных экспериментов. Такая

автоматизация также позволит избежать ошибок, которые могут появляться при неправильном переносе и вводе данных специалистами.

Одним из возможных подходов к интеграции разнородного программного обеспечения, является организация взаимодействия через единое хранилище, когда результат работы какого-либо программного пакета будет преобразован в некоторый общий формат, сохранен в хранилище, и, в последствии, необходимые данные для запуска следующего пакета будут извлекаться из хранилища, путем преобразования из общего формата во входные данные следующего в рабочем потоке программного продукта.

Данный подход также позволяет реализовывать концепцию «коллективного разума». Данный подход может иметь большое значение, принимая во внимание, тот факт, что многие задачи цифрового моделирования ядра требуют значительных вычислительных ресурсов и запуска вычислительных пакетов на высокопроизводительных вычислительных системах.

Цифровая модель ядра может быть, как простой, включающей в себя возможность расчета какого-либо одного показателя, либо состоять из вложенных моделей. Нами предлагается использовать комплексную цифровую модель ядра терригенных коллекторов нефти, включающую в себя модель микроструктуры ядра, численные модели проницаемостей и фильтрационно-емкостных свойств ядра и другие модели [27]. Все вышеуказанные модели интегрируются в единую виртуальную оболочку, создаваемую с целью предоставления средства, позволяющего предсказать характеристики поведения флюидов в различных пластовых условиях.

В процессе создания цифровой модели ядра предполагается частичное наполнение микроструктуры цеменитами, проницаемость которых определяется посредством численных экспериментов молекулярной динамики и моделированием течений в микроканалах, что позволит увеличить предсказательную точность модели.

Особенность предложенной методологии по созданию цифровой модели ядра заключается в том, что имитационная модель микроструктуры ядра

работает на основе большого количества параметров, получаемых в ходе литолого-петрографических исследований шлифов, экспериментальных данных по физическому моделированию различных процессов на реальных образцах керна и других исследований. В работе цифровой модели керна также используются аналитические зависимости, полученные на основе анализа геофизических исследований скважин. Всё это позволяет построить цифровую модель керна, которая в ряде случаев может давать адекватные результаты по ряду свойств нефтенасыщенных пластов даже при полном отсутствии керна материала. Работа модели направлена на то чтобы результаты вычислительного эксперимента по определению фильтрационных и других свойств керна соответствовали результатам лабораторных исследований керна.

В предлагаемой цифровой модели керна применяется моделирование микротечений, происходящих в пласте. Комплексный подход к построению модели керна, описанный в работе, имеет серьезную научную новизну и перспективы дальнейшего развития.

Научная новизна предлагаемой цифровой модели керна, обусловлена её комплексностью, а также междисциплинарностью исследований, проведенных при её создании. Помимо этого, важным фактором, определяющим научную новизну предлагаемой модели, является её построение на основе визуального анализа, данных, полученных в ходе геофизических исследований скважин, сопоставления результатов вычислительных экспериментов, полученных на суперкомпьютере, и результатов лабораторных экспериментов.

2.3 Анализ эффективности методов, используемых при цифровом моделировании керна с применением метода молекулярной динамики

В последние годы метод молекулярной динамики нашел широкое применение в различных областях знаний в качестве математического метода для моделирования структуры вещества и динамики процессов, происходящих в нем. При помощи данного метода у специалистов появляется возможность

динамического моделирования различных процессов на молекулярном уровне. При этом метод молекулярной динамики позволяет учитывать взаимодействия частиц на межатомном уровне и изучать физические макрохарактеристики веществ. Данные взаимодействия математически описываются с помощью различных потенциалов и уравнений. Благодаря этому метод молекулярной динамики позволяет рассчитывать те или иные свойства терригенных коллекторов нефти, с возможностью рассмотреть процессы, происходящие в пласте с высоким разрешением. Исходя из этого использование метода молекулярной динамики в цифровом моделировании ядра позволит учитывать процессы, происходящие в пласте на микроуровне. Всё это говорит о теоретической эффективности метода молекулярной динамики для моделирования процессов, происходящих в микроструктуре порового пространства.

По информации [93] важным положительным фактором моделирования методом молекулярной динамики является возможность решать задачи в нескольких шкалах. К примеру модель может работать для комплексной системы, в состав которой входят молекулы, имеющие сильные внутренние напряжения и мягкие потенциалы; молекулы, которые имеют сильное притяжение, которое плавно изменяется с расстоянием; молекулы, имеющие как тяжелые, так и легкие атомы в своей структуре одновременно. Метод молекулярной динамики также позволяет работать с моделью при различных температурах. Для этого используются специальные математические механизмы, называемые «термостатами». Данные механизмы позволяют моделировать температуру модели. Нами предлагается использовать «термостат» Берендсона или Нойза-Хувера. Термостат Нойза-Хувера является цепочным, благодаря чему сложность вычислительных алгоритмов при цифровом моделировании ядра увеличивается незначительно. По информации [20] основным преимуществом термостата Нойза-Хувера является его обратимость по времени и правильное описание моделируемого ансамбля, то есть распределение как конфигураций, так и импульсов соответствуют ансамблю NVT , в котором под N понимается количество частиц в модели, V – объем модели, T – температура.

Работы с методом Монте-Карло хорошо подходят для изучения критических проблем путем моделирования. В работе по созданию цифровой модели ядра одной из таких проблем является адекватная генерация плотной стохастической упаковки для моделирования гранулометрического состава породы исходя из распределения размеров её зерен. По информации [93] метод Монте-Карло является надежным и систематичным для подобного рода исследований.

На сегодняшний день хорошая эффективность работы цифровой модели ядра не может быть достигнута без использования серьезных вычислительных мощностей. Предлагаемая цифровая модель ядра создается на базе вычислительного кластера гибридной архитектуры, содержащего 20 узлов совокупной производительности 15 ТФлопс и файловую систему емкостью 50 ТБ. В работе используется большое количество различного программного обеспечения, среди которого имеется и хорошо зарекомендовавшие себя в рамках решения задачи, связанных с моделированием методом молекулярной динамики LAMMPS [20, 112], и программное обеспечение, необходимое для качественного моделирования процессов методом Монте Карло, например, МССС Towhee.

Для эффективного моделирования микроструктуры ядерного материала в качестве моделируемых частиц необходимо использовать геометрические фигуры сложной формы, которые наиболее сильно схожи с реальными частицами горных пород. В предлагаемой нами цифровой модели ядра геометрические параметры моделируемых частиц могут быть подобраны из изображений шлифов путем машинного обучения или из результатов обнаружения частиц во время исследований по определению гранулометрического состава горных пород методом лазерной дифракции.

Определение геометрических параметров моделируемых частиц из изображений шлифов путем машинного обучения позволяет извлечь контекстно-зависимые значения лексем из результатов литолого-петрографических исследований шлифов для их последующей кластеризации по фотографиям.

По данным [60] основной проблемой математического описания микроструктуры порового пространства при цифровом моделировании ядра

является нехватка исходных данных о ее гранулометрическом составе, а именно неполнота информации о расположении частиц в модели и их геометрической форме. В следствии этого построение модели порового пространства пород, с достаточной точностью имитирующей микроструктуру керна, сводится к задаче нахождения значений входных данных, отвечающих за характеристики гранулометрического состава.

Используемая в предлагаемой цифровой модели керна плотная стохастическая упаковка с добавлением процедуры дилатации для учета деформации микрочастиц, а также калибровка модели по пористости, с учетом глинистости пород позволяют максимально приблизить создаваемую математическую модель к физической. Адекватность использования данного подхода частично подтверждается в работах [60, 62].

Методика, заключающаяся в первоначальном моделировании частиц горной породы в виде фигур сферической формы, и случайном их распределении с дальнейшим ростом сфер и переходом к фигурам более сложной формы, позволяет избежать проблем, связанных с невозможностью правильной укладки моделируемых частиц. Подобные проблемы часто наблюдаются при изначальном моделировании микроструктуры порового пространства фигурами сложной геометрической формы.

Одной из основных ошибок исследователей, работавших с созданием цифровых моделей керна в прошлом, является отсутствие учета влияния глинистости на фильтрационные и другие свойства создаваемых модели, что в конечном счете привело к сильному отклонению полученных результатов проницаемости в сторону повышения. Особенно это заметно в моделях, прогнозирующих фильтрационные свойства для низкопроницаемых коллекторов.

В работе [145] на основании законов фрактального масштабирования были получены выражения определяющие вероятностный диаметр поровых каналов и проницаемость:

$$\lambda_i = \left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} \right) * \frac{\lambda_{max}}{(1-R_i)^{\frac{1}{D_f}}} \quad (2.3)$$

$$K = G * A^{\frac{-(1+D_t)}{2}} \sum_{i=1}^J \lambda_i^{(3+d_t)} \quad (2.4)$$

где

$$\left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} \right) = \frac{\sqrt{2}}{d^+} * \sqrt{\frac{(1-\varphi_c)}{(1-\varphi_e)}} \quad (2.5)$$

$$\lambda_{max} = \frac{R_c}{2} * \left(\sqrt{2 * \left(\frac{1-\varphi_c}{1-\varphi_e} - 1 \right)} + \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}} * \frac{1-\varphi_c}{1-\varphi_e} \right) - 2} \right) \quad (2.6)$$

При этом в работе [146] открытая пористость в бидисперсной пористой среде определялась по формуле:

$$\varphi_e = \frac{\left(A - \frac{\pi * R_c^2}{2} \right) + \left(\frac{\varphi_c * \pi * R_c^2}{2} \right)}{A} \quad (2.7)$$

где φ_e - открытая пористость, %; φ_c - открытая пористость в микрокластере, %; R_c - средний радиус поровых каналов в кластере, мм; d^+ - отношение среднего диаметра поровых каналов в кластере к минимальному размеру частиц, мм; λ_i - диаметр капиллярной трубки, выбранной методом Монте-Карло, мм; λ_{min} - минимальный диаметр капиллярной трубки, выбранной методом Монте-Карло, мм; λ_{max} - максимальный диаметр капиллярной трубки, выбранной методом Монте-Карло, мм; D_t - ортогональность фрактальной размерности; D_f - фрактальная размерность пересекающихся сечений пор с плоскостью, перпендикулярной направлению потока; K - оценочная проницаемость, 10^{-3} мкм²; A - площадь поперечного сечения кластера, мм², G - геометрический параметр потока в капилляре круглого сечения, мм².

По данным [142] средний радиус зерен в пласте может быть определен через пористость в уравнении Козени-Кармана:

$$r = \sqrt{72 * \tau^2 * K} * \left(\frac{1 + \varphi_c - \varphi_e}{(\varphi_e - \varphi_c)^{3/2}} \right) \quad (2.8)$$

где r - средний радиус зерен в породе-коллекторе, мм; K - оценочная проницаемость, 10^{-3} мкм²; τ - извилистость фильтрующихся каналов; φ_e - открытая пористость, %; φ_c - открытая пористость в микрокластере, %.

Отсюда оценочная проницаемость породы коллектора будет определяться по формуле:

$$K = \frac{r^2}{72 * \tau^2 * K * \left(\frac{1 + \varphi_c - \varphi_e}{(\varphi_e - \varphi_c)^{3/2}}\right)^2} \quad (2.9)$$

В работе [143], посвященной исследованиям фильтрационных потоков в микроканалах порового пространства методами молекулярной динамики указано, что потоки жидкости в микроканалах до сих пор не до конца изучены и все еще являются предметом исследований, поток в еще меньших наноканалах, всё больше вызывают интерес со стороны научного сообщества.

Предлагаемая цифровая модель зерна предполагает частичное наполнение микроструктуры цементами, проницаемость которых определяется посредством численных экспериментов молекулярной динамики и моделированием течений в микроканалах, что позволяет увеличить предсказательную точность модели.

Интегрирование модели микроструктуры зерна, численных моделей проницаемости и фильтрационно-емкостных свойств зерна и другие модели позволяют более детально оценить свойства порового пространства пород-коллекторов и повысить точность, получаемых результатов.

Автоматизация построения рабочих потоков, проводимая с помощью промежуточного программного обеспечения, позволяет значительно сократить время, требуемое для проведения вычислительных экспериментов в условиях отсутствия универсальных стандартов на форматы входных и выходных данных, используемых в программах по моделированию.

Проведенный анализ показывает эффективность предлагаемой нами цифровой модели зерна. Однако, реальная эффективность работы метода молекулярной динамики, а также других используемых в предлагаемой нами цифровой модели зерна подходов и методов, может быть подтверждена только в ходе сравнения полученных экспериментальных данных с результатами, полученными в ходе математического моделирования.

Выводы по главе 2

Выявлен ряд необходимых для создания предлагаемой цифровой модели ядра технологических решений, с использованием высокопроизводительных вычислений. К таким технологическим решениям относятся моделирование микроструктуры ядра, 3D реконструкция и анализ порового пространства ядра, литолого-петрографический анализ шлифов при помощи микроскопа и другое.

Установлены и обоснованы этапы моделирования порового пространства цифровой модели ядра необходимые для моделирования фильтрационных процессов в пористой среде пласта.

Оценена эффективность математических моделей и методов, применяемых в предлагаемой автором цифровой модели ядра.

Проведенный анализ предварительных результатов показывает эффективность предлагаемой автором цифровой модели ядра. Для ее более представительной оценки необходимо продолжить накапливать результаты сравнения экспериментальных данных, полученных в ходе лабораторных исследований, с данными математического моделирования.

ГЛАВА 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНА

3.1 Анализ результатов экспериментальных исследований по оценке фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов

С целью получения экспериментальных данных, необходимых для проведения вычислительных экспериментов на суперкомпьютере, в работе были проведены исследования по оценке фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.

Для проведения исследований были выбраны десять образцов керна стандартного размера. В качестве коллектора был выбран терригенный песчаник Berea Sandstone (USA). Выбор данного коллектора обусловлен его гомогенностью, как по вещественному составу, так и по фильтрационно-емкостным свойствам, а также его широким признанием со стороны специалистов нефтяной промышленности при проведении прикладных исследований и тестирования различных технологий.

По выбранным образцам были определены коэффициенты абсолютной газопроницаемости, коэффициенты открытой пористости, коэффициенты проницаемости по флюиду в пластовых условиях и другие показатели. В качестве насыщающего флюида использовался керосин.

Образцы правильной формы изготавливались из горной породы путем бурения, обрезки, обточки и шлифовки в соответствии с ГОСТ 26450.0-85 [21].

В дальнейшем на образцах были определены коэффициенты абсолютной газопроницаемости при стационарной фильтрации и линейном потоке газа в соответствии с требованиями ГОСТ 26450.2-85 [23]. В качестве газа использовался азот. Для определения коэффициента абсолютной газопроницаемости использовался учебно-исследовательский газовый пермеаметр, оснащенный высокоточными дифференциальными манометрами, обеспечивающий

определение проницаемости с высокой степенью точности. По данным [89] принцип измерений в газовом пермеамetre аналогичен работе установке по определению абсолютной проницаемости.

Коэффициент абсолютной газопроницаемости для стационарной фильтрации при линейном потоке газа определялся по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{10^{-3} * Q * \mu * P_{бар} * L}{\Delta P \left(\frac{\Delta P}{2} + P_{бар} \right) * F} \quad (3.1)$$

где K_{Γ} - коэффициент абсолютной газопроницаемости, измеренный при заданном среднем давлении в образце, 10^{-3} мкм²; Q - расход газа, замеренный на выходе из образца, см³/с; μ - вязкость газа при условиях фильтрации, мПа*с; ΔP - перепад давления на образце между входом и выходом, МПа; $P_{бар}$ - барометрическое давление, МПа; L - длина образца, см; F - площадь поперечного сечения образца, см².

Коэффициенты открытой пористости образцов определялись в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 [22].

Для определения коэффициента открытой пористости образцы предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре (105 ± 2) °С до постоянной массы M_1 с погрешностью до 0,0001 г.

Перед взвешиванием образцы охлаждали в эксикаторе над прокаленным хлористым кальцием. В этих же эксикаторах образцы хранились до насыщения рабочей жидкостью. В качестве рабочей жидкости использовался керосин.

Для насыщения образцов керна рабочей жидкостью использовалась установка для насыщения образцов «Ручной сатуратор» (Рисунок 3.1). По данным [89] «Ручной сатуратор» обеспечивает современный способ насыщения образцов керна жидкостью.



Рисунок 3.1 – Ручной сатуратор

Насыщение образцов рабочей жидкостью проводилось следующим образом: сухие взвешенные образцы устанавливали в ячейку сатуратора; в колбу сатуратора заливалась рабочая жидкость; образцы и рабочая жидкость отдельно вакуумировались. Керосин вакуумировался до прекращения интенсивного выделения пузырьков газа. Время вакуумирования выбиралось в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 [22].

По истечении времени вакуумирования в ячейку задавливалась рабочая жидкость для создания условий насыщения.

Взвешивание насыщенных образцов проводилось с погрешностью до 0,0001 г.

После окончания процесса насыщения образцы взвешивались гидростатически, определялась масса образцов, погруженных в жидкость – M_2 .

После завершения гидростатического взвешивания, проводилось взвешивание насыщенных образцов в воздухе - M_3 .

Коэффициент открытой пористости определялся по формуле:

$$K_{\text{п}} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} * 100, \quad (3.2)$$

где K_n – коэффициент открытой пористости, %; M_1 - масса сухого образца горной породы, г; M_2 - масса насыщенного жидкостью образца горной породы в насыщающей жидкости, г; M_3 - масса насыщенного жидкостью образца горной породы в воздухе, г.

Результаты определения коэффициентов открытой пористости и абсолютной газопроницаемости образцов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты определения коэффициентов открытой пористости и абсолютной газопроницаемости образцов

№ образца	Длина, см	Диаметр, см	Коэффициент абсолютной газопроницаемости, 10^{-3} мкм ²	Коэффициент открытой пористости, %
1	3,068	3,003	101,01	20,11
2	2,682	2,997	125,64	20,42
3	3,110	2,999	130,25	17,99
4	2,722	2,996	96,43	18,89
5	2,743	3,002	85,82	17,48
6	2,854	3,003	91,64	18,55
7	2,974	2,995	121,13	19,63
8	3,580	2,995	101,032	18,07
9	2,967	2,997	97,22	18,52
10	3,630	3,003	83,64	18,79

На следующем этапе образцы донасыщались неполярным керосином на установке УИК - 5(7) (Рисунок 3.2) для дальнейшего определения коэффициентов проницаемости керна по керосину в зависимости от пластовой температуры.



Рисунок 3.2 - Фильтрационная установка УИК – 5(7)

Таблица 3.2 - Основные технические характеристики УИК –5(7)

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Максимальное горное давление	МПа	80
Максимальное пластовое давление	МПа	40
Максимальное эффективное давление	МПа	40
Максимальная температура	°С	150
Основная относительная погрешность измерения абсолютного давления	%	±0,15
Основная относительная погрешность измерения дифференциального давления	%	±0,1
Точность измерения температуры кернодержателя	°С	± 0,5
Точность поддержания температуры кернодержателя	°С	± 0,25
Время непрерывной работы	-	не лимитируется

Установка УИК – 5(7) обеспечивает:

- поддержание стабилизированной пластовой температуры кернодержателя;
- поддержание стабилизированной пластовой температуры образца керна;
- поддержание стабилизированного горного давления на образце керна,
- поддержание стабилизированного пластового давления внутри образца керна;
- поддержание стабилизированного пластового давления при изменении горного давления;
- поддержание постоянного эффективного давления при изменении пластового и горного давлений;
- поддержание постоянного давления на выходе из образца керна при фильтрации жидкости и газа;
- создание, поддержание и измерение постоянного расхода газа при фильтрации через образец керна;
- поддержание заданного расхода при фильтрации жидкости или газа через образец керна;
- поддержание заданных фазовых соотношений при фильтрации двух фаз через образец керна;

- измерение перепада давления на образце керна при фильтрации жидкостей и газа;
- поддержание заданного перепада давления на образце керна за счет изменения расхода жидкости или газа в процессе фильтрации;
- высокоточное измерение объемов жидкости и газа при фильтрации;
- высокоточное измерение объемов жидкости на выходе из образца керна в пластовых и атмосферных условиях;
- электрическую изоляцию и измерение электрического сопротивления образца керна.

Обеспечение указанных параметров работы установки позволяет определять свойства пород-коллекторов в соответствии с принятыми государственными и отраслевыми стандартами.

Управление работой установки УИК-5(7) автоматизировано и обеспечивается управляющей программой, разработанной на базе специализированного пакета LabView 6i. Управляющая программа позволяет проводить управление установкой как в ручном, так и в автоматизированном виде.

Первоначально в фильтрационной системе создавалось горное и пластовое давления, а также пластовая температура. После поднятия давления в системе, керосин прокачивался в объеме (3-4)х объемов пор модели. В ходе экспериментов определение проницаемостей осуществлялось в соответствии с ОСТ 39-235-89 [68].

Проницаемость керна по керосину определялась по формуле:

$$K_{\text{прж}} = \frac{Q_{\text{ж}} * \mu * l}{\Delta P_{\text{дм}} * F}, \quad (3.3)$$

где $\Delta P_{\text{дм}}$ - перепад давления по дифференциальным манометрам, МПа; $K_{\text{прж}}$ - коэффициент проницаемости по жидкости, 10^{-3} мкм²; $Q_{\text{ж}}$ - расход жидкости в условиях эксперимента, см³/с; F - площадь поперечного сечения образца, см²; L - длина участка образца, на котором измерялся перепад давления, см; μ - динамическая вязкость жидкости, мПа*с.

Фильтрация керосина на каждом из заданных режимов осуществлялась до достижения стационарности, фиксируемой по стабилизации показаний датчиков дифференциального давления. После достижения стабилизации на каждом из режимов фильтрации фиксировались данные по проницаемости. По каждому образцу были проведены эксперименты на 10 температурных режимах.

График изменения проницаемости образцов керна по керосину от температуры представлен на рисунке 3.3.

В целом динамика изменения проницаемости керна по керосину в зависимости от пластовой температуры показывает, что с увеличением температуры наблюдается снижение проницаемости коллектора. Стоит отметить, что данная зависимость может значительно отличаться для других терригенных коллекторов.

В работе [36] указано, что увеличение пластовой температуры при постоянном эффективном давлении приводит либо к монотонному увеличению или уменьшению проницаемости во всем диапазоне температур, либо к появлению инверсий на температурных трендах: проницаемость уменьшается, достигает минимального значения, затем увеличивается.

Также авторами работы [36] указывается, что микротрещины разной геометрии по-разному ведут себя при нагревании. При увеличении температуры количество, раскрытие и связанность микротрещин с высоким коэффициентом формы увеличивается, у микротрещин с низким коэффициентом формы - уменьшается. В условиях одновременного воздействия высоких температур и давлений эти процессы происходят параллельно, поэтому на температурных трендах проницаемости могут возникать инверсии.

При математическом моделировании керна важным фактором, влияющим на значения коэффициента проницаемости, является пластовая температура. Это подтверждают исследования, проведенные на образцах керна месторождения Buff Berea.

Результаты, полученные в ходе исследований по определению фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород-коллекторов, в дальнейшем использовались для валидации цифровой модели керна.

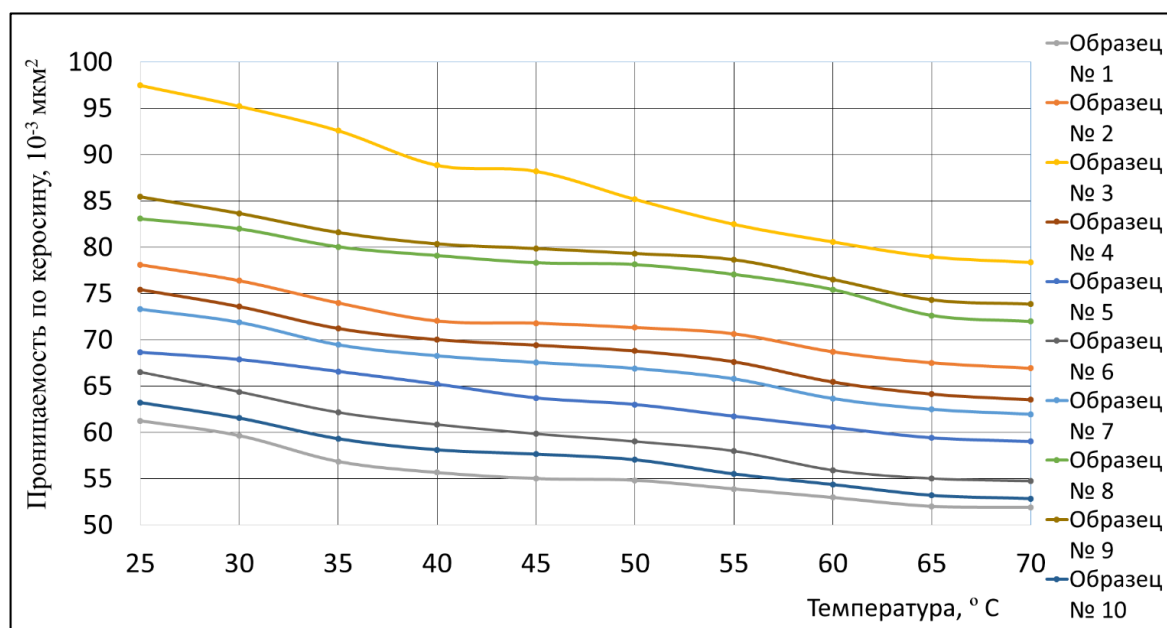


Рисунок 3.3 – График изменения проницаемости керна в зависимости от температуры

Также в работе были проведены исследование по определению гранулометрического состава терригенного песчаника Berea Sandstone (USA) методом лазерной дифракции.

3.2 Анализ экспериментальных исследований по оценке литолого-петрографических характеристик терригенных коллекторов

По данным [32] литологический состав и структура являются одними из наиболее важных признаков, определяющих качество осадочных пород-коллекторов. Для создания цифровой модели керна необходимо иметь четкое представление о микроструктуре порового пространства, литологическом составе и структуре породы, которые являются одними из наиболее важных признаков, определяющих качество осадочных пород-коллекторов.

Повышение степени выработки запасов углеводородов обеспечивается, в частности, путём детального изучения геологического строения и фильтрационной неоднородности межскважинного пространства продуктивных коллекторов [27].

С целью получения данной информации было выполнено петрографическое описание 10 шлифов месторождения терригенного песчаника Berea Sandstone (USA). Петрографические шлифы изготавливались из имеющегося кернового материала произвольно, так как породы данного месторождения достаточно однородны по своему вещественному составу.

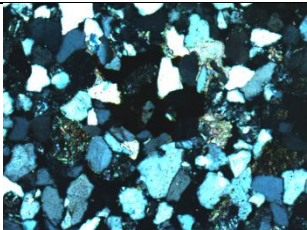
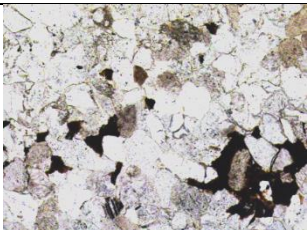
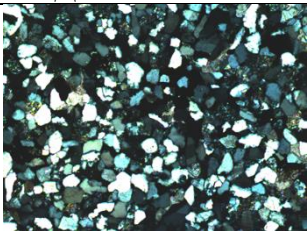
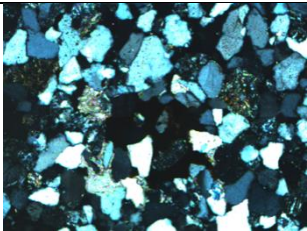
Петрографическое описание показало, что исследуемые породы представлены светло-серыми песчаниками средне-мелкозернистыми, мелко-среднезернистым, которые по данным [79] являются коллекторами преимущественно средней полезной емкостью порового типа III класса.

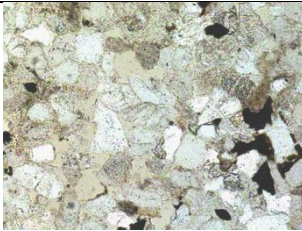
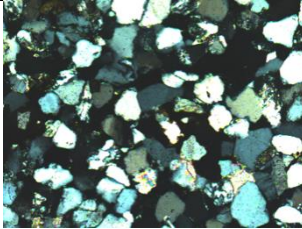
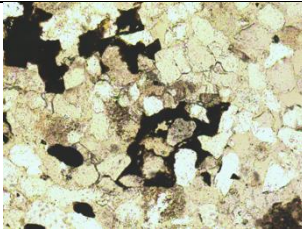
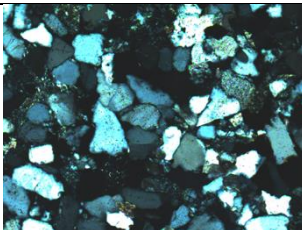
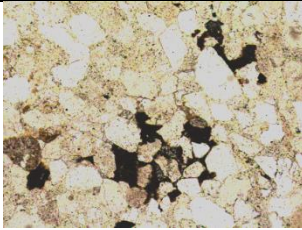
По вещественному составу породы характеризуются содержанием кварца в пределах 70-85%, полевых шпатов 2-5%, обломков горных пород различного генезиса 10-20%, слюд 1-2%. Цемент смешанный: локально развита цементация контактового типа с конформными контактами индивидов; регенерационный кварцевый не превышает 1%; порово-пленочный цемент глинистый 2-5%; аутигенный карбонат выполняет роль порового коррозионного цемента 2-5%.

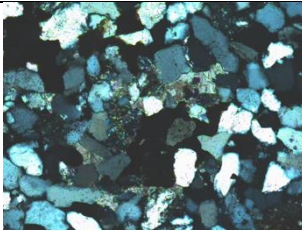
Определение пористости по шлифам проводилось согласно принятым методикам в комплексе литолого-петрографических исследований пород. Следует отметить, что определение пористости по шлифам не всегда отличается высокой точностью.

Так же надо отметить, что в данных породах зерна кварца и обломки пород имеют неправильную форму и полуокатанные частицы, тем самым они укладываются менее плотно, что приводит к увеличению пористости. Результаты исследований шлифов представлены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты исследований шлифов

Шлиф №	Пористость по шлифам, %	Размер зерен, мм	Сортировка	Краткое литологическое описание	Фото шлифов
1	2	3	4	5	6
1	10	0,22-0,40	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко-среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерной пигментацией БОВ. Структура псаммитовая мелко-среднезернистая.	 Увеличение 100х. Поляризованный свет.
2	до 15	0,20-0,45	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко-среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ, пористая. Структура псаммитовая мелко-среднезернистая.	 Увеличение 100х. Дневной свет.
3	10	0,15-0,35	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый средне-мелкозернистый с цементацией контактового типа (уплотнения), карбонатным цементом порового типа, редким кварцевым регенерационным цементом, пятнисто нефтенасыщенный. Текстура пятнистая, обусловленная неравномерным распределением карбонатного материала и БОВ.	 Увеличение 25х. Поляризованный свет.
4	10-12	0,20-0,40	средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко-среднезернистый с комбинированным цементом, неравномерно нефтенасыщенный. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая мелко-среднезернистая.	 Увеличение 100х. Поляризованный свет.

1	2	3	4	5	6
5	10	0,25- 0,40	средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко-среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ. Структура псаммитовая мелко-среднезернистая.	 Увеличение 100х. Дневной свет.
6	10-12	0,22- 0,35	средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко-среднезернистый с цементацией контактового типа, участками с карбонатным цементом порового типа, пигментированный битумом. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая мелко-среднезернистая.	 Увеличение 100х. Поляризованный свет.
7	10-15	0,15- 0,32	средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый средне-мелкозернистый с цементацией контактного типа, регенерационным кварцевым цементом, локально с карбонатным цементом порового типа, пятнисто нефтенасыщенный. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерным нефтенасыщением. Структура псаммитовая средне-мелкозернистая.	 Увеличение 100х. Дневной свет.
8	10	0,25- 0,35	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с цементацией контактного типа, спорадически с карбонатным цементом порового типа и кварцевым регенерационным цементом. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая среднезернистая.	 Увеличение 100х. Поляризованный свет.
9	10	0,25- 0,40	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с цементацией контактного типа, регенерационным кварцевым цементом, спорадически с хлорит-гидролюдистым цементом пленочно-порового типа. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая среднезернистая.	 Увеличение 100х. Дневной свет.

1	2	3	4	5	6
10	10-12	0,22- 0,40	хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ. Структура псаммитовая среднезернистая.	 <p>Увеличение 100х. Поляризованный свет.</p>

В ходе анализа было выявлено, что чем однороднее частицы по величине, тем выше пористость пород. Данный вывод согласуется с результатами работы [3]. Из них следует, что пористость тела, состоящего из одинаковых шаров при кубической укладке, составляет 47,6%, а при плотнейшей ромбоэдрической - 25,96%. Отклонение размеров отдельных шаров от общего размера в обоих случаях будет сопровождаться понижением пористости. Степень понижения пористости зависит от отсортированности (однородности) обломочного материала, при этом, чем ниже отсортированность (однородность) обломков, тем ниже пористость. По данным [3] данная зависимость объясняется тем, что в крупных порах размещаются мелкие обломки горных пород. По данным [63] это также может объясняться тем, что мелкие частицы породы забивают поры песчаника, образованные более крупными частицами.

На величину пористости и проницаемости также влияет степень окатанности обломочного материала. Так обломки горных пород неправильной формы и полуокатанные частицы укладываются менее плотно, чем обломки близкие к правильной форме, что приводит к увеличению пористости.

В терригенном песчанике Berea Sandstone (USA) сортировка обломочного материала хорошая, что является одним из факторов, определяющих относительно высокую пористость данных пород.

В работе, помимо литолого-петрографических исследований пород месторождения терригенного песчаника Berea Sandstone (USA) был выполнен анализ данных литолого-петрографических исследований пород по 5 скважинам месторождений Тимано-Печорской провинции, представленных терригенными

отложениями, с целью выявления основных факторов, определяющих пористость и проницаемость терригенных коллекторов.

По данным [81] пористость горных пород отвечает пространству породы, свободному от твердой минеральной фазы, что теоретически позволяет сделать вывод о том, что размер зерен не должен определять пористость и между распределением частиц породы по размерам и пористостью не существует прямой связи.

Это подтверждают результаты проведенных исследований, в ходе которых было установлено отсутствие прямой связи между средним размером зерен горных пород и пористостью по шлифам по данным литолого-петрографических исследований пород по скважинам месторождений Тимано-Печорской провинции (Рисунок 3.4). Однако на том же рисунке 3.4 просматривается четкая динамика, указывающая на увеличение пористости, определенной по шлифам при увеличении размерности зерен породообразующих минералов.

