

**ЮРЬЕВ АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛНОРАЗМЕРНОГО КЕРНА (на примере ряда  
месторождений севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции)**

25.00.12 – Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых  
месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь, 2019

Работа выполнена на кафедре геологии и горных работ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

**Научный руководитель:** **Губайдуллин Марсель Галиуллович**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Губина Августа Ивановна**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор  
кафедры геофизики ФГБОУ ВО «Пермский  
государственный национальный исследовательский  
университет» (г. Пермь)

**Мартюшев Дмитрий Александрович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный исследовательский политехнический  
университет» (г. Пермь)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет» (г. Уфа)

Защита диссертации состоится «04» февраля 2020 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.05, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» ([www.pstu.ru](http://www.pstu.ru)).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.05,  
кандидат технических наук, доцент

И.Н. Пономарева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Для подсчета запасов, в проектах и технологических схемах разработки месторождений необходимо получить информацию о фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС) вмещающих пород. Их достоверность в значительной степени зависит от обеспеченности петрофизической информацией. Имеющиеся методы исследований кернового материала регламентируются отраслевыми и государственными стандартами, в которых в настоящее время рассматриваются только образцы стандартного размера. Но образцы стандартного размера не отражают сложную структуру порового пространства при изучении сложнопостроенных коллекторов севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТПНГП), что приводит к занижению фильтрационных свойств. Для повышения достоверности в оценке ФЕС исследования целесообразно выполнять с применением образцов полноразмерного керна, что определяет необходимость развивать методы их изучения.

**Целью работы** является совершенствование методов определения фильтрационно-емкостных свойств пород, с применением полноразмерного керна для сложнопостроенных коллекторов месторождений нефти севера ТПНГП.

### Основные задачи исследований

1. Выполнить аналитический обзор опубликованных работ о результатах лабораторного изучения кернового материала из сложнопостроенных коллекторов, а также исследований с применением полноразмерного керна.
2. Разработать методические рекомендации по подготовке образцов полноразмерного керна к физико-гидродинамическим исследованиям.
3. Разработать методические рекомендации по выбору представительной коллекции образцов для определения физико-гидродинамических показателей из сложнопостроенных коллекторов месторождений нефти, учитывающие все диапазоны фильтрационно-емкостных свойств, которыми представлен изучаемый разрез (на примере Тэдинского месторождения нефти севера ТПНГП).
4. Обосновать применение образцов полноразмерного керна при определении граничных значений пористости для карбонатных отложений объекта  $D_3fm$  Тэдинского месторождения при выполнении подсчета запасов.

### Научная новизна исследования

1. Впервые предложена и описана количественная мера учета масштабного эффекта путем сопоставления графиков накопленной корреляции по соотношению коэффициентов проницаемости и пористости для полноразмерных и стандартных образцов керна.
2. Предложен подход для типизации пород по структуре порового пространства и определения граничных значений пористости с использованием графиков накопленной корреляции коэффициентов проницаемости и открытой пористости, коэффициентов динамической пористости и открытой пористости для полноразмерных и стандартных образцов керна.
3. На основе количественной меры оценки масштабного эффекта показано его изменение в зависимости от типа структуры порового пространства на всем диапазоне измеренных ФЕС для карбонатных отложений объекта  $D_3fm$  Тэдинского

месторождения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании необходимости применения полноразмерного керна с учетом количественной меры масштабного эффекта дифференцированного в диапазоне измерения ФЭС при подсчете запасов и проектировании разработки нефтяных месторождений, приуроченных к сложнопостроенным нефтенасыщенным коллекторам севера ТПНГП.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные методические рекомендации по подготовке образцов керна к фильтрационным исследованиям позволяют повысить качество и достоверность результатов экспериментов по определению относительных фазовых проницаемостей и коэффициента вытеснения нефти водой при изучении сложнопостроенных нефтенасыщенных коллекторов на образцах полноразмерного керна.

2. Методические рекомендации по выбору представительной коллекции образцов для определения основных физико-гидродинамических показателей, определяемых в лабораторных условиях из сложнопостроенных коллекторов, обеспечивают повышение достоверности информации, привлекаемой для геологического обеспечения разработки месторождений нефти.

3. Методы исследования сложнопостроенных нефтенасыщенных коллекторов с применением полноразмерного керна внедрены, и используются в Инновационно-технологическом центре арктических нефтегазовых лабораторных исследований Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова при выполнении научно-исследовательских работ с нефтяными компаниями, что подтверждается актом внедрения, а также в учебных курсах для студентов нефтегазового направления.

### **Методология и методы исследований**

Поставленные задачи решались с применением лабораторных методов изучения фильтрационно-емкостных свойств, а также методами математической статистики при обработке данных лабораторных исследований.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методические рекомендации по подготовке образцов полноразмерного керна к физико-гидродинамическим исследованиям, позволяющие повысить достоверность параметров используемых при подсчете запасов включающие в себя: режимы отдельного и совместного вакуумирования при определении пористости методом жидкостенасыщения; метод капиллярной вытяжки при моделировании остаточной водонасыщенности и определении начальной нефтенасыщенности.

2. Количественная мера масштабного эффекта для полноразмерных и стандартных образцов керна через сопоставление графиков накопленной корреляции по соотношению коэффициентов проницаемости и пористости во всем диапазоне измеренных ФЭС для карбонатных отложений объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения.

3. Обоснование применения образцов полноразмерного керна при

определении граничного значения открытой пористости в карбонатных отложениях объекта D<sub>3fm</sub> Тэдинского месторождения нефти.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность и обоснованность научных выводов основана на анализе существующего состояния проблемы исследования сложнопостроенных коллекторов в лабораторных условиях с применением образцов керна различного диаметра, применении современных методов и средств экспериментальных исследований, корректном использовании методов математической статистики для анализа экспериментальных исследований. Исследования выполнены в аккредитованной лаборатории, отвечающей требованиям системы качества и точности результатов.

Научные, методические и практические результаты, полученные в диссертации, доложены на следующие конференции: I Всероссийская молодежная научно-техническая конференция нефтегазовой отрасли «Молодая нефть» (Красноярск, 2014); VII Всероссийская конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (Пермь, 2014); «Комплексные научные исследования и сотрудничество в Арктике: взаимодействие вузов с промышленностью и научно-исследовательскими организациями» (Архангельск, 2015); «Глубокие горизонты науки и недр» (Тюмень, 2015); Международная научно-практическая конференция «Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа в прибрежно-шельфовой зоне Арктики России» (Архангