

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» на кафедре «Геологии и горных работ».

Научный руководитель: **Губайдуллин Марсель Галиуллинович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, профессор кафедры «Геологии и  
горных работ» ФГАОУ ВО «Северный  
(Арктический) федеральный университет имени  
М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Путилов Иван Сергеевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
заместитель директора по научной работе в  
области геологии филиала ООО «ЛУКОЙЛ-  
Инжиниринг», «ПермНИПИнефть»

**Галкин Сергей Владиславович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, декан горно-нефтяного  
факультета ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет»

Ведущая организация: ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,  
г. Тюмень

Защита состоится «18» марта 2022 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.419.03 при ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте [www.tyuiu.ru](http://www.tyuiu.ru).

Автореферат диссертации разослан «09» февраля 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Пономарева Татьяна  
Георгиевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 вообще 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 ядра 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 ядерном материале, от пористости по ГИС, которые методически используются для прогнозирования проницаемости

терригенных коллекторов по нефти при цифровом моделировании керна, 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 кернa 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 кернa, заключающаяся в использовании большого количества данных, которые могут быть получены без использования кернового материала 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 кернa и эффективно прогнозировать фильтрационно-емкостные характеристики пласта методами математического моделирования.

3. Использование результатов исследований фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели кернa 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 кернового материала (120 определений), на представительном объеме экспериментальных данных обосновано применение методов стохастической упаковки и молекулярной динамики для математического моделирования структуры порового пространства цифровой модели ядра 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 Российская академия 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 научно-практическая 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы защищаемые положения.

**В первой главе** диссертационной работы дан аналитический обзор опубликованных работ о результатах, достигнутых в области создания технологий цифрового моделирования керна, а также затрагивающих проблему выбора основных параметров, необходимых для успешного функционирования технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов с применением цифровой модели керна.

В настоящее время актуальной задачей и одновременно серьезным вызовом для научного сообщества является разработка молекулярно-динамической модели, предназначенной для исследования фильтрационно-емкостных свойств в микро- и 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 изучения различных явлений потока в пористых средах, определяемых по законам фильтрации Дарси и Форхгеймера, подобное моделирование является вполне применимым.

В основе молекулярно-динамических моделей, предназначенных для исследования фильтрационно-емкостных свойств пористых сред, лежит уравнение Ньютона, которое для каждой молекулы принимает следующий вид (Uth и др., 2014):

$$m_i \frac{d^2 * \bar{r}_{ij}}{d * t^2} = \sum_{j \neq i, j=1}^N \bar{F}_{ij} + \bar{F}_{\text{внешняя}} \quad (1)$$

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

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

$$\bar{F}_{ij} = \nabla \varphi_{ij} = \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial r_{ij}} \quad (2)$$

где  $\varphi_{ij}$  - потенциал взаимодействия;  $r_{ij}$  - расстояние между молекулами, м.

На основе проведенного анализа опубликованных работ автором сделан вывод о том, что на сегодняшний день развитие технологии цифрового моделирования керна позволяет говорить о ней как об альтернативном источнике информации, дающем возможность получить относительно качественные результаты исследований горных пород при недостатке или полном отсутствии керна материала.

**Во второй главе** приводятся результаты исследований теоретических основ создания и совершенствования технологии цифрового моделирования керна.

В главе излагается обоснованная автором концепция (технология) по созданию основ цифровой модели керна терригенных коллекторов и дальнейшему определению их фильтрационно-емкостных свойств. Она подразумевает использование большого количества экспериментальных данных, которые могут быть получены по исследуемым месторождениям без использования кернового материала. К таким данным относятся результаты геофизических исследований скважин, а также результаты определения гранулометрического состава горных пород, литолого-петрографического изучения шлифов и других исследований, которые могут быть получены при изучении шлама.

Моделирование порового пространства керна 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 в модели глинистым цементом. На последнем этапе указываются параметры физической модели, алгоритма калибровки и представления результатов. В итоге формируется модель пористой среды. Полученная модель используется для симуляции фильтрационных процессов в пористой среде пласта. На рисунке 1 приведен пример иллюстрации литолого-петрографических шлифов, применяемых для задания изображений слоям модели.

В дальнейшем по полученной структуре оценивается коэффициент полной пористости как отношение суммарного объема вокселей, свободных от смоделированных зерен породы (частиц), к объему всех вокселей пространства модели.