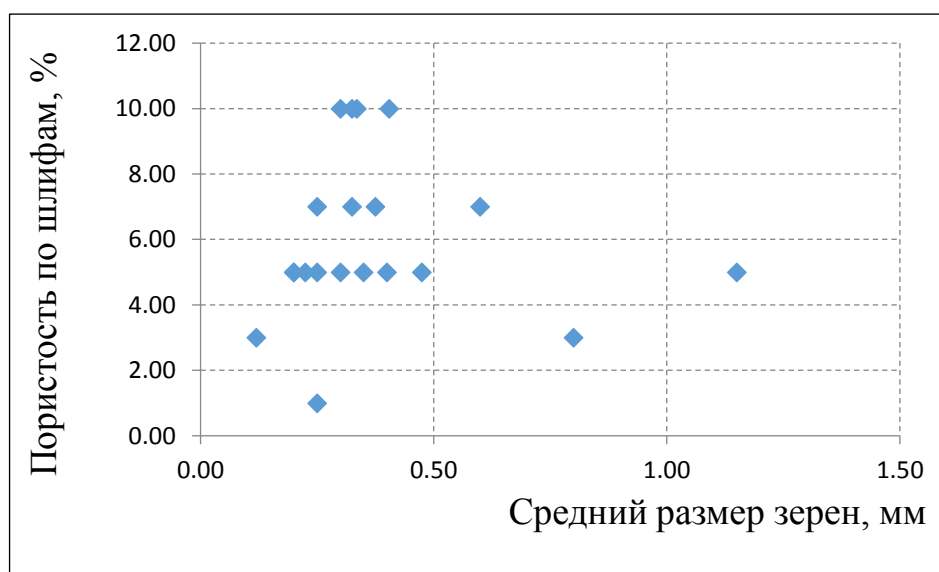


Рисунок 3.4 - Зависимость пористости по шлифам от среднего размера зерен горных пород

Также надо отметить, что в данных породах зерна кварца и обломки пород имеют неправильную форму и полуокатанные частицы, тем самым они укладываются менее плотно, что приводит к увеличению пористости.

Чем более неоднороден песчаник по размерам своих частиц, тем, как правило, меньше пористость, так как мелкие зерна забивают поры песка, образованные крупными частицами. В исследуемых породах сортировка обломочного материала - хорошая.

Результаты литолого-петрографических исследований горных пород в дальнейшем находят своё применение в исследованиях по определению геометрических параметров моделируемых частиц из изображений шлифов путем машинного обучения. Данные исследования позволяют извлечь контекстно-зависимые значения лексем из результатов литолого-петрографических исследований шлифов для их последующей кластеризации по фотографиям и применить латентно-семантический анализ для формирования стохастической упаковки цифровой модели зерна, что положительно влияет на приближение создаваемой цифровой модели зерна к натуральным образцам.

На основе проведенного анализа было установлено, что одним из основных факторов, определяющих пористость и проницаемость терригенных коллекторов, является размерность зерен породообразующих минералов.

Данный вывод хорошо согласуется с первоначальными допущениями разрабатываемой модели, то есть построением микроструктуры породы с помощью упаковки шаров с таким же распределением по их размерам, как и распределение размеров зерен моделируемой породы. Наличие в исследуемых породах зерен кварца и обломков пород, имеющих неправильную форму и полуокатанные частицы, приводит к тому, что частицы укладываются менее плотно, чем если бы они были правильной геометрической формы, что приводит к увеличению пористости.

В связи с этим появляется необходимость в использовании в качестве моделируемых частиц фигуры сложной геометрической формы, например, сфероцилиндров, сфероквадратов и сферокубов при создании цифровой модели зерна. Использование фигур сложной геометрической формы, в качестве моделируемых частиц, позволяет более точно смоделировать свойства породы, и

получить адекватные результаты. Данный вывод хорошо согласуется с результатами работ [10, 61].

В дальнейшем было проведено преобразование исходного изображения одного петрографического шлифа месторождения терригенного песчаника Berea Sandstone с целью установления алгоритма, позволяющего быстро и качественно определять характеристики микроструктуры порового пространства породы для цифрового моделирования керна.

В силу уплотненности исследуемой породы осложняется определение параметров сечения границ зерен. Для решения данной задачи было применено преобразование Хафа в библиотеке алгоритмов компьютерного зрения OpenCV для исследуемого шлифа. Преобразование Хафа предназначено для поиска объектов, принадлежащих определенному классу фигур и основывается на представлении искомого объекта в виде параметрического уравнения. По итогу преобразования было получено изображение (Рисунок 3.5).

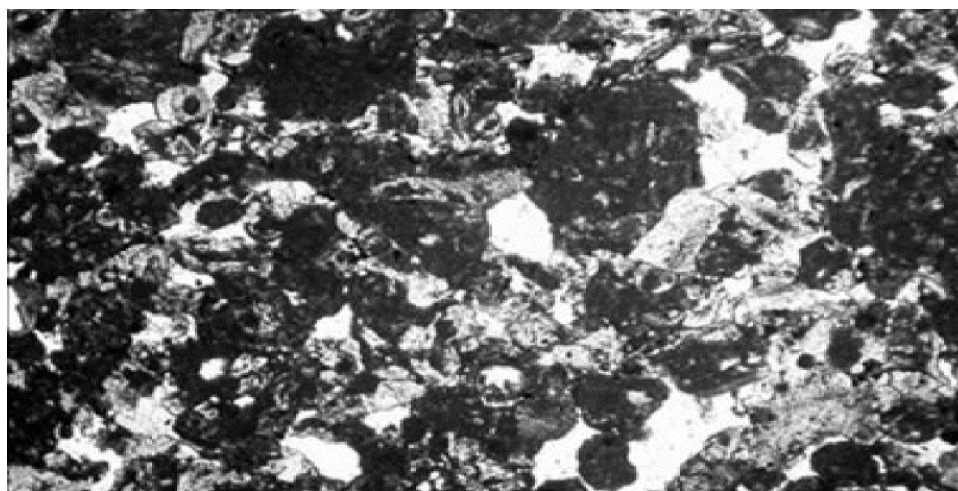


Рисунок 3.5 – Изображение шлифа после преобразования Хафа

В дальнейшем производилось пороговое преобразование изображения шлифа. Обычное пороговое преобразование не учитывает, что зерна породы, представленные на шлифе, могут иметь различную яркость частиц по своей протяженности. Для того чтобы учесть яркость всех частиц зерен использовалось адаптивное пороговое преобразование, которое рассматривает объекты не в одном пикселе, а в его окрестностях. Определение положения частиц производилось

путем преобразования яркости пикселя в его окрестностях через весовые коэффициенты в соответствии с гауссовой функцией. Результат порогового преобразования шлифа представлен на Рисунке 3.6.

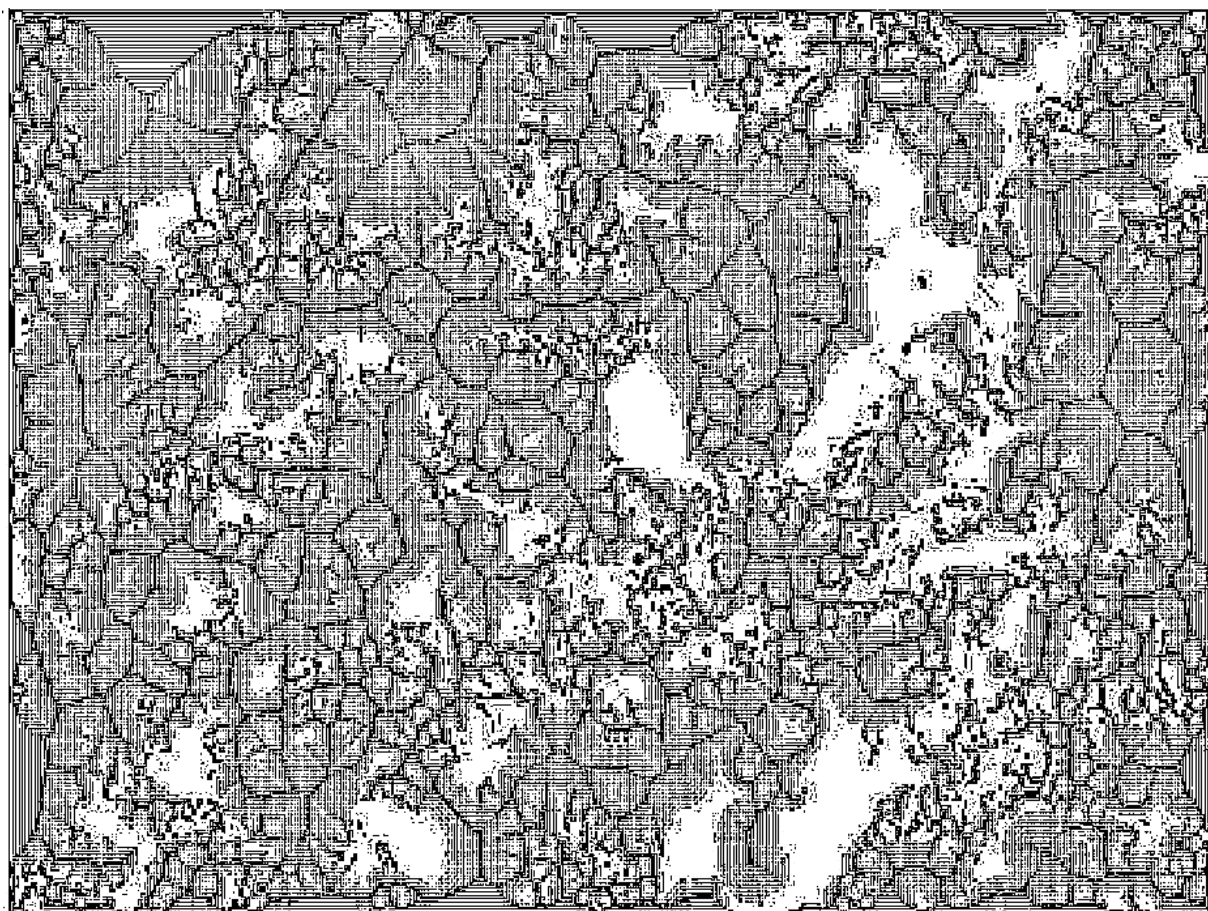


Рисунок 3.6 – Результат порогового преобразования шлифа

Пороговое преобразование позволило более четко определить положения зерен в микроструктуре исследуемой породы. Следующим шагом было морфологическое преобразование изображения, необходимое для определения площади пустотного пространства шлифа. На данном этапе производилась замена цвета зерен породы на черный, а пустотного пространства на белый.

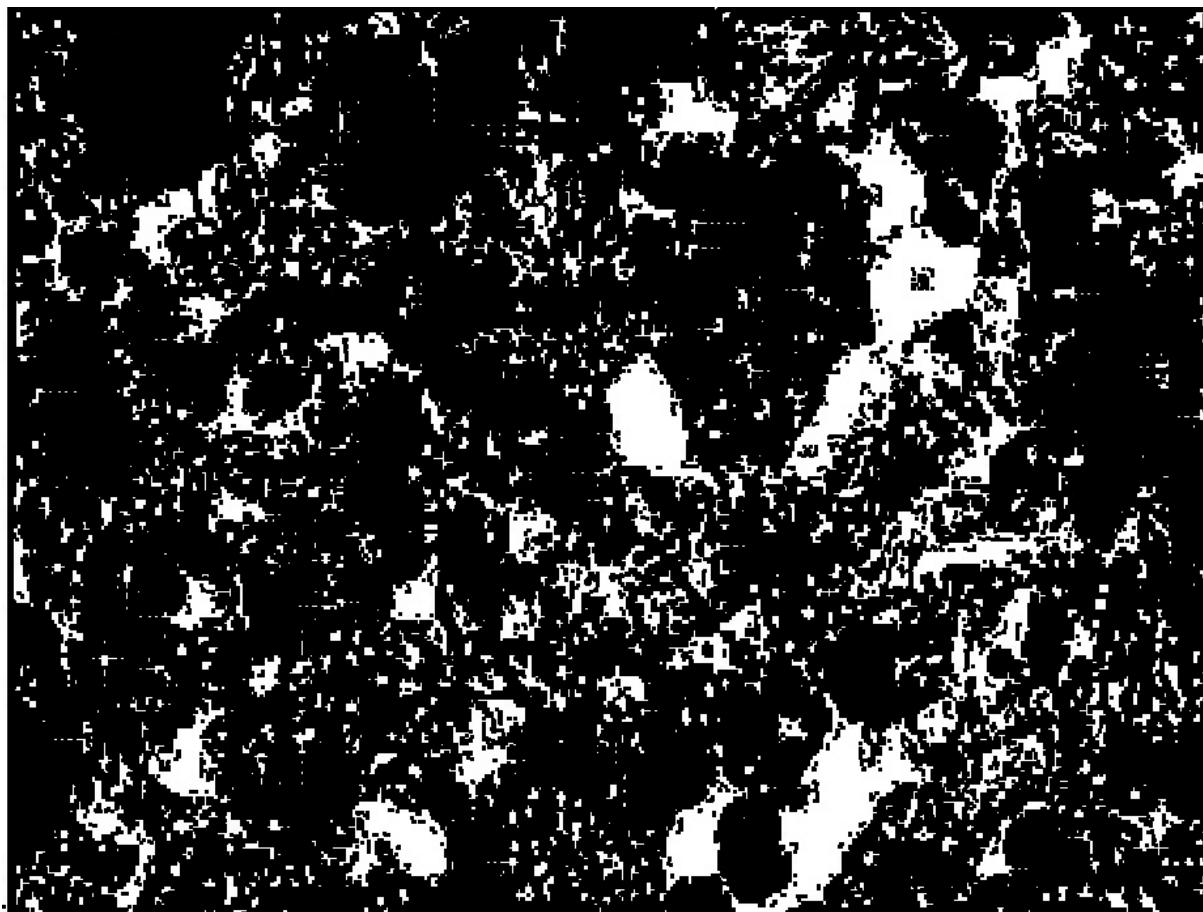


Рисунок 3.7 – Результат морфологического преобразования шлифа

На последнем этапе производился подсчет черных и белых пикселей и деление количества белых пикселей на общее количество пикселей, что соответствует петрографическому методу определения пористости.

Существует множество проверенного программного обеспечения, позволяющего качественно и быстро проводить определение структуры пустотного пространства петрографических шлифов по предложенному алгоритму. Реализация данного алгоритма может быть применима в цифровом моделировании керна для формирования структуры порового пространства породы. Сама технология использования машинного зрения для описания шлифов может быть тиражирована на любые другие геологические объекты, где имеется достаточный набор описанных шлифов [62].

3.3 Сравнительный анализ результатов исследований терригенных коллекторов нефти с результатами цифрового моделирования керна

В работе были проведены исследования по определению проницаемости керна по керосину на цифровой модели керна. Определение проницаемости производилось по двум структурам. Первая структура представляла из себя плотную стохастическую упаковку микрочастиц, вторая – микроструктуру керна, смоделированную методом молекулярной динамики.

В полученных структурах цифровой модели керна производился переход от представления упаковки частиц к представлению поровой сетевой модели. Проводимость поровых каналов в модели рассчитывалась с помощью методов молекулярной динамики. Таким образом, для сетевой модели порового пространства терригенного коллектора составлялась система линейных уравнений относительно давления в каждой поре.

На начальном этапе работы рассматривалась упрощенная модель геометрического строения микроструктуры порового пространства, представляющая из себя цилиндр, плотно заполненный сферами различного диаметра. Распределение диаметров сфер было рассчитано по результатам лабораторных исследований по определению гранулометрического состава горных пород методом лазерной дифракции. В дальнейшем по результатам исследований литолого-петрографических шлифов производилась корректировка моделируемых частиц.

Упаковка шаров производилась в процессе проведения симуляции молекулярной динамики. В цилиндре, образованном аналогом углеродной нанотрубки хиральности Z, с учетом используемого Ван-дер-Ваальсового радиуса взаимодействия углерода, ограниченного снизу графеновой плоскостью, проводилась симуляция молекулярной динамики с частицами, распределение которых соответствовало распределению, полученному по результатам лабораторных исследований по определению гранулометрического состава горных пород методом лазерной дифракции.

На основании результатов, полученных в ходе лабораторных исследований, расстояние между атомами углерода в нанотрубке и графеновой плоскости, а также Ван-дер-Ваальсовый радиус взаимодействия углерода были выбраны равным 20 микрон и 25 микрон соответственно, хиральность Z таким образом составила 2720. В качестве потенциала межатомного взаимодействия был выбран потенциал Леннарда-Джонса:

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (3.4)$$

где σ - радиус Ван-дер-Ваальса; ϵ - параметр взаимодействия поперечного сечения.

Потенциал Леннарда-Джонса был использован в работе [143]. В проведенном моделировании данный параметр варьировался от 0.1 при слабом взаимодействии до 1.0 при нейтральном взаимодействии. Радиус Ван-дер-Ваальса использовался в соответствии с радиусом соответствующей частицы, а параметры взаимодействия поперечного сечения определялись с использованием правила смешивания Лоренца-Бертело:

$$\epsilon_{ij} = (\epsilon_{ii}\epsilon_{jj})^{\frac{1}{2}}, \sigma_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_{ii} + \sigma_{jj}) \quad (3.5)$$

где σ - радиус Ван-дер-Ваальса; ϵ - параметр взаимодействия поперечного сечения.

В процессе моделирования была применена гравитационная сила. Моделируемая температура постепенно уменьшалась. Для поддержания температуры использовался «термостат» Берендсона. Расчеты проводились в программном пакете, предназначенном для симуляции молекулярной динамики LAMMPS. По данным [143] использование термостата Берендсена позволяет пренебрегать рассеиваемой энергией, не оказывая сильного влияния на поле потока при относительно небольших скоростях сдвига.

Для определения объема порового пространства, пробный атом с определенным Ван-дер-Ваальсовым радиусом проходил через координатное пространство цилиндра.

Для расчета использовался метод матричной прогонки. Матричная прогонка относится к прямым методам решения разностных уравнений. По сравнению с другими прямыми методами решения разностных задач матричная прогонка более универсальна, так как позволяет решать уравнения с переменными коэффициентами и не накладывает сильных ограничений на вид граничных условий.

В результате моделирования микроструктуры керна была построена система микроканалов, в которой для определения проницаемости нашел своё применение метод электродинамической аналогии. Процесс движения жидкости в модели был «заменен» на процесс течения тока по цепи с сопротивлением и, соответственно, задача нахождения проницаемости горной породы в сети микроканалов пористой среды, была «заменена» на задачу нахождения силы тока в электрической цепи. Фильтрационные течения при этом были представлены через сеть связанных электрических сопротивлений. Решив задачу нахождения полного сопротивления, может быть определена общая проницаемость модели. Из-за высокой степени сложности решения задачи нахождения полных сопротивлений, они корректировались методом подбора.

По результатам моделирования была получена зависимость проницаемости цифровой модели керна от температуры (Рисунок 3.8). Схожие зависимости, были получены по результатам лабораторных исследований физических образцов керна (см. рисунок 3.3). Полученные результаты показали хорошую сходимость.

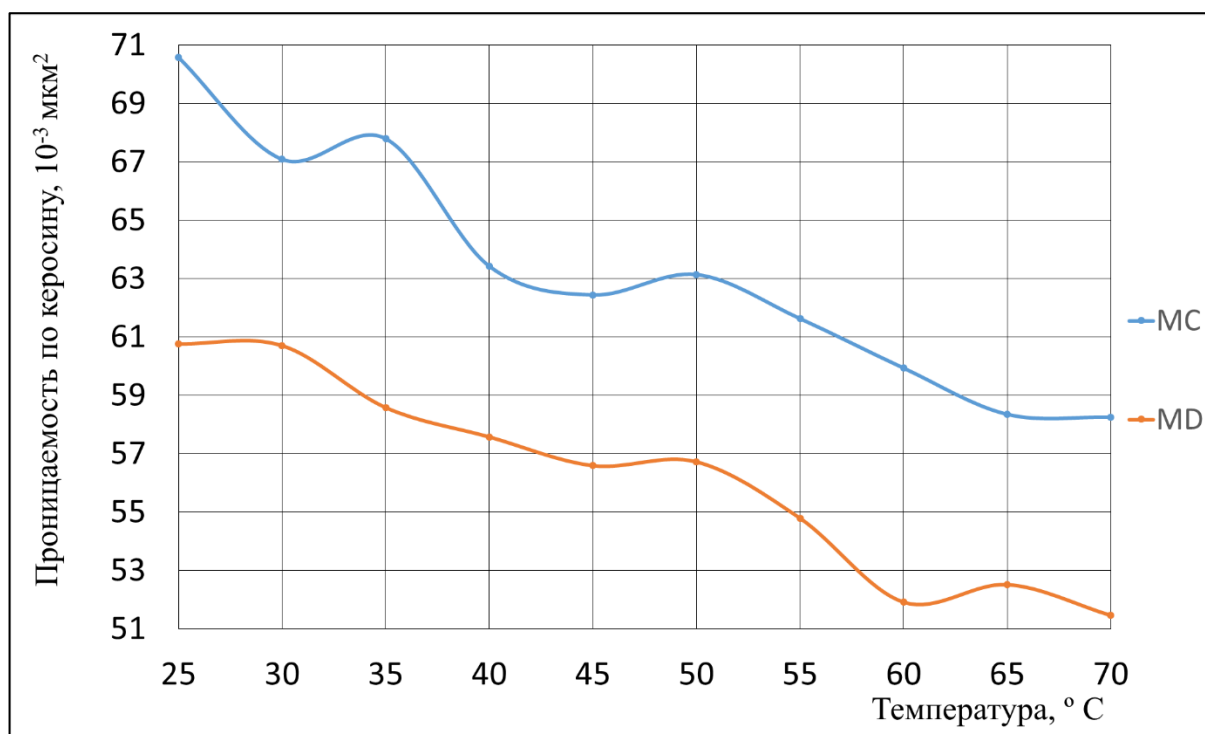


Рисунок 3.8 – График изменения проницаемости цифровой модели ядра в зависимости от температуры (MC – структура, представленная плотной стохастической упаковкой микрочастиц; MD – структура, смоделированная методом молекулярной динамики)

3.4 Применение теории перколяции при цифровом моделировании ядра

При исследовании неоднородных сред методами компьютерного эксперимента широко используется модель (теория) перколяции [77]. Теория перколяции применяется для описания связанных структур в случайных кластерах, состоящих из отдельных элементов.

По данным [99] увеличение размеров частиц в реальных пористых системах приводит к увеличению связности пор, что, в свою очередь, сказывается на росте открытой пористости и проницаемости породы. Аналогичное явление должно быть применимо и к цифровой модели ядра.

Представления теории перколяции позволяют описать строение порового пространства, беря в рассмотрение отдельные проводящие каналы и объединяя их в кластеры, тем самым получая микронеоднородную решетку капилляров, выступающую в роли модели пористой среды [12].

При создании цифровой модели ядра терригенных коллекторов методом молекулярной динамики теория перколяции может быть применена путем разделения плотной стохастической упаковки частиц на кластеры и последующего определения полного электрического сопротивления в каждом из них при использовании метода электродинамической аналогии для определения проницаемости.

В ходе проведения исследований по применению метода электродинамической аналогии для расчета проницаемости всей цифровой модели ядра были выявлены значительные сложности в определении полного сопротивления электрической цепи модели. Для решения задачи нахождения полного электрического сопротивления цепи при цифровом моделировании ядра можно воспользоваться моделью (теорией) перколяции, которая широко используется при исследовании неоднородных сред [77].

После разделения плотной стохастической упаковки на кластеры выводится зависимость порога перколяции поровых каналов от их объема. После этого аналитическими методами может быть определено электрическое сопротивление среды. Далее проводится расчет силы тока и перевод полученных значений в абсолютную газопроницаемость.

В итоге, исходя из полученных значений абсолютной газопроницаемости в каждом кластере, определяется общая абсолютная газопроницаемость модели.

При этом под порогом перколяции поровых каналов будет пониматься минимальное количество поровых каналов в кластере при которых будет происходить движение тока.

По данным [65] формальное определение порога перколяции основывается на использовании функции мощности перколяционного кластера, которая соответствует вероятности того, что случайно выбранный узел решетки будет принадлежать перколяционному кластеру.

В работе [77] было выявлено, что исходя из наблюдаемой контр-аналогии с перколяционными свойствами твердых частиц, можно предположить, что низкие значения перколяционного порога поровых каналов свойственны

низкоэнтропийным системам, в частности системам с неравномерным распределением плотности заполнения.

Применение теории перколяции при создании цифровой модели ядра методом молекулярной динамики способно значительно облегчить задачу нахождения полного электрического сопротивления при цифровом моделировании ядра методом электродинамической аналогии и позволит более точно определить общую абсолютную газопроницаемость модели.

В результате применения теории перколяции по каждому кластеру стохастической упаковки выводится массив данных, представляющий собой информацию о том в каких узлах кластера и каким образом необходимо пересчитывать поле электрических сопротивлений и каждую из трех ортогональных компонент силы тока.

Обязательным условием для пересчета компоненты, параллельной некоторой координатной оси, является необходимость содержания грани, на которой расположен узел сетки по компоненте скорости для обеих ячеек, которые должны быть свободными, т.е. относящимися к пустотному пространству [38].

После того как поля электрических сопротивлений по каждому из кластеров будут просчитаны, представляется возможность осуществить их перевод в перепады давления и рассчитать коэффициент абсолютной газопроницаемости каждого из кластеров по закону Дарси:

$$K_{\text{абс}} = \frac{Q_{\text{г}} * \mu * l}{\Delta P_{\text{дм}} * F}, \quad (3.6)$$

где $\Delta P_{\text{дм}}$ - перепад давления по дифференциальным манометрам, МПа; $K_{\text{абс}}$ - коэффициент абсолютной газопроницаемости, 10^{-3} мкм²; $Q_{\text{г}}$ - расход газа в условиях эксперимента, см³/с; F - площадь поперечного сечения образца, см²; l - длина участка образца, на котором определяется перепад давления, см; μ - динамическая вязкость азота, мПа*с.

Проводимость одиночного канала между порами в приближении сети цилиндров при этом описывается по закону Пуазейля и может быть рассчитана по формуле:

$$g = \frac{\pi * r^3}{4h}, \quad (3.7)$$

где g - проводимость одиночного канала, см²; r - радиус пор, см; h - высота цилиндра, см.

В дальнейшем рассчитывается общая проводимость каналов в кластере. В соответствии с [16] в качестве граничного условия на обтекаемой газом поверхности может быть использована модель диффузного отражения.

При использовании данной модели могут быть получены выражения теплового и массового потоков как функций от градиентов давления. Представленные результаты в дальнейшем находят применение для обоснования достоверности результатов численного моделирования.

Для описания динамики движения газов в пористых средах используется большое количество различных критериев подобия, то есть минимальных требований и условий, при соблюдении которых обеспечивается близость реальных рассматриваемых течений к моделируемым.

В случае описания непрерывной среды при изучении динамики движения газов число критериев подобия значительно возрастает.

Аналитические решения задачи нахождения электрического сопротивления в кластерах цифровой модели ядра могут быть найдены в рамках кинематического подхода.

Так в работах [111, 138, 141] вычислен массовый поток в задачах о тепловом крипе и течении Пуазейля в промежуточном режиме на основе S-модели кинетического уравнения с применением численных методов.

Следует отметить что в известных работах [15, 16, 111, 138, 141] массовый поток рассчитывался для разряженных газов в каналах поперечное сечение которых представляет собой правильные геометрические фигуры, например прямоугольник или круг.

В случае определения абсолютной газопроницаемости реальных керновых моделей в качестве газа используется неразряженный азот, а поровые каналы имеют сложную геометрическую форму как в поперечном сечении так и по длине поровых каналов, что значительно осложняет применение аналитических уравнений для решения задачи нахождения электрического сопротивления модели.

В основе определения абсолютной газопроницаемости образцов керна лежит закон Дарси, соответствующий линейному потоку газа.

Соотношение градиента давления от величиной потока может быть определено в условиях одномерной установившейся фильтрации вдоль его продольной оси с помощью соотношений аналогичных закону Дарси [54]:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{1}{K_{\Pi}} * \frac{q}{\rho} * \mu = \frac{1}{K_{\Pi}} * \frac{u}{v} * \frac{\mu^2}{\rho} \quad (3.8)$$

где ΔP - перепад давления, МПа; h - длина участка образца, на котором определяется перепад давления, см; ρ - плотность газа, г/см³; μ - динамическая вязкость газа, мПа*с; v - кинематическая вязкость газа, см²/с; Q - расход газа, см³/мин; K_{Π} - коэффициент абсолютной проницаемости, 10⁻³ мкм².

В дальнейшем в работе [54] была выведена зависимость 3.9, являющаяся аналогом зависимости по определению коэффициентов, которые использовались при обобщении результатов определения коэффициентов проницаемости в работах [49, 50, 52, 53]:

$$K_{\Pi}^{-1} = f\left(\frac{u}{v}\right) \quad (3.9)$$

где K_{Π} - коэффициент абсолютной газопроницаемости, 10⁻³ мкм²; u - скорость фильтрации, см/мин; v - кинематическая вязкость газа, см²/с.

По данным [50] зависимости 3.9 для каждого коллектора являются индивидуальными и независимо от характера и особенностей структуры исследуемых образцов имеют один и тот же вид. С ростом параметра (u/v) коэффициент абсолютной газопроницаемости будет являться относительно постоянным (максимальным) в ограниченном диапазоне режимов фильтрации, а затем уменьшается до минимального значения, достигаемого на режиме с

критическим истечением при максимально допустимом градиенте давления газа на выходе из образца.

При этом в работах [44, 47] в данных зависимостях не наблюдалось значительных смещений значений проницаемости относительно друг друга при одних и тех же значениях параметра (u/v), но различных значениях давления, перепадов давления, динамической и кинематической вязкостей фильтруемого газа. Характер зависимости 3.9 не связан со свойствами фильтруемого газа, а является характеристикой проницаемой среды и однозначно определяется её структурой.

В таблице 3.4 представлены результаты определения абсолютной газопроницаемости образцов керна терригенного песчаника Berea Sandstone (USA).

Таблица 3.4 - Результаты определения коэффициентов абсолютной газопроницаемости образцов керна терригенного песчаника Berea Sandstone (USA).

№ образца	Длина, см	Диаметр, см	Площадь поперечного сечения, см ²	Расход газа, см ³ /мин	Скорость фильтрации, см/мин	Перепад давления, МПа	Коэффициент абсолютной газопроницаемости, 10 ⁻³ мкм ²
1	3,068	3,003	7,079	254,32	35,925	0,03181	101,01
2	2,682	2,997	7,051	248,65	35,265	0,02769	125,64
3	3,110	2,999	7,060	210,53	29,819	0,02076	130,25
4	2,722	2,996	7,046	235,25	33,387	0,02096	96,43
5	2,743	3,002	7,074	198,64	28,079	0,01939	85,82
6	2,854	3,003	7,079	285,65	40,351	0,03007	91,64
7	2,974	2,995	7,041	189,45	26,905	0,02178	121,13
8	3,580	2,995	7,041	211,50	30,036	0,02590	101,032
9	2,967	2,997	7,051	225,10	31,925	0,02188	97,22
10	3,630	3,003	7,079	231,40	32,688	0,03406	83,64

По результатам проведенных исследований можно рассчитать значение параметра (u/v) для каждого образца (Таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Результаты определения параметра (u/v)

№ образца	Скорость фильтрации, см/мин	Кинематическая вязкость азота, см ² /с	Параметр ($\frac{u}{v}$)
1	35,925	13,725	2,617
2	35,265	13,725	2,569
3	29,819	13,725	2,173
4	33,387	13,725	2,433
5	28,079	13,725	2,046
6	40,351	13,725	2,940
7	26,905	13,725	1,960
8	30,036	13,725	2,188
9	31,925	13,725	2,326
10	32,688	13,725	2,382

В дальнейшем по полученным значениям выстраивается график зависимости коэффициента абсолютной газопроницаемости от параметра ($\frac{u}{v}$) (Рисунок 3.10) и график зависимости коэффициента абсолютной газопроницаемости от перепада давления (Рисунок 3.11).

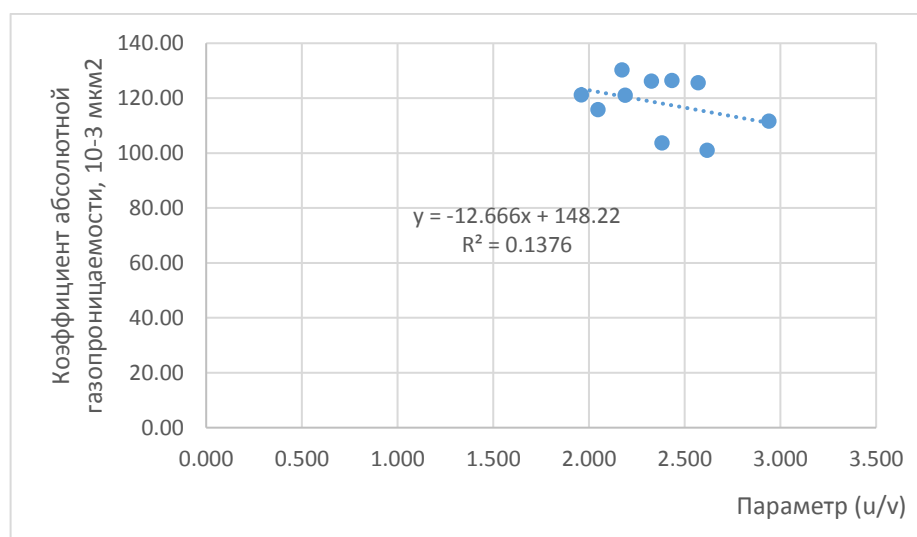


Рисунок 3.10 – График зависимости коэффициента абсолютной газопроницаемости от параметра ($\frac{u}{v}$).

По аналогии выстраиваем зависимость коэффициента проницаемости от перепада давления (Рисунок 3.11).

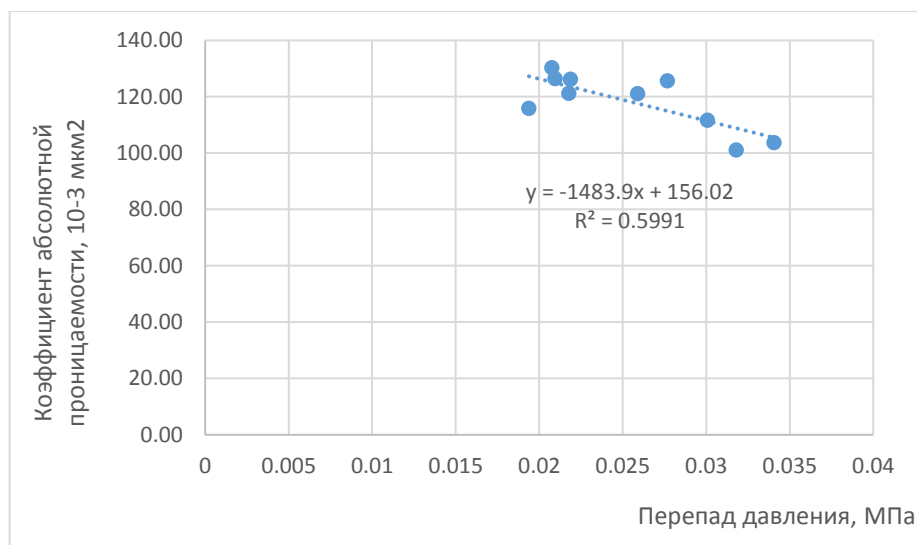


Рисунок 3.11 – График зависимости коэффициента абсолютной газопроницаемости от перепада давления.

Характер кривых на Рисунках 3.10 и 3.11 является схожим, что позволяет произвести переход от параметра $\left(\frac{u}{v}\right)$ к перепаду давления при определении абсолютной газопроницаемости цифровой модели керна. При этом кинематическая вязкость моделируемого газа и скорость фильтрации являются исходными параметрами для моделирования.

Тогда в формуле определения абсолютной газопроницаемости 3.6 можно произвести переход от перепада давления к параметру $\left(\frac{u}{v}\right)$ с введением поправочного коэффициента K_p .