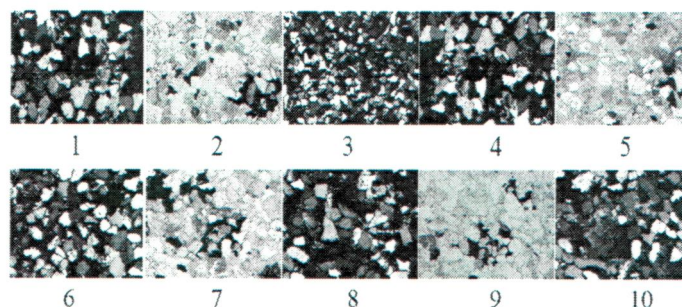


Рисунок 1 - Пример иллюстрации литолого-петрографических шлифов, применяемых для задания изображений слоев модели

Модель микроструктуры керна, сформированная с помощью алгоритма стохастической упаковки микрочастиц с уплотнением, используется в качестве основы для последующего анализа порового пространства и моделирования фильтрационных процессов. После проведения перехода от упаковки частиц к поровой сетевой модели с помощью молекулярной динамики рассчитывается проводимость одиночных каналов. Для оценки абсолютной газопроницаемости смоделированной микроструктуры в дальнейшем используется электрогидродинамическая аналогия, при этом для каждой неизолированной поры (открытая пористость) реализуется 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 газопроницаемость по закону Дарси.

Технология цифрового моделирования керна, реализуемая с использованием предлагаемой концепции, позволяет производить адекватную оценку фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.

**В третьей главе** проводится сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований по оценке литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных характеристик терригенных коллекторов с результатами цифрового моделирования керна с целью обоснования применения моделей и методов для формирования структуры порового

пространства цифровой модели зерна терригенных коллекторов и моделирования фильтрационных процессов.

С целью получения данных, необходимых для проведения сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований по оценке литолого-петрографических и фильтрационно-емкостных характеристик терригенных коллекторов с результатами цифрового моделирования зерна, автором выполнены соответствующие исследования. Для этого были изготовлены десять образцов зерна стандартного размера из эталонного коллектора, представленного терригенным песчаником Berea Sandstone (США).

По подготовленным образцам получены результаты определения коэффициентов открытой пористости и абсолютной газопроницаемости образцов зерна терригенного песчаника Berea Sandstone в атмосферных условиях (таблица 1), результаты определения проницаемости образцов по керосину при десяти различных значениях пластовой температуры. Выведены графики изменения проницаемости зерна по керосину в зависимости от пластовой температуры. Также по данному коллектору представлены результаты литолого-петрографического изучения шлифов.

Обоснован алгоритм использования результатов литолого-петрографического изучения шлифов для формирования стохастической упаковки цифровой модели зерна путем применения латентно-семантического анализа. Алгоритм включает в себя применение преобразования Хафа (рисунок 2) для определения параметров сечения границ зерен горной породы, адаптивное пороговое преобразование рассматриваемых шлифов (рисунок 3), морфологическое преобразование полученных изображений, замену цветов зерен и пустотного пространства шлифов (рисунок 4). На последнем этапе производился подсчет черных и белых пикселей и деление количества белых пикселей на общее количество пикселей, что соответствует петрографическому методу определения пористости.

Результаты литолого-петрографического изучения шлифов нашли своё применение в исследованиях по определению геометрических параметров моделируемых частиц из изображений шлифов путем машинного обучения.



Рисунок 2 – Изображение шлифа после преобразования Хафа

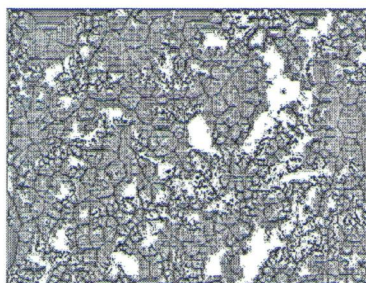


Рисунок 3 – Результата порогового преобразования шлифа

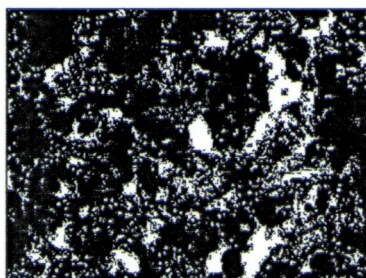


Рисунок 4 – Результат морфологического преобразования шлифа

Известно, что одним из основных факторов, определяющих пористость и проницаемость терригенных коллекторов, является размерность зерен породообразующих минералов.