Поправочный коэффициент был рассчитан путем деления значения параметра $\left(\frac{u}{v}\right)$ на перепад давления по каждому из 10 исследуемых образцов и дальнейшего определения среднего арифметического значения. Значение вычисленного поправочного коэффициента составило 93,169 для исследуемого коллектора.

В дальнейшем было определено отклонение вычисленных значений абсолютной газопроницаемости от абсолютной газопроницаемости, определенной экспериментально. Среднее отклонение $\frac{\Delta K}{K}$ составило 11,67%.

При этом в соответствии с требованиями ГОСТ 26450.2-85 [23] суммарная погрешность $\frac{\Delta K}{K}$ при определении абсолютной газопроницаемости варьируется в диапазоне от 9,3 до 22,9 %. Таким образом только одно из десяти значений вычисленной проницаемости не соответствует заявленной точности.

Результаты вычислений приведены в Таблице 3.6.

Таким образом абсолютную газопроницаемость модели при цифровом моделировании керна можно определить по формуле:

$$K_{\text{абс}} = \frac{Q_{\Gamma} * \mu * l}{\left(\frac{u}{v}\right) * K_{\text{р}} * F}, \quad (3.10)$$

где $K_{\text{абс}}$ - коэффициент абсолютной газопроницаемости, 10^{-3} мкм²; Q_{Γ} - расход газа, см³/мин; F - площадь поперечного сечения образца, см²; L - длина участка образца, на котором определяется перепад давления, см; μ - динамическая вязкость азота, мПа*с; (u/v) - параметр (u/v) ; $K_{\text{р}}$ - поправочный коэффициент.

Таблица 3.6 – Результаты определения абсолютной газопроницаемости и вычисленной абсолютной газопроницаемости.

№ образца	Абсолютная газопроницаемость, 10^{-3} мкм ²	Вычисленная абсолютная газопроницаемость, 10^{-3} мкм ²	Отклонение $\frac{\Delta K}{K}$, %
1	101,01	116,61	13,37
2	125,64	128,61	2,31
3	130,25	118,20	10,19
4	126,43	103,45	22,21
5	115,82	104,25	11,10
6	111,64	108,47	2,92
7	121,13	127,84	5,25
8	121,032	136,07	11,05
9	126,22	112,77	11,93
10	103,64	140,77	26,38

Применение данного подхода при цифровом моделировании ядра позволит с достаточной степенью точности определять абсолютную газопроницаемость цифровых моделей ядра.

Для исследования перколяционных свойств кластеров цифровой модели ядра и увеличения точности определения абсолютной газопроницаемости моделей представляется возможным по аналогии с представленным расчетом провести определения вычисленной абсолютной газопроницаемости в каждом из кластеров и в дальнейшем определить общую вычисленную абсолютную газопроницаемость модели.

Результаты определения абсолютной газопроницаемости цифровой модели ядра, в целом показали достаточную сходимость с результатами, полученными по образцам реальных пород-коллекторов терригенного песчаника.

В ходе выполнения работ также проводились исследования по созданию цифровых моделей ядра терригенных пород-коллекторов нефти Тимано-Печорской провинции с дальнейшим определением по ним открытой пористости и абсолютной газопроницаемости.

Те же эксперименты были проведены по физическим образцам в соответствии с ГОСТ 26450.1-85, ГОСТ 26450.2-85. Результаты показали хорошую сходимость. Среднее отклонение при определении открытой пористости по четырем образцам составило 5,48 %. Среднее отклонение при определении абсолютной газопроницаемости составило 12,53 %. Результаты определения открытой пористости и абсолютной газопроницаемости образцов терригенных пород-коллекторов нефти определенные на физических образцах и на цифровой модели ядра представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Результаты определения открытой пористости и абсолютной газопроницаемости образцов терригенных пород-коллекторов нефти определенные на физических образцах и на цифровой модели керна

№ образца	Абсолютная газопроницаемость, 10^{-3} мкм ²	Вычисленная абсолютная газопроницаемость, 10^{-3} мкм ²	Отклонение $\frac{\Delta K}{K}$, %	Открытая пористость, %	Вычисленная открытая пористость, %	Отклонение $\frac{\Delta K}{K}$, %
1	48,91	54,90	12,25	16,10	16,82	4,28
2	9,29	10,61	12,44	8,30	8,84	6,11
3	590,50	702,34	15,92	18,40	18,96	2,95
4	848,01	937,22	9,51	18,60	20,35	8,60

Выводы по главе 3

По результатам выполненных исследований по оценке фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов и литолого-петрографических исследований шлифов проведен сравнительный анализ результатов лабораторных исследований керна с результатами цифрового моделирования.

Результаты выполненных исследований по оценке фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов в дальнейшем могут быть использованы для валидации цифровой модели керна. Результаты литолого-петрографических исследований шлифов в дальнейшем могут быть использованы при определении геометрических параметров моделируемых частиц цифровой модели.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН В ЦИФРОВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КЕРНА

4.1 Анализ геофизических данных нейтронного каротажа для установления зависимости проницаемости по керну от пористости по ГИС в целях применения в цифровой модели керна

С целью установления зависимостей проницаемости по керну от пористости по ГИС для проведения вычислительных экспериментов при цифровом моделировании керна в работе был проведен анализ геофизических данных по 5 скважинам месторождений с терригенными коллекторами Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. В терригенных коллекторах существует корреляционная связь между проницаемостью и пористостью, наличие которой широко используется для определения проницаемости через пористость при интерпретации геофизических исследований скважин [18].

Исследовались терригенные разрезы скважины № 301 Верхне-Грубешорского месторождения, скважины № 2 Восточно-Саратаюского, , скважины № 117 Картыельского, скважин № 26 и № 27 Ошского месторождений.

В исследуемых скважинах пористость определялась по данным различных геофизических методов. Первоначально, для анализа использовались результаты определения пористости по данным нейтронного, акустического и гамма-гамма каротажей. Было установлено, что значения пористости, полученные по данным различных каротажей в исследуемых скважинах сопоставимы, а определения проводились с поправками на глинистость с учетом литологии коллектора. В дальнейшем, для проведения анализа были выбраны коэффициенты пористости, полученные по данным нейтронного каротажа. Данный выбор обусловлен тем, что при установлении зависимостей проницаемости по керну от пористости по ГИС, результаты нейтронного каротажа показали наиболее высокую сходимость. Интервалы отбора брались по выносу керна.

Также был проведен анализ результатов определения основных фильтрационно-емкостных свойств пласта на керновом материале по тем же скважинам. Для анализа использовались результаты определения коэффициентов пористости в атмосферных и пластовых условиях, а также результаты определения проницаемости по нефти в пластовых условиях. Затем проводилось сопоставление результатов определения проницаемости по нефти в пластовых условиях на керновом материале с результатами определения пористости по данным нейтронного каротажа. Далее проводился корреляционный анализ связей «керна-ГИС».

Для построения полноценных зависимостей проницаемости по нефти от пористости по ГИС были построены дополнительные связи. Для 3 скважин, в которых количество значений проницаемости оказалось недостаточным для установления адекватных зависимостей были построены графики сопоставления коэффициентов проницаемости по нефти и коэффициентов проницаемости по газу (Рисунки 4.1, 4.2, 4.3). Это позволило получить дополнительные точки для дальнейшего построения нужных корреляционных связи проницаемости по нефти от пористости по ГИС.

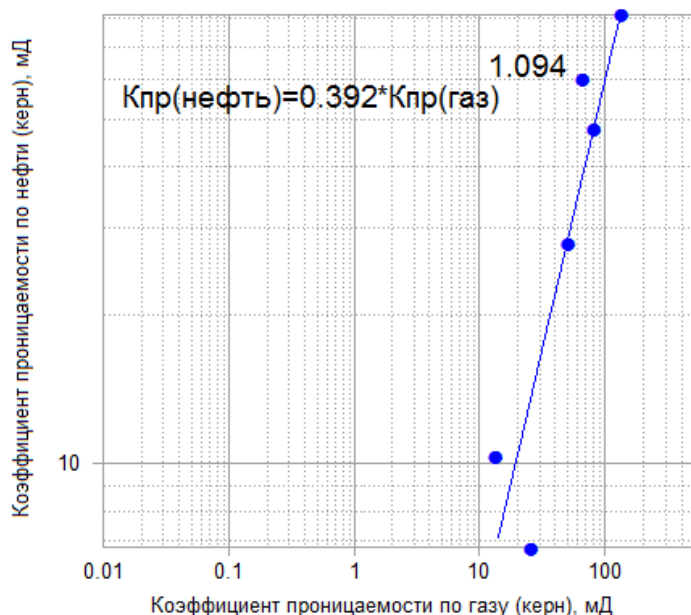


Рисунок 4.1 - Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти и коэффициентов проницаемости по газу для первой скважины

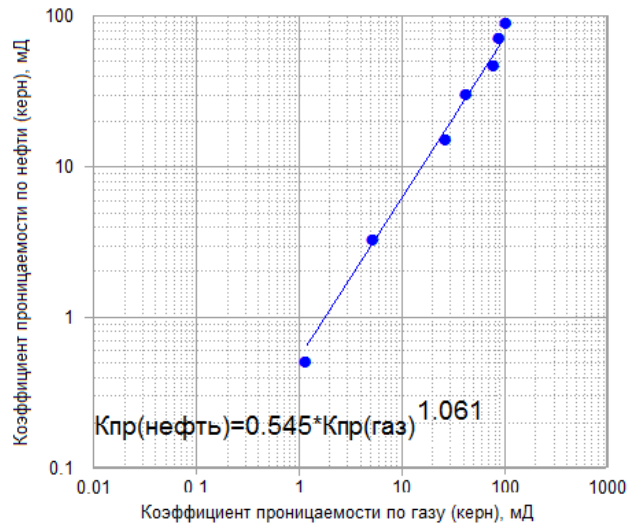


Рисунок 4.2 - Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти и коэффициентов проницаемости по газу для второй скважины

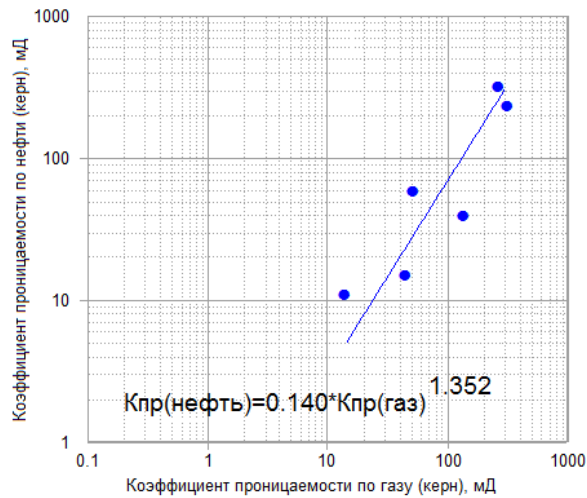


Рисунок 4.3 - Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти и коэффициентов проницаемости по газу для третьей скважины

После сопоставления коэффициентов проницаемости по нефти и коэффициентов проницаемости по газу были рассчитаны вычисленные коэффициенты проницаемости. Далее было проведено установление зависимостей коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС по всем скважинам (Рисунок 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8).

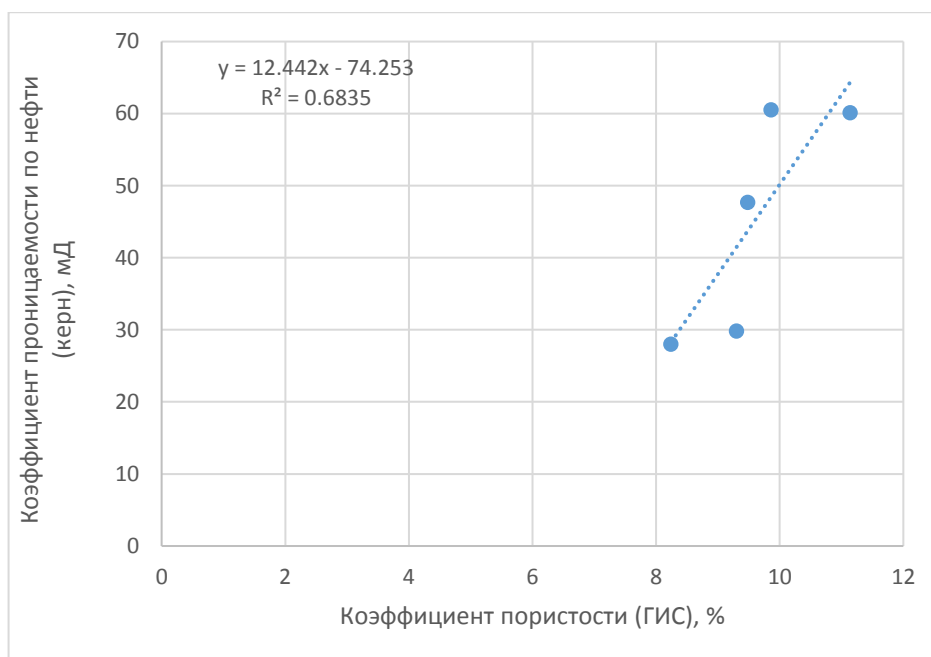


Рисунок 4.4 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для первой скважины

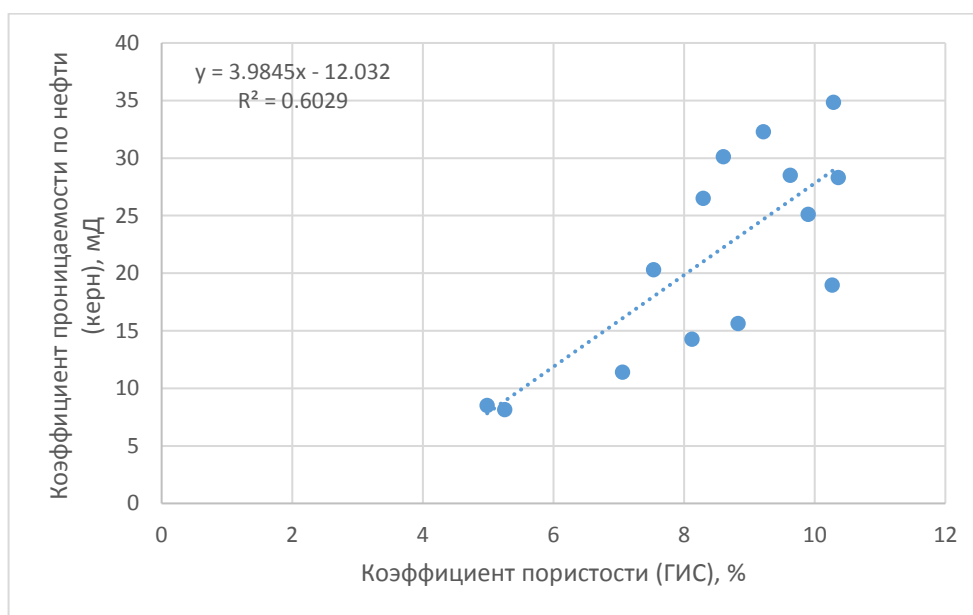


Рисунок 4.5 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для второй скважины

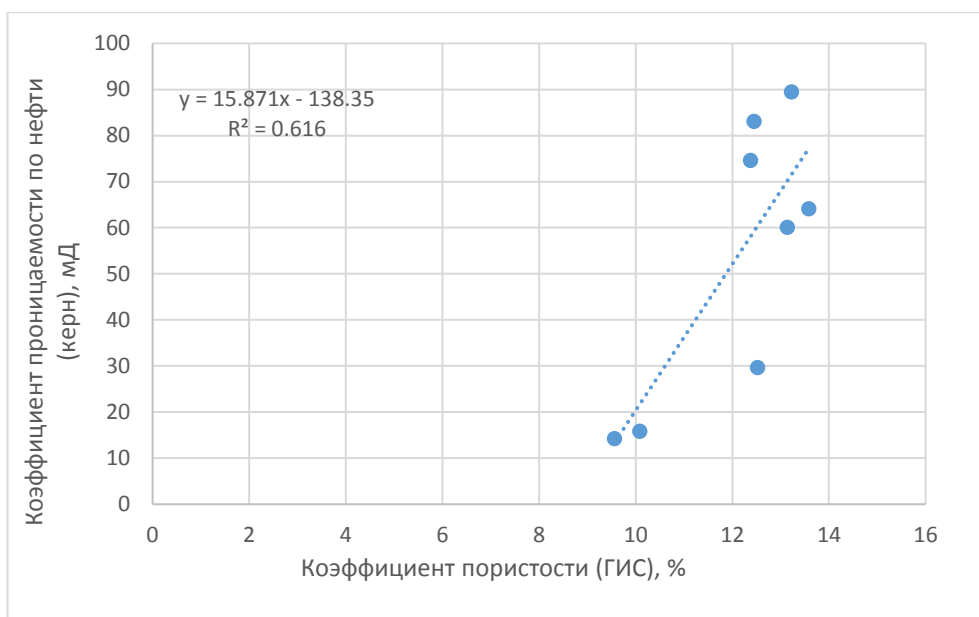


Рисунок 4.6 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для третьей скважины

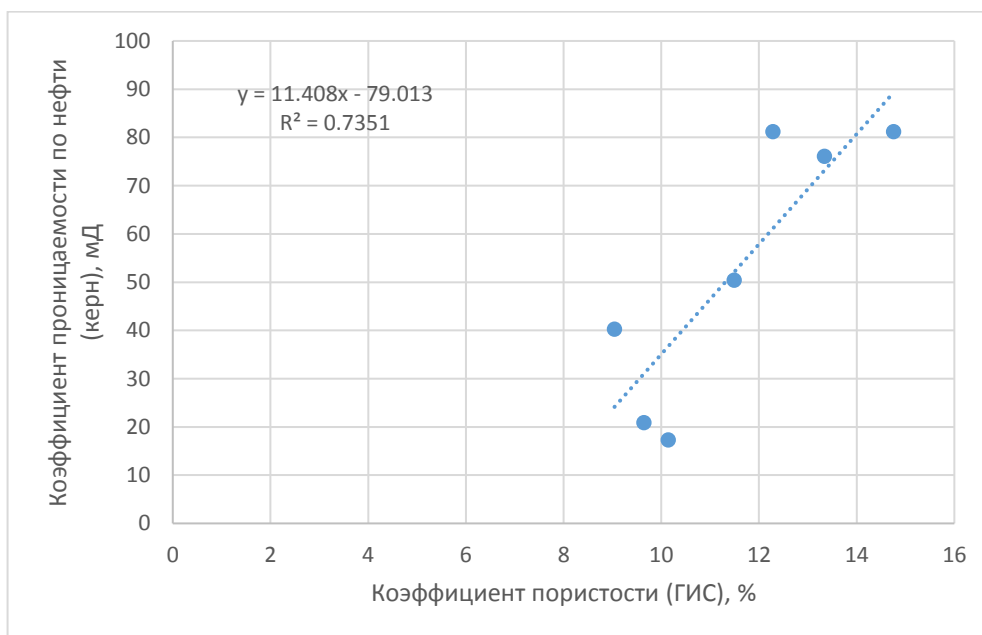


Рисунок 4.7 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для четвертой скважины

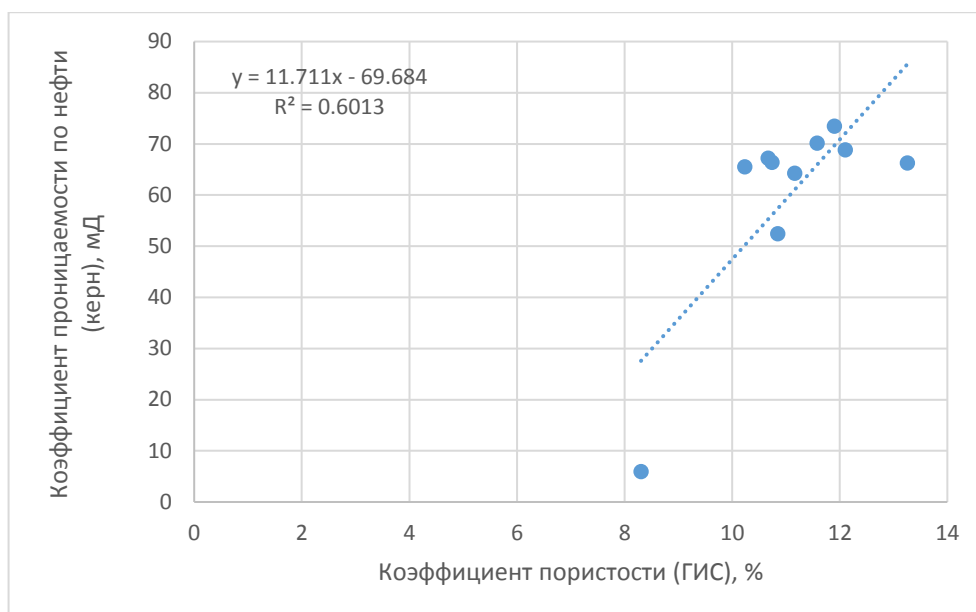


Рисунок 4.8 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для пятой скважины

Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС, а также вычисленные проницаемости показывают, что показатели имеют хорошую сходимость. Средний коэффициент аппроксимации по всем скважинам равен 0,648.

В ходе анализа была установлена зависимость проницаемости по нефти от пористости по ГИС для исследуемых скважин месторождений с терригенными отложениями вида:

$$\lg K_{\text{пр}}(\text{нефт}) = A * K_{\text{п}}(\text{ГИС}) - B$$

где $K_{\text{пр}}(\text{нефт})$ - коэффициент проницаемости по нефти, 10^{-3} мкм²; $K_{\text{п}}(\text{ГИС})$ - коэффициент пористости по ГИС, %.

По результатам проведенного анализа коэффициенты А и В в установленном уравнении зависимости варьируются в пределах от 3,984 до 15,871 для А и от 12,032 до 138,35 для В. Коэффициент корреляции меняется в пределах от 0,601 до 0,735.

Путем наложения результатов по всем исследуемым скважинам месторождений (Рисунок 4.9) предлагаемая зависимость принимает вид:

$$\lg K_{\text{пр}}(\text{нефт}) = 9,5624 * K_{\text{п}}(\text{ГИС}) - 55,555$$

где $K_{\text{пр(нефт)}}$ - коэффициент проницаемости по нефти, 10^{-3} мкм²; $K_{\text{п(ГИС)}}$ - коэффициент пористости по ГИС, %.

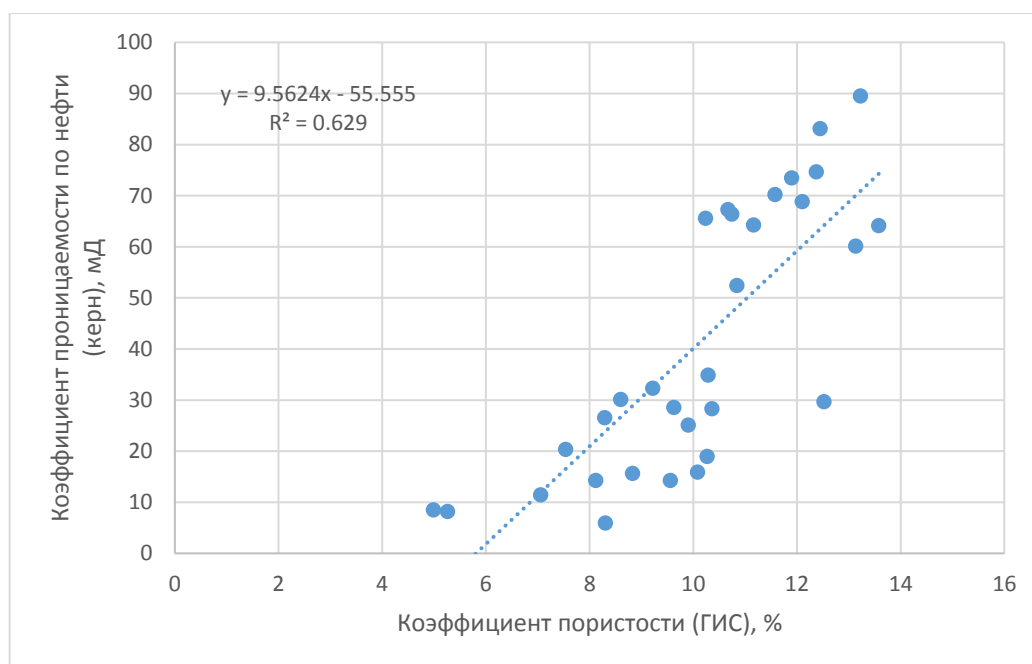


Рисунок 4.9 – Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС по всем месторождениям

Данная корреляционная зависимость имеет более высокий коэффициент аппроксимации чем зависимость, рассчитанная как средняя по исследуемым скважинам месторождений, поэтому на данном этапе работы нами методически рекомендуется использовать её для прогнозирования одного из основных параметров терригенных коллекторов – проницаемости по флюиду.

Следует отметить, что данная корреляционная зависимость построена по 5 скважинам месторождений с терригенными отложениями, что не делает её представительной, однако имеет методическую ценность.

В качестве одного из возможных вариантов развития работы по использованию результатов геофизических исследований скважин при цифровом моделировании керна могут быть проведены более узкие исследования, в которых будут использоваться результаты геофизических исследований скважин месторождений со схожими геологическими условиями и строением. В таком случае является возможным понижение погрешности в прогнозировании

результатов по предлагаемой зависимости математическим методом, а также у исследователей появляется возможность, зная особенности геологического строения залежи, выбрать ту зависимость пористости по ГИС от проницаемости по нефти, которая бы давала наиболее точный результат в прогнозировании проницаемости терригенных пород-коллекторов.

Полученные в ходе работы результаты в виде установленного уравнения зависимости коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале от пористости по ГИС хорошо вписываются в структуру создаваемых цифровых моделей керна и методически могут быть использованы для прогнозирования проницаемости по нефти при наличии результатов определения пористости по ГИС.

Эффективность подхода может быть определена в ходе сравнения полученных экспериментальных результатов лабораторных исследований кернового материала по определению коэффициентов проницаемости по нефти с результатами той же проницаемости, спрогнозированной математически.

На величину проницаемости терригенных пород-коллекторов нефти оказывают влияние большое количество факторов. К ним относятся объем поровых каналов, их размеры и формы, горное и пластовое давления, пластовая температура, глинистость, смачиваемость и многие другие факторы.

Для вывода аналогичных связей для рыхлых и глинистых пород необходимы дополнительные исследования, в виду того, что значения проницаемости по глинистым породам зачастую оказываются завышенными.

При взаимодействии глинистого цемента с водой происходит изменение фильтрационно-емкостных свойств породы, что по данным [75] обусловлено катионным обменом между электролитом и минеральной поверхностью.

В скважинах с малым выносом керна, или без такового, с потерей выноса и качества керна, особенно при отборе из разведочных и поисково-оценочных скважин, наблюдается нехватка реального кернового материала для исследований, что существенно снижает эффективность дальнейших работ. В таких случаях, для

нахождения одного из важнейших свойств пласта - проницаемости по нефти методически предлагается использовать установленные уравнения зависимостей.

4.2 Анализ возможностей использования данных ГИС в целях применения в цифровой модели керна

Геофизические исследования скважин проводятся в целях изучения геологического разреза скважин, их технического состояния и контроля за режимом разработки месторождений [44].

По данным [33, 43] керн не всегда удается извлечь из нужного интервала скважин, а при его отборе и выносе на поверхность свойства горной породы и насыщающей ее жидкости заметно изменяются. В силу этого результаты анализа керна и шлама не всегда могут дать полное представление о геологическом разрезе скважин. Вместе с тем такие свойства горных пород как электропроводность, температуропроводность, упругость и другие поддаются изучению непосредственно в скважине в условиях их естественного залегания путем проведения в ней соответствующих геофизических исследований.

Данные факторы делают результаты геофизических исследований скважин актуальными для прогнозирования ряда параметров пород-коллекторов нефти и газа в цифровой модели керна.

Геофизические исследования скважин основываются на изучении естественных и искусственно создаваемых физических полей, физических свойств горных пород, пластовых флюидов, а также содержания различных газов в буровом растворе. Каротажи, то есть геофизические исследования, проводимые для изучения геологического разреза скважин, осуществляются при помощи электрических, электромагнитных, акустических, радиоактивных и других методов. Эффективность проведения геофизических исследований скважин определяется не только правильностью выбора методов проведения работ, но и грамотной интерпретацией получаемых результатов. Сложность геофизической

интерпретации может определяться как неоднозначностью решения обратной задачи, так иногда и приближенностью самого решения [82].

Для оценки пористости горных пород могут быть использованы результаты акустического, нейтронного, гамма-гамма каротажей, а также результаты геофизических исследований скважин, полученные методами потенциалов самопроизвольной поляризации и ядерно-магнитного резонанса. В дальнейшем данные результаты могут быть использованы при моделировании микроструктуры порового пространства цифровой модели керна.

Методики определения пористости по данным различных каротажей отличаются и основываются на изучении различных свойств горных пород.

Оценка пористости горных пород геофизическими методами является перспективным направлением в цифровом моделировании керна, однако по данным [46] погрешность в таком определении может достигать 30 %.

Оценка погрешности определения эффективной пористости с использованием различных алгоритмов интерпретации приведена в работе [41], в которой результаты моделирования показали, что в компонентной интерпретации основной вклад в погрешность расчета коэффициента пористости вносят неопределенности задания остаточной водонасыщенности и свойств матрицы.

Для снижения погрешности в определении открытой пористости геофизическими методами могут использоваться различные корреляционные зависимости. Так, корреляционные зависимости интервального времени и объемной плотности от пористости, полученные по данным лабораторных исследований керна и геофизических исследований скважин близки к друг другу и по данным [46] имеют коэффициент корреляции в районе 0,67 - 0,91.

При создании цифровой модели керна спрогнозированные коэффициенты пористости могут быть использованы в процессе калибровки модели по пористости в случае полного отсутствия керна материала, однако с введением поправки через корреляционные зависимости.

Для оценки коэффициента проницаемости пород-коллекторов применяются методы электрического, гамма каротажей, а также метод гидродинамического

каротажа. Прогнозирование проницаемости пород-коллекторов основано на оценке их удельного электрического сопротивления.

Физической основой связи удельного сопротивления и коэффициента проницаемости нефтегазового коллектора является уравнение Козени-Кармана [57]:

$$K_{пр} = \frac{K_{п.эф.}^3}{T_{ф}^2 * S_{ф}^2}$$

где $K_{п.эф.}$ - коэффициент эффективной пористости, %; $T_{ф}$ - извилистость фильтрующихся каналов; $S_{ф}$ - удельная поверхность фильтрующихся каналов.

В силу невозможности практического определения извилистости и удельной поверхности фильтрующихся каналов определение проницаемости нефтенасыщенных коллекторов основано на оценке параметра насыщения. При этом делается допущение о том, что в пустотном пространстве породы-коллектора присутствует только остаточная вода. По данным [57] методика может быть применима только для оценки среднего значения проницаемости мощного и литологически однородного пласта. Для точного определения проницаемости коллекторов данная методика не может быть применима из-за большой погрешности определения.

Существуют и другие методики определения проницаемости горных пород по данным геофизических исследований скважин. По данным [39] все они основываются на эмпирических корреляционных связях типа «кern – ГИС». Суть всех методик сводится к оценке проницаемости через статические данные по пористости, глинистости, естественной радиоактивности, минерального состава и других.

Первые попытки выявить возможности интенсивной корреляции между эффективной пористостью и проницаемостью были предприняты в 50-х годах и описаны в работе [31]. Первые подтверждения данных корреляционных зависимостей были подтверждено работами отечественных исследователей [80]. Данные корреляционные зависимости могут быть использованы при уточнении

коэффициентов эффективной пористости и проницаемости цифровой модели керна.

При создании цифровой модели керна спрогнозированные коэффициенты проницаемости могут быть использованы для дополнительной проверки коэффициентов проницаемости, получаемых математическими методами. Особенно это актуально при исследованиях литологически однородных пластов в силу применимости данного метода к подобного рода геологическим образованиям. Помимо этого, значения электрического сопротивления пород, определяемых в ходе геофизических исследований скважин, могут быть использованы при определении проницаемости цифровой модели керна методом электродинамической аналогии, как электрическое сопротивление цепи при замене сети микроканалов пористой среды на сеть связанных электрических сопротивлений.

Важным параметром, определяемым в ходе геофизических исследований скважин, является глинистость, то есть доля минерального скелета породы, которая представлена глинистыми минералами и по гранулометрическому составу относится к фракции с размерами зерен меньше 0,01 мм.

Содержание глинистых минералов, а также их состав и морфология существенно влияют на проницаемость терригенных коллекторов. Помимо этого по данным [34] глинистость оказывает влияние на нефтегазонасыщенность песчано-глинистых коллекторов. В геофизических исследованиях скважин для определения глинистости используются метод собственных потенциалов и гамма-каротаж. В обоих методах глинистость определяют на основе корреляционных связей, получаемых в ходе интерпретации данных по каротажам.

При создании цифровой модели керна коэффициенты глинистости, определенные в ходе геофизических исследований скважин методом собственных потенциалов, и по данным гамма-каротажа могут быть использованы в качестве коэффициентов заполнения порового пространства глинистым цементом. Учет глинистости пород при цифровом моделировании керна позволяет максимально приблизить создаваемую цифровую модель к физической.

Помимо очевидных преимуществ использования результатов геофизических исследований скважин при цифровом моделировании существуют и недостатки, не позволяющие сделать геофизические исследования скважин единственным источником исходной информации для «модельных» расчетов. Так, в работе [1] расчетная зависимость проницаемости, полученная по 20 виртуальным кубам, совпала с зависимостью, полученной по результатам лабораторных исследований образцов керна исследуемых месторождений, в то время как прогноз проницаемости, полученный по данным геофизических исследований скважин оказался сопряжен с большими неопределенностями.

Тем не менее, адекватно спрогнозированные результаты определения пористости по ГИС представляют значительный интерес в цифровом моделировании керна, так как в случае полного отсутствия кернового материала представляется возможность их использования для калибровки цифровой модели керна по пористости. Значительный интерес представляют и другие показатели, определяемые в ходе геофизических исследований скважин.

Выводы по главе 4

Установлена зависимость коэффициентов проницаемости по флюиду, определенных на керновом материале от пористости по ГИС для исследуемых коллекторов на основании проведенного анализа геофизических данных по 5 скважинам месторождений с терригенными коллекторами в целях применения при цифровом моделировании керна.

Выполнена оценка возможностей использования данных ГИС при создании цифровой модели керна, предложены варианты использования данных ГИС в целях применения в цифровой модели керна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована технология определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов на цифровой модели керна, позволяющая получать представительные результаты методами математического моделирования. Предложен и описан подход, позволяющий оценивать абсолютную газопроницаемость цифровых моделей керна при малом количестве исходных данных с применением основ теории перколяции и аналитических методов.

2. Экспериментально установлена сходимость результатов определения абсолютной газопроницаемости цифровой модели керна, созданной при помощи методов молекулярной динамики и стохастической упаковки с применением аналитических решений, с результатами определения абсолютной газопроницаемости физических образцов керна лабораторными методами исследований. Погрешность в определении составила в среднем 11,67 %.

3. Обоснован междисциплинарный подход при реализации технологии создания цифровой модели керна, основанный на объединении нескольких программных продуктов типа LAMMPS, MCCC Towhee и других в единый программно-аппаратный комплекс, в котором полученные результаты цифрового моделирования могут быть сопоставимы с результатами лабораторных исследований.