Проведено цифровое моделирование керна и расчет проницаемости цифровой модели керна по керосину при различных температурах методом электродинамической аналогии для структуры, представленной плотной

стохастической упаковкой, и структуры, смоделированной методом молекулярной динамики (рисунок 5). Результаты, полученные в ходе исследований по определению фильтрационно-емкостных свойств образцов керна терригенных пород-коллекторов месторождения Vuff Berea, в дальнейшем использовались для сравнения с результатами, полученными из цифровой модели керна. Исходные параметры для цифрового моделирования получены в ходе литолого-петрографических и других исследований тех же физических образцов.

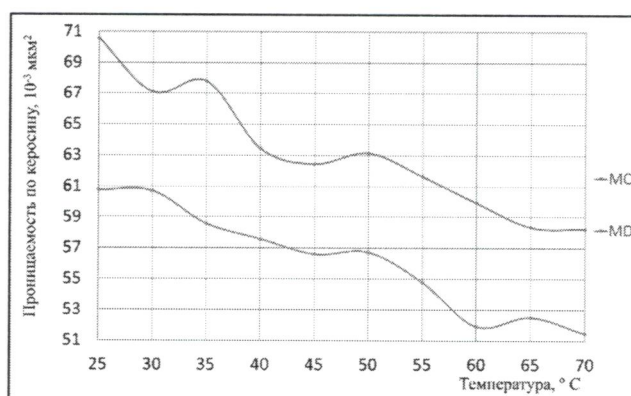


Рисунок 5 – График изменения проницаемости цифровой модели керна в зависимости от температуры (MC – структура, представленная плотной стохастической упаковкой микрочастиц; MD - структура, смоделированная методом молекулярной динамики)

В ходе проведения исследований по применению метода электродинамической аналогии для расчета проницаемости цифровой модели керна выявлены значительные сложности в определении полного сопротивления электрической цепи модели. Для решения этой задачи при цифровом моделировании керна можно воспользоваться возможностями теории перколяции, которая широко применяется при исследовании неоднородных сред.

Применение теории перколяции подразумевает разделение создаваемой модели керна на кластеры с последующим определением силы тока в каждом из них при моделировании потока методом электродинамической аналогии. После этого с применением аналитических методов рассчитывается электрическое сопротивление в



каждом из кластеров, а также полная его величина для модели в целом. Далее проводится расчет силы тока и перевод полученных значений в абсолютную газопроницаемость. В итоге, исходя из этих значений, в каждом кластере определяется общая абсолютная газопроницаемость модели.

В качестве одного из аналитических методов для решения задачи нахождения полного электрического сопротивления модели можно использовать зависимость:

$$K_{\text{п}}^{-1} = f\left(\frac{u}{\nu}\right) \quad (3)$$

где  $K_{\text{п}}$  - коэффициент абсолютной газопроницаемости,  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>;  $u$  - скорость фильтрации, см/мин;  $\nu$  - кинематическая вязкость газа, см<sup>2</sup>/с.

Данная зависимость для каждого коллектора является индивидуальной и, независимо от характера и особенностей структуры исследуемых образцов, имеет один и тот же вид. Применение этой зависимости позволило рассчитать коэффициент абсолютной газопроницаемости по каждому из десяти образцов.

В дальнейшем 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 суммарная погрешность  $\frac{\Delta K}{K}$  при определении абсолютной газопроницаемости варьируется в диапазоне от 9,3 до 22,9 %.

Результаты определения абсолютной газопроницаемости цифровой модели зерна в целом показали достаточную сходимость с результатами, полученными по образцам реальных пород-коллекторов терригенного песчаника (таблица 1).

Таблица 1- Результаты сравнения измеренной и вычисленной абсолютной газопроницаемости эталонных образцов керна терригенного песчаника Berea Sandstone

№ образца	Длина, см	Диаметр, см	Коэффициент открытой пористости, %	Измеренная абсолютная газопроницаемость, $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>	Вычисленная абсолютная газопроницаемость для цифровой модели керна, $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>	Отклонение $\frac{\Delta K}{K}$ , %
1	3,068	3,003	20,11	101,01	116,61	13,37
2	2,682	2,997	20,42	125,64	128,61	2,31
3	3,110	2,999	17,99	130,25	118,20	10,19
4	2,722	2,996	18,89	126,43	103,45	22,21
5	2,743	3,002	17,48	115,82	104,25	11,10
6	2,854	3,003	18,55	111,64	108,47	2,92
7	2,974	2,995	19,63	121,13	127,84	5,25
8	3,580	2,995	18,07	121,32	136,07	11,05
9	2,967	2,997	18,52	126,22	112,77	11,93
10	3,630	3,003	18,79	103,64	140,77	26,38

Как видно из приведенных данных, применение данного подхода при цифровом моделировании керна позволит с достаточной степенью точности определять абсолютную газопроницаемость цифровых моделей керна.

**В четвертой главе** приводится оценка возможностей использования данных ГИС для установления и использования некоторых параметров при цифровом моделировании керна.

Для проведения вычислительных экспериментов на суперкомпьютере при цифровом моделировании керна автором были проведены исследования с целью установления зависимостей проницаемости по керну от пористости по данным ГИС. Выполнен анализ геофизических данных по 5 скважинам 5 месторождений с терригенными коллекторами, а также анализ результатов определения коэффициентов пористости в атмосферных и пластовых условиях на керновом материале

по тем же скважинам. Затем проводилось сопоставление результатов определения проницаемости по нефти в пластовых условиях, изученной на керновом материале, с результатами анализа пористости по данным нейтронного каротажа (ГИС). Далее проводился корреляционный анализ связей «кern-ГИС».

В ходе анализа для исследуемых скважин месторождений с терригенными коллекторами была построена расчетная зависимость проницаемости по нефти от пористости по ГИС, которая имеет следующий вид:

$$\lg K_{\text{пр}}(\text{нефт}) = A * K_{\text{п}}(\text{ГИС}) - B \quad (4)$$

где  $K_{\text{пр}}(\text{нефт})$  - коэффициент проницаемости по нефти,  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>;

$K_{\text{п}}(\text{ГИС})$  - коэффициент пористости по ГИС, %.

После наложения результатов по всем исследуемым скважинам рассматриваемых месторождений (рисунок 6) полученная зависимость принимает вид:

$$K_{\text{пр}}(\text{нефт}) = 9,5624 * K_{\text{п}}(\text{ГИС}) - 55,555 \quad (5)$$

где  $K_{\text{пр}}(\text{нефт})$  - коэффициент проницаемости по нефти,  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>;  $K_{\text{п}}(\text{ГИС})$  - коэффициент пористости по ГИС, %.

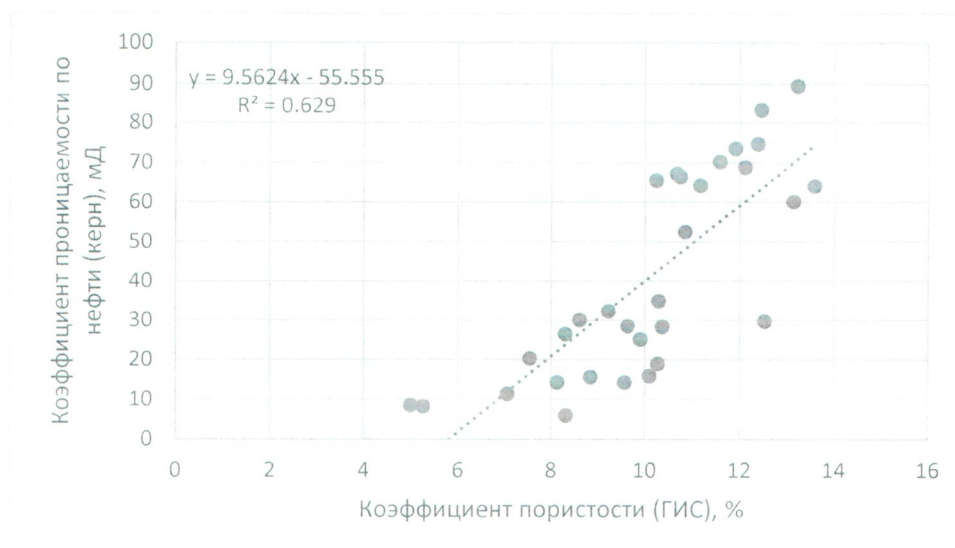


Рисунок 6 – Корреляционная зависимость между коэффициентами проницаемости по нефти, определенными на керновом материале, и пористостью по ГИС по всем скважинам месторождений

Сопоставление коэффициентов проницаемости по нефти, определенных на керновом материале, с пористостью по ГИС, а также расчетные значения проницаемости показывают, что показатели имеют приемлемую сходимость. Средний коэффициент корреляции по всем скважинам составил 0,648. Следует отметить, что данная корреляционная зависимость построена по 5 скважинам месторождений с терригенными отложениями, что не позволяет считать её в полной мере представительной, однако подтверждает определенную методическую ценность.

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. В главе также приводится оценка других возможностей использования данных ГИС в целях применения при цифровом моделировании 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях из перечня ВАК**

#### **при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

1. Белозеров, И.П. Влияние фазовых переходов асфальтенов на проницаемость породы-коллектора / **И.П. Белозеров**, А.А. Лобанов, Е.Ю. Пустова, И.П. Белозеров, В.Е. Шулев, А.В. Юрьев, А.Б. Золотухин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2017. - № 8. - С. 33-35.