4. На основании сравнения результатов определения проницаемости на цифровой модели и данных лабораторных исследований на керновом материале показано, что внедрение цифрового моделирования позволяет повысить эффективность имитации фильтрационных процессов в породах-коллекторах исследуемых объектов. На основании этого представляется целесообразным его применение при проведении мероприятий, связанных с геолого-информационным обеспечением ввода в промышленную эксплуатацию месторождений углеводородов путем создания блока цифрового керна, вписывающего в общую платформу цифровизации технологий, связанных с исследованием ФЕС при разработке месторождений углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов, А.А. Разработка методик определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10 / Абросимов Андрей Андреевич. – Москва, 2017. – 107 с.

2. Алтунин, А.Е. Расчетный метод получения относительных фазовых проницаемостей на основе решения обобщенных уравнений Бернулли для системы поровых каналов / А.Е. Алтунин, С.В. Соколов, С.В. Степанов, Н.А. Черемисин, А.Б. Шабаров // Нефтепромысловое дело. - 2013. - Т. 8. - С. 40–46.

3. Амосова, О.Е. Компьютерное моделирование структуры и порового пространства терригенных осадков: дис. ... канд. техн. наук: 04.00.01 / Амосова Ольга Евгеньевна. – Сыктывка р, 2000. – 359 с.

4. Афанасьев, К.Е. Численное моделирование течений жидкости со свободными границами современными численными методами / К.Е. Афанасьев // Информационные и вычислительные технологии в численных расчетах и управлении вузом. – 2010. - С. 245–257.

5. Ахметсафина, А.Р. Фильтрация в анизотропной трещиноватой среде / А.Р. Ахметсафина, И.Р. Миннихметов, А.Х. Пергамент // Вестник ЦКР Роснедра. - 2010. - № 3. - С. 36-52.

6. Балашов, В.А. Прямое численное моделирование течений жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Балашов Владислав Александрович. - Москва, 2016. – 108 с.

7. Белозеров, И.П. Модель микроструктуры ядра терригенных коллекторов нефти и газа / И.П. Белозеров, В.В. Березовский, М.Г. Губайдуллин, А.В. Юрьев // Тезисы докладов. Тюмень 2017. - Режим доступа: [<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=87662>].

8. Белозеров И.П. О концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов на цифровой модели ядра / И.П.

Белозеров, М.Г. Губайдуллин // Записки Горного института. - 2020. - Т. 244. - С. 402-407.

9. Белозеров, И.П. Сравнительный анализ результатов фильтрационных исследований проведенных на образцах керна различного диаметра / И.П. Белозеров, В.Е. Шулев, А.В. Юрьев // Академическая наука - проблемы и достижения: материалы V международной научно-практической конференции. – North Charleston, USA, 2014. - С. 20–23.

10. Березовский, В.В. Подходы к созданию виртуальной модели керна терригенных коллекторов нефти и газа / В.В. Березовский, И.П. Белозеров, М.Г. Губайдуллин // Перспективы и проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктической зоны России: материалы международной практической конференции. – Архангельск: ИД САФУ, 2016. - С. 27–35.

11. Бударин, В.А. Анализ некоторых допущений уравнения Навье-Стокса / В.А. Бударин // Problemele Energeticii Regionale. - 2010. - № 2 (13). - С. 59–65.

12. Галечан, А.М. Перколяционный анализ гистерезиса фазовых проницаемостей при двухфазном течении в нефтяных коллекторах: дис. ... физ. - мат. наук: 01.02.05 / Галечан Артур Михайлович. – Москва, 2018. – 92 с.

13. Галкин, С.В. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений / С.В. Галкин, А.А. Ефимов, С.Н. Кривошеков, Я.В. Савицкий, С.С. Черепанов // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56, № 5. - С. 995–1007.

14. Галкин С.В. Методология учета геологических рисков на этапе поисков и разведки нефтяных месторождений // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2012. - Т. 4. - С. 23–32.

15. Гермидер, О.В. Потoki тепла и массы при неполной аккомодации молекул разреженного газа стенками эллиптического канала / О.В. Гермидер, В.Н. Попов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. - 2017. - № 5. - С. 103–109.

16. Гермидер, О.В. Математическое моделирование течения разреженного газа в прямоугольном канале с внутренним цилиндрическим элементом / О.В.

Гермидер, В.Н. Попов // Сибирские электронные математические известия. - 2017. – Vol. 5. - С. 518–527.

17. Гильманова, Р.Х., Махмутов, А.А., Вафин, Т.Р., Егоров, А.Ф. Литолого-фациальный анализ продуктивных пластов терригенного девона Алексеевского месторождения // Нефтяная провинция. - 2020. Т. 3. (23). - С. 54–67.

18. Гильманова, Р.Х., Сарваретдинов, Р.Г., Махмутов, А.А., Бахтияров, Г.А., Волков, В.Г. Техногенное изменение характеристик пласта по результатам применения многоразовых гидроразрывов пласта // Нефтепромысловое дело. - 2016. - Т. 12. - С. 18–22.

19. Горная энциклопедия Том. 5. Аа-лава - Яшма. - М.: «Советская энциклопедия», 1991. – 451 С.

20. Горох, А.А. Суперкомпьютерное моделирование процесса напыления тонких пленок диоксида кремния с использованием программы LAMMPS / А.А. Горох, Ф.В. Григорьев, Е.В. Каткова, А.В. Сулимов, С.А. Шарапова // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2016. - №. 1. - С. 91–95.

21. ГОСТ 26450.0-85 Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств. - М.: Государственный 109 комитет по стандартам. - 1985. - 4 с.

22. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. – М.: Издательство стандартов. - 1985. - 8 с.

23. ГОСТ 26450.2-85 Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной фильтрации. - М.: Издательство стандартов. - 1985. - 16 с.

24. Грачев, С.И., Коротенко, В.А. Кушакова, Н.П. Исследование влияния трансформации двухфазной фильтрации на формирование зон невыработанных запасов нефти // Записки горного института. - 2020. - Т. 241. - С. 68–82.

25. Грачев, С.И., Стрекалов, А.В. Хусаинов А.Т. Соответствие вычислительных систем гидродинамических моделей природным техногенным

процессам нефтегазодобычи // Вестник Тюменского Государственного Университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2015. - Т. 1., № 1. - С. 127–135.

26. Губайдуллин, М.Г. Краткий курс геологии нефти и газа: учеб. пособие / М.Г. Губайдуллин. - Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. - 145 с.

27. Губайдуллин, М.Г. Экспериментальные исследования терригенных коллекторов нефти и газа для создания виртуальной модели ядра / М.Г. Губайдуллин, А.В. Юрьев, И.П. Белозеров // Перспективы и проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктической зоны России: материалы международной практической конференции. – Архангельск: ИД САФУ. - 2016. - С. 65–69.

28. Губайдуллин, М.Г. О создании цифровой модели ядра терригенных пород для решения поисково-разведочных задач / М.Г. Губайдуллин, И.П. Белозеров, В.В. Березовский // Глубинное строение и геодинамика Приладожья: материалы всероссийской конференции с международным участием. - 2017. - С. 27–35.

29. Гудок, Н.С. Изучение физических свойств пористых сред / Н.С. Гудок. - М.: Недра, 1970. - 206 с.

30. Давыдов, М.Н. Метод сглаженных частиц в задачах моделирования кавитационного разрушения жидкости при ударно-волновом нагружении / М.Н. Давыдов, В.К. Кедринский // Прикладная механика и техническая физика. - 2013. - № 6(54). - С. 17–26.

31. Дахнов, В.Н. Изучение коллекторских свойств и нефтенасыщенности продуктивных горизонтов нефтяных месторождений по данным промысловой геофизики / В.Н. Дахнов, В.Н. Кобранова. - М.: Госптотехиздат, 1972.

32. Добрынин, В.М. Петрофизика; Учеб. для вузов. 2-е изд. Перераб. и доп. под редакцией доктора физико-математических наук Д.А. Кожевникова / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. - М.: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. - 368 с.

33. Долицкий, В.А. Геологическая интерпретация материалов геофизических исследований скважин / В.А. Долицкий. - М.: Недра, 1966. - 387 с.
34. Донцов, К.М. Разработка нефтяных месторождений / К.М. Донцов. - М.: Недра, 1977. - 360 с.
35. Дягилев, В.Ф. Анализ результатов трассерных исследований на примере пласта ЮВ11 Чистинного месторождения / В.Ф. Дягилев, А.А. Кононенко, С.А. Леонтьев // Успехи современного естествознания. - 2018. - №1. - С. 93–101.
36. Жариков, А.В. Проницаемость, структура порового пространства, и динамика движения природных и техногенных флюидов в кристаллических породах (по экспериментальным данным) / А.В. Жариков, В.М. Шмонов, В.М. Витоватова // Вестник ОНЗ РАН. - 2011. - № 3.
37. Жижимонтов, И.Н. Исследования фильтрационно-емкостных свойств пластов БВ Самотлорского месторождения с использованием стохастической порово-сетевой модели / И.Н. Жижимонтов, С.В. Степанов, А.В. Свалов // Материалы X научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений». - 2017. – С. 4-14.
38. Карсанина, М.В. Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с помощью корреляционных функций: дис. ... физ. –мат. наук: 25.00.10 / Карсанина Марина Владимировна. - Москва, 2016. - 137 с.
39. Коваленко, К.В. Система петрофизического моделирования залежей нефти и газа на основе эффективной пористости гранулярных коллекторов: дис. ... геол. –мин. наук: 25.00.10 / Коваленко Казимир Викторович. – Москва, 2015. – 358 с.
40. Коган, М.Н. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория / М.Н. Коган. - М.: Наука, 1967. - 440 с.
41. Кожевников, Д.А. Изучение коллекторов нефти и газа по результатам адаптивной интерпретации геофизических исследований скважин / Д.А. Кожевников, К.В. Коваленко. - М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. - 219 с.

42. Королева, Н.Н. Научная интуиция как философская концепция: дис. ... филос. наук: 09.00.01 / Королева Наталья Николаевна. - Уфа, 2003. - 133 с.
43. Косков, В.Н. Геофизические исследования скважин / В.Н Косков. -Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2005. - 122 с.
44. Косков, В.Н. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС / В.Н. Косков, Б.В. Косков. - Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2007. - 317 с.
45. Котяхов, Ф.И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Ф.И. Котяхов. - М.: Недра, 1977. - 287 с.
46. Краснопольская, А.В. Повышение точности определения пористости коллекторов по данным сопоставления «КЕРН-ГИС» / А.В. Краснопольская, В.С. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал. - 2009. - №2. - С. 93–97.
47. Кривовичев, Г.В. О расчете течений вязкой жидкости методом решеточных уравнений Больцмана / Г.В. Кривовичев // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013. - № 5(2). - С. 165–178.
48. Куршин, А.П. Исследование течений газа через пористые среды с твердой структурой при давлениях до 10^8 Па / А.П. Куршин, Л.В. Гусева // Труды ЦАГИ, 1980. - № 2059.
49. Куршин, А.П. Гидравлическое сопротивление насыпных слоев при фильтрации жидкости / А.П. Куршин, Л.В. Гусева // Теплоэнергетика. - 1989. - Т. 10.
50. Куршин, А.П. Закономерности течений газа через пористые среды с жесткой структурой / А.П. Куршин // Ученые записки ЦАГИ. - 1981. - Т. 12, № 6.
51. Куршин, А.П. К вопросу о влиянии давления газа на гидродинамические характеристики проницаемых материалов // А.П. Куршин // ХТТ. - 1981. - № 3.
52. Куршин, А.П. Гидродинамические характеристики проницаемых графитов и композиционного материала ТКМ // ХТТ. - 1984. - Т. 3.
53. Куршин, А.П. Гидродинамические характеристики проницаемых металлокерамик / А.П. Куршин // Труды ЦАГИ. - 1984. - Т. 2230.

54. Куршин, А.П. Закономерности изменения проницаемости пористых сред при фильтрационных течениях / А.П. Куршин // Ученые записки ЦАГИ. - 2008. - Т. 39, № 1–2. - С. 125–134.

55. Лаврентьев, А.В. Анализ причин и последствий пескопроявлений на завершающей стадии разработки нефтяных и газовых месторождений / А.В. Лаврентьев, Д.Г. Антоннади. - М.: Изд-во: Горная книга, 2015. - 31 с.

56. Малышева, Е.О. Природные резервуары в терригенных формациях Печорского нефтегазоносного бассейна / Е.О. Малышева, Н.Н. Рябинкина, Н.Н. Тимонина, З.В. Ларионова // Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1993. - 154 с.

57. Мараев, И.А. Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Учебное пособие / И.А. Мараев. - М.; 2013. – 95 с.

58. Марков, П.В. Использование моделей микроструктуры пористой среды при расчете фильтрационных характеристик для гидродинамических моделей / П.В. Марков, С.П. Родионов // Нефтепромысловое дело. - 2015. - № 11. - С. 64–75.

59. Марков, П.В. Метод стохастической генерации моделей поровых сетей по распределениям их параметров // П.В. Марков, С.П. Родионов. - Вестник кибернетики. - 2016. - № 3(23). - С. 18–24.

60. Мизгулин, В.В. Моделирование плотных материалов методом упаковки сферополиэдров / Мизгулин В.В., Кадушников Р.М., Алиевский В.М., Алиевский Д.М. // Компьютерные исследования и моделирование. - 2012. – Т. 4, № 4. - С. 757–766.

61. Мизгулин, В.В. Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для имитационного моделирования микроструктуры ядра: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.11, 05.13.18 / Мизгулин Вячеслав Владимирович. - Москва, 2016. – 108 с.

62. Мизгулин, В.В. Оптимизационный подход к имитационному моделированию микроструктур / В.В. Мизгулин, В.В. Косульников, Р.М. Кадушников // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013. – Т. 5, № 4. - С. 597–606.

63. Михайлов, Н.Н. Проницаемость пластовых систем / Н.Н. Михайлов - М.:

РГУ имени И.М. Губкина, 2006. - 186 с.

64. Михайлов, Н.Н. Влияние масштабного эффекта на мобилизацию остаточной нефти в лабораторном эксперименте / Н.Н. Михайлов, О.М. Ермилов, И.П. Гурбатова, С.В. Мелехин // Доклады академии наук. - 2016. - Том 470, №2. - С. 189–193.

65. Москалев, П.В. Оценки порога и мощности перколяционных кластеров на квадратных решетках с $(1, \pi)$ -окрестностью / П.В. Москалев // Компьютерные исследования и моделирование. - 2016. - Т. 6, № 3. - С. 405–414.

66. Недоливко, Н.М. Петрографические исследования терригенных и карбонатных пород-коллекторов / Н.М. Недоливко, А.В. Ежова. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 172 с.

67. Никитин, К.Д. Метод конечных объемов для задачи конвекции-диффузии и моделей двухфазных течений: дис. ... физ. –мат. наук: 05.13.18 / Никитин Кирилл Дмитриевич. – Москва, 2016. - 137 с.

68. ОСТ 39-235-89 Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. - М.: Миннефтепром, 1989. - 35 с.

69. Патент РФ № 2483291. Способ определения коэффициента эффективной пористости на образцах керна / И.М. Индрупский, К.В. Коваленко, Д.А. Кожевников, С.Н. Закиров. - 2013.

70. Покрепин, Б.В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. Учебное пособие. 2-е издание / Б.В. Покрепин. - М.: Феникс, 2015. - 308 с.

71. Попов, Н.А. Применение технологий глубокого обучения для изучения шлифов на примере Усинского месторождения / Попов Н.А., Путилов И.С., Гуляева А.А. Е.Е. Винокурова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Том. 331, № 6. - С. 100–112.

72. Путилов, И.С., Гурбатова, И.П., Попов, Н.А., Чижов, Д.Б., Юрьев, А.В. Повышение достоверности результатов физико-гидродинамических исследований // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2019. - Т. 19. (3). - С. 216–227.

73. Савицкий, Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений / Я.В. Савицкий // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2015. – Т. 15. - С. 28–37.

74. Сарваретдинов, Р.Г., Минуллин, А.Г., Махмутов, А.А., Галлямов, Р.И., Вышенская, М.И. Методика построения аналитической зависимости капиллярного давления смещения от ФЕС // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2017. - Т. 10. - С. 34–40.

75. Спасенникова, К.А. Исследование влияния глинистых минералов на проницаемость горных пород при различной минерализации пластовой воды / К.А. Спасенникова, Б.В. Григорьев, А.А. Шубин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2015. - Том 1, № 3. - С. 69–75.

76. Тугарова, М.А. Породы-коллекторы. Свойства, петрографические признаки, классификации: Учебно-методическое пособие / М.А. Тугарова. - СПб., 2004. - 36 с.

77. Тупицына, А.И. Исследование проницаемости и перколяционных свойств систем твердых прямоугольных частиц методом компьютерного моделирования / А.И. Тупицына, Ю.А. Фадин // Журнал технической физики. - 2016. - Т. 86, № 10. - С. 25–31.

78. Хайруллин, Ам.Ат. Аппроксимация производной функции Баклея – Леверетта / Хайруллин Ам.Ат., Грачев С.И., Хайруллин Аз.Ам. // Нефтяное хозяйство. - 2019. - №2. - С. 44–48.

79. Ханин, А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение / А.А. Ханин. - М.: Недра, 1969. - 368 с.

80. Ханин, А.А. Петрофизика нефтяных и газовых пластов / А.А. Ханин. - М.: Недра, 1976. - 295 с.

81. Харченко, С.И. Связь фильтрационно-емкостных и структурно-вещественных параметров пород пласта Ю1 Восточно-Придорожного месторождения / С.И. Харченко // Вестник недропользователя. - 2003. – Т. 10.

82. Хмелевской, В.К. Основы геофизических методов: учебник для вузов / В.К. Хмелевский, В.И. Костицын. - Пермь: Пермский государственный университет, 2010. - 400 с.

83. Ходанович, Д.А. Решение одномерной задачи вытеснения Бакли-Левретта для определения коэффициента заводнения неоднородных коллекторов / Д.А. Ходанович, С.К. Сохошко // Нефтепромысловое дело. - 2018. - №4. - С. 14–18.

84. Шайдуров, В.В. Численное моделирование течений вязкого теплопроводного газа в канале / В.В. Шайдуров, Г.И. Щепановская, М.В. Якубович // Вычислительные технологии. - 2013. – Т. 18, № 4. - С. 77–90.

85. Шарафутдинов, Р.Ф., С.И. Грачев, А.Н. Нестеренко, М.Г. Ложкин, М.А. Моисеев А.С.С. Результаты лабораторной экспериментальных исследований по физическому моделированию вытеснения нефти различными агентами / Р.Ф. Шарафутдинов, Грачев С.И., Нестеренко А.Н., Ложкин М.Г., Моисеев М.А., А.С. Самойлов // Экспозиция нефть и газ. - 2017. - Том. 3, № 56. - С. 28–33.

86. Ширшов, Я.В. Исследование влияния разрешения цифровой модели керна на расчет абсолютной проницаемости / Я.В. Ширшов, С.В. Степанов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2019. - Т. 4, № 20. - С. 98–114.

87. Штернлихт, Д.В. Гидравлика. 2-е издание, переработанное и дополненное. Книга 2 / Д.В. Штернлихт. М.: Энергоатомиздат, 1991. — 367 с.

88. Юрил, Я.Э. Методики термодинамических PVT-исследований на установках фазовых превращений / Я.Э. Юрил, С.А. Леонтьев // Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону». - 2015. - С. 217–219.

89. Юрьев, А.В. Совершенствование методов определения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов с применением полноразмерного керна (на примере ряда месторождений севера Тимано-Печорской нефтегазоносной

провинции): дис. ... канд. техн. наук: 25.00.12/ Юрьев Александр Вячеславович. - Пермь, 2019. – 122 с.

90. Adler, P.M. Porous media: geometry and transport / P.M. Adler // Butterworth-Heinemann, Stoneham. - 1994. - 560 p.

91. Al-Suwaidi, M.H. Application of Digital Core Description Methods in a Reservoir Characterisation Study: A Review of Traditional Versus Potential Future Methods / M.H. Al-Suwaidi, M.P. Williams, G. Ottinger // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Society of Petroleum Engineers. - 2010.

92. Alizadeh, S.M. An Analysis of Sleeve Effects for Petrophysical Measurements using Digital Core Analysis / S.M. Alizadeh, S. Latham, J. Middleton, T. Senden, C.H. Arns // International Petroleum Technology Conference. - Doha, Qatar. - 2015.

93. Allen, M.P. Introduction to Molecular Dynamics Simulation / M.P. Allen // John von Neumann Institute of Computing. - 2004. - Vol. 23. - P. 1-28.

94. Andraa, H. Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation / H. Andraa, N. Combaret, J. Dvorkin, E. Glatt, J. Han, M. Kabel, Y. Keehm, F. Krzkalla, M. Lee, C. Madonna, M. Marsh, T.M. Eric, H. Saenger, R. Sain, N. Saxena, S. Ricker, A. Wiegmann, X. Zhan // Computational Geosciences. – 2013. - Vol. 50. - P. 25-32.

95. Andrew, M. Pore-scale imaging of geological carbon dioxide storage under in situ conditions / M. Andrew, B. Bijeljic, M.J. Blunt // Journal of Geophysical Resources. – 2013. - Vol. 40. - P. 3915-3918.

96. Arns, C.H. Digital Core Laboratory: Reservoir core analysis from 3D images / C.H. Arns, H. Averdunk, F. Bauget, A. Sakellariou, T.J. Senden, A.P. Sheppard, R.M. Sok., W.V. Pinczewski, M.A. Knakstedt // 6th North America Rock Mechanical Symposium. - 2004.

97. Arns, C.H. Pore scale characterization of carbonates using X-ray microtomography / C.H. Arns., Bauget. F, Limaye. A. // SPE Journal. – 2005. - Vol. 10. - P. 478–484.

98. Arns, C.H. Computation of linear elastic properties from micro-tomographic images: Methodology and agreement between theory and experiment / C.H. Arns, M.A.

- Knackstedt, W.V. Pinczewski // *Geophysics*. – 2002. - Vol. 67, № 2. - P. 1396–1405.
99. Bear, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media* / J. Bear // Dover, North Chelmsford: Courier Corporation. - 1972. - 764 p.
100. Blunt, M.J. *Pore-scale imaging and modelling* / M.J. Blunt, B. Bijeljic, H. Dong, O. Gharbi, S. Iglauer, P. Mostaghimi, A. Paluszny, C. Pentland // *Advanced Water Resources*. – 2013. - Vol. 51. - P. 197–216.
101. Carpenter, C. *Digital Core Analysis and Pore-Network Modeling in a Mature-Field Project*/ C. Carpenter // *Journal of Petroleum Technology*. – 2015. - Vol. 67, № 1.
102. Cercignani, S.V. *Kinetic model for gas* / S.V. Cercignani, M. Lampis // *Transport Theory and Statistical Physics*. – 1971. - Vol.1. - P. 101–109.
103. Cercignani S.V. *The Boltzmann Equations and its Applications* / C.V. Cercignani // Springer-Verlag. - 1988. – 455 p.
104. Chang, W., Lee, T.Y. *Molecular dynamics simulation of gas permeation phenomena in a microporous silica membrane* / W. Chang, T.Y. Lee // *Chemical Engineering Science*. - 2006. - Vol. 61, № 12. - P. 3974–3985.
105. Dong, H. *Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images* / H. Dong, M.J. Blunt // *Physical Review E*. – 2009. - Vol. 80.
106. Gang, G.H. *Lattice Boltzmann models for nonequilibrium gasflows* / G.H. Gang, Y.H. Zhang, D.R. Emerson // *Physical Review E*. - 2008. - Vol. 77.
107. Garcia, X. *Numerical study of the effects of particle shape and polydispersity on permeability* / X. Garcia, L.T. Akanji, M.J. Blunt, S.K. Matthai, J.P. Latham // *Physical Review E*. – 2009. - Vol. 80.
108. Gerboux, O. *Transport properties of real metallic foams* / O. Gerboux, F. Butens, V.V. Mourzenko, A. Mémponteil, A. Vabre, J.F. Thovert, P.M. Adler // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2010. - Vol. 342, № 1. - P. 155–165.
109. Ghous, A. *Digital Core Laboratory: Petrophysical Analysis from 3D Imaging of Reservoir Core Fragments* / A. Ghous, W.V. Pinczewski, M.A. Knackstedt, C. Arns, F. Bauget, A. Sakellariou, T. Senden, A. Sheppard, R. Sok, J. Kelly // ANU Research Publication. - 2005.
110. Grachev, N. *Digital core analysis - the future of petrophysics* / N. Grachev //

SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. - 2012.

111. Graur, I.; Ho M.T. Rarefied gas flow through a long rectangular channel of variable cross section // I. Graur, M.T. Ho // *Vacuum*. - 2014. - Vol. 101. - P. 328–332.

112. Grusdev, R. Polarizable Models in Molecular Dynamics / R. Grusdev, A. Soloviev // *Solid State Phenomena*. – 2017. - Vol.258. - P. 202–205.

113. Homayoon, A. A novel modified lattice Boltzmann method for simulation of gasflows in wide range of Knudsen number // A. Homayoon, A.H. Meghdadi Isfahanib, E. Shirania, M. Ashrafizadeha // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. - 2011. - Vol. 38. - P. 827–832.

114. Huang, C. Comparative study between continuum and atomistic approaches of liquid flow through a finite length cylindrical nanopore / C. Huang // *The Journal of Chemical Physics*. - 2007. - Vol. 126, № 22.

115. Hyvaluoma, J. Using microtomography, image analysis and flow simulations to characterize soil surface seals / J. Hyvaluoma, M. Thapaliya, J. Alaraudanjoki, T. Siren, K. Mattila, J. Timonen, E. Turtola // *Computers and Geosciences*. - 2012. - Vol. 48. - P. 93–101.

116. Jones, K.W. Study of the microgeometry of porous materials using synchrotron computed microtomography / K.W Jones, H. Feng, W.B. Lindquist, P.M. Adler, J.F. Thovert, B. Vekemans, L. Vincze, I. Szaloki, R. Van Grieken, F. Adams, C. Riekel // *Geological Society, Special Publication*. London. – 2003. - Vol. 215, №1. - P. 39–49.

117. Kalam, M.Z. Digital Rock Physics for Fast and Accurate Special Core Analysis in Carbonates / M.Z. Kalam // *New Technologies in Oil and Gas Industry*. Chapter 9. - 2012. - P. 201–226.

118. Kent, D. Empirically derived capillary pressure data from core analyses: applications to modelling pore geometry in carbonate reservoirs, Southeastern Saskatchewan / D. Kent, M. Yurkowski, E. Slrachan // *Petroleum Society of Canada*, 1993. - 17 p.

119. Knackstedt, M.A. Archie's exponents in complex lithologies derived from 3D

digital core analysis / M.A. Knackstedt, C.H. Arns, A.P. Sheppard, T.J. Senden, R.M. Sok, Y. Cinar, W.V. Pinczewski, M. Loannidis, G.S. Padhy // 48th Annual Logging Symposium, 2007. - 16 p.

120. Knackstedt, M.A. Digital Core Laboratory: Properties of reservoir core derived from 3D images / M.A. Knackstedt, C.H. Arns, A. Limaye, A. Sakellariou, T.J. Senden, A.P. Sheppard, R.M. Sok, W.V. Pinczewski, G.F. Bunn // SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. Society of Petroleum Engineers, 2004. - 14 p.

121. Knan, F. 3D simulation of the permeability tensor in a soil aggregate on the basis of nanotomographic imaging and LBE solver / F. Khan, F. Enzmann, M. Kersten, A. Wiegmann, K. Steiner // Journal of Soils and Sediments. -2012. - Vol 12, № 1. - P. 86–96.

122. Lemaitre, R.. Fractal porous media IV: three-dimensional stokes flow through random media and regular fractals / R. Lemaitre, P.M. Adler // Transport in Porous Media. – 1990. - Vol. 5, №4. - P. 325–340.

123. Li, G.G. Rock Physical Properties Computed from Digital Core and Cuttings with Applications to Deep Gas Exploration and Development / G.G. Li, E. Diaz, A.M. Nur // SPE Deep Gas Conference and Exhibition, 2010. - 6 p.

124. Liu, X. Numerical simulation of rock electrical properties based on digital cores / X. Liu, J. Sun, H. Wang // Applied Geophysics. – 2009. - Vol. 6. № 1. - P. 1–7.

125. Manwart, C. Lattice-Boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three-dimensional porous media / C. Manwart, U. Aaltosalmi, A. Koponen, R. Hilfer, J. Timonen // Physical Review E. – 2002. - Vol. 66.

126. Mavko, G. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. 2nd edition / G. Mavko, T. Murkerji, J. Dvorkin // Cambridge University Press, 2009. - 524 p.

127. McGaughey, J. Geological Models, Rock Properties, and the 3D Inversion of Geophysical Data / J. McGaughey // Advances in Geophysical Inversion and Modeling. – 2015. – Vol. 10. - P. 473–483.

128. Meghdadi Isfahani, A.H. A joint lattice Boltzmann and molecular dynamics

investigation for thermohydraulic simulation of nano flows through porous media / A.H. Meghdadi Isfahani, I. Tasdighib, A. Karimipoura, E. Shiranib, M. Afranda // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. - 2016. - Vol. 55. - P. 15–23.

129. Mukhopadhyay, P. A survey of Hough Transform / P. Mukhopadhyay, B.B. Chaudhuri // *Pattern Recognition*. – 2015. - Vol. 48, № 3. - P. 993–1010.

130. Nie, X.B. A continuum and molecular dynamics hybrid method for micro- and nano-fluid flow / X.B. Nie, S.Y. Chen, M.O. Robbins // *Journal of fluid Mechanics*. – 2004. - Vol. 500. - P. 55–64.

131. Nield, D.A. *Convection in Porous Media*. Springer / D.A. Nield, A. Bejan // Springer, 1992. - 654 p.

132. Pantazis, S. Gas-surface scattering effect on vacuum gas flows through rectangular channels / S. Pantazis, S. Varoutis, V. Hauer, C. Day, D. Valougeorgis // *Vacuum*. – 2011. - Vol. 85. - P. 1161–1164.

133. Passega, R. Textury as Characteristic of clastic Deposition / R. Passega // *Petroleum Geology*. – 1957. - Vol. 41, № 9.

134. Pazdniakou, A. Dynamic permeability of porous media by the lattice Boltzmann method / A. Pazdniakou, P.M. Adler // *Advances in Water Resources*. -2013. - Vol.62. - P. 292–302.

135. Renard, P. Laboratory determination of the full permeability tensor / P. Renard, A.Gently, F. Stuffer // *Journal of Geophysical Resources*. – 2001. -Vol.106. - P. 443–452.

136. Saenger, E.H. Finitedifference modeling of wave propagation on microscale: A snapshot of the work in progress / E.H. Saenger, R. Ciz, O.S. Kruger // *Journal of Applied Geophysics*. – 2007. - Vol. 72, №5.

137. Shandrygin, A.N. Digital Core Analysis for Flow Process Evaluation is Myth or Reality? / A.N. Shandrygin // *SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. - 2014.

138. Sharipov, F.M. Rarefied gas flow through a long rectangular channel / F.M. Sharipov // *Journal of Vacuum Science & Technology*. - 1999. - Vol. 17, № 5. - P. 3062–3066.

139. Thovert, J.F. Grain reconstruction of porous media: application to a low-porosity Fontainebleau sandstone / J.F.Thovert, F. Yousefian, P. Spanne, C.G. Jacquin, P.M. Adler // *Physical Review E*. – 2001. - Vol. 62, № 6.

140. Thovert, J.F. Grain reconstruction of porous media: application to a Bentheim sandstone / J.F.Thovert, P.M. Adler // *Physical Review E*. – 2011. - Vol. 83, № 5.

141. Titarev, V.A., Shakhov E.M. Kinetic analysis of an isothermal flow in a long microchannel with rectangular cross section / V.A. Titarev, E.M. Shakhov // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. - 2010. - Vol. 50, № 7. - P. 1221–1237.

142. Vadapalli, U., , N. Estimation of permeability of a sandstone reservoir by a fractal and Monte Carlo simulation approach: a case study / U. Vadapalli, R.P. Srivastava, N. Vedanti, V. Dimri // *Nonlinear Processes in Geophysics*. - 2014. - Vol. 21. - P. 9–18.

143. Uth, M.F. Molecular Dynamics Simulations of Benchmark Geometries Representing a Flow Through Porous Media / M.F. Uth, H. Asmuth, C. Windt, H. Herwig // *ASME 2014. 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels collocated with the ASME 2014. 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Chicago, 2014.

144. Whitaker, S. Flow in porous media I: a theoretical deviation of Darcy's law / S. Whitaker // *Transport in Porous Media*. – 1986. - Vol.1, № 1. - P. 3–25.

145. Yu, B.M. Permeability of fractal porousmedia by Monte–Carlo simulations / B.M. Yu, M. Zou, Y. Feng // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48, Iss. 13. - P. 2787-2794.

146. Yu, B.M. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media / B.M. Yu, L.J. Lee // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. - 2002. - Vol. 45. - P. 2983–2993.

147. Zhang, H. Shear viscosity of simple fluids in porous media: molecular dynamic simulations and correlation models // H. Zhang, B. Zhang, S. Lianga, Y. Lua, W. Hu, Z. Jinc // *Chemical Physics Letters*. - 2001. - Vol. 350, № 3–4. - P. 247–252.

148. Zheng, Y. The equivalence between digital core and rock physics model for pure sandstones and shaly sandstones / Y. Zheng, X. Yin, Z. Zong // *SEG Technical*

Program Expanded Abstracts, 2016.

149. Zhu, W. Progress of digital rock physics / W. Zhu, R. Shan // Oil Geophysical Prospecting. Vol. 49. № 6, 2014. - P. 1138–1146.

Акт о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор по стратегическому
развитию и наукеФГАОУ ВО «Северный
(Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова»
Марьяндышев Павел Андреевич
«15» сентября 2021 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что результаты исследований, содержащиеся в диссертационной работе Белозерова Ивана Павловича на тему «Разработка технологии цифрового моделирования керна для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов» используются в Инновационно-технологическом центре арктических нефтегазовых лабораторных исследований Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова в практической деятельности, связанной с исследованиям керна материала.

Использование технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели керна, предложенной И.П. Белозеровым позволило повысить эффективность прогнозирования фильтрационно-емкостных характеристик пород-коллекторов нефти в процессе выполнения хозяйственных работ с нефтегазовыми предприятиями.

Директор ИТЦ АНГЛИ
САФУ имени М.В. Ломоносова



Тарасова Галина Михайловна

Акт о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор по стратегическому
развитию и науке
ФГАОУ ВО «Северный
(Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова»

 Марьяндышев Павел Андреевич

« 8 » сентября 2021 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что результаты исследований, содержащиеся в диссертационной работе Белозерова Ивана Павловича на тему «Разработка технологии цифрового моделирования керна для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов» используются в учебных и практических курсах по дисциплинам: геология нефти и газа и физика пласта, для студентов нефтегазового направления Высшей школы энергетики нефти и газа Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

Использование результатов исследований фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели керна позволило повысить качественный уровень практической подготовки студентов, обучающихся по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело» по профилям подготовки:

- Эксплуатация и обслуживание объектов нефтегазового комплекса арктического шельфа;
- Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти;
- Бурение нефтяных и газовых скважин.

И.о. директора ВШЭНиГ
САФУ имени М.В. Ломоносова
к.т.н., доцент



Вихарев Александр Николаевич