2. Белозеров, И.П. Экспериментальные исследования относительных фазовых проницаемостей и коэффициента вытеснения нефти водой в

сложнопостроенных коллекторах / А.В. Юрьев, М.Г. Губайдуллин, **И.П. Белозеров** // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2017. - № 2. - С. 49-52.

3. Белозеров, И.П. Experimental determination of porosity and permeability properties of terrigenous reservoirs for creation and validation of a digital core model / И.П. Белозеров // Arctic Environmental Research. - 2018. - Т. 18. № 4. - С. 141-147.

**Публикации в изданиях, включенных в международную реферативную базу данных Scopus:**

4. Belozarov, I. The model of the microstructure of a clastic oil and gas reservoir rock / **I. Belozarov**, V. Berezovsky, M. Gubaydullin, A. Yur'ev, // В сборнике: Тюмень-2017: Геонауки – ключ к рациональному освоению недр. 5, Geosciences - The Key to Sustainable Development of Mineral Resources. EAGE V научно-практ. конф.. - 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700081>.

5. Belozarov, I. Numerical and laboratory examinations for digital rock modeling for clastic oil and gas reservoirs / **I. Belozarov**, V. Berezovsky, M. Gubaydullin, A. Yur'ev // 17th International conference on geoinformatics - theoretical and applied aspects. - 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801775>.

6. Belozarov, I. Digital core modelling for clastic oil and gas reservoir / **I. Belozarov**, V. Berezovsky, M. Gubaydullin, A. Yur'ev // Journal of physics: Conference series. - 2018. - Т. 1015. - С. 032016.

7. Belozarov, I. Examination of clastic oil and gas reservoir rock permeability modeling by molecular dynamics simulation using high-performance computing // **I. Belozarov**, V. Berezovsky, A. Yur'ev, M. Gubaydullin // 4th Russian Supercomputing Days Conference. - 2019. - Vol. 965. - P. 208-217.

8. Belozarov, I. Digital Rock Modeling of a Terrigenous Oil and Gas Reservoirs for Predicting Rock Permeability with Its Fitting Using Machine

Learning / **I. Belozеров**, V. Berezovsky, Y. Bai, M. Gubaydullin // Communications in Computer and Information Science. - 2019. - Vol. 1129. - С. 203-213.

9. 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.

#### **Публикации в других изданиях:**

10. Белозеров, И.П. О создании цифровой модели ядра терригенных пород-коллекторов нефти / И.П. Белозеров // Сборник избранных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Управление инновационным развитием арктической зоны Российской Федерации» - 2017. - С. 397-399.

11. Белозеров, И.П. О создании цифровой модели ядра терригенных коллекторов нефти и газа / **И.П. Белозеров**, М.Г. Губайдуллин, В.Н. Попов, В.В. Березовский // Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции на базе Кубанского государственного технологического университета совместно с Российской академией естественных наук, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» «Повышение эффективности разработки нефтяных и газовых месторождений на поздней стадии». - 2017. - С. 26.

12. Белозеров, И.П. Моделирование микроструктуры ядра терригенных коллекторов нефти и газа с использованием вычислительного кластера САФУ им. М.В. Ломоносова / **И.П. Белозеров**, В.В. Березовский, М.Г. Губайдуллин, А.В. Юрьев // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2017): короткие статьи и описания плакатов XI международной конференции. - 2017. - С. 255-261.

13. Белозеров, И.П. Об актуальности создания виртуальной модели ядра с целью исследования терригенных коллекторов нефти и газа/ **И.П. Белозеров**, М.Г. Губайдуллин // Ломоносовские научные чтения

студентов, аспирантов и молодых учёных: сборник материалов конференции. - 2017. - С. 202-205.

14. Белозеров, И.П. Использование данных геофизических исследований скважин при создании цифровой модели ядра терригенных коллекторов / **И.П. Белозеров**, М.Г. Губайдуллин // Сборник научных трудов по материалам международной научной-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики». - 2018. - С. 52-55.

15. Белозеров, И.П. Перспективы технологии цифрового моделирования ядра / **И.П. Белозеров**, А.В. Юрьев // Материалы I международной молодежной научно-практической конференции «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию». - 2018. - С. 24-28.

16. Белозеров, И.П. Об использовании результатов ГИС для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов при цифровом моделировании ядра / **И.П. Белозеров**, М.Г. Губайдуллин, А.С. Лохов // Сборник научных трудов «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики». - 2019. - С. 46-51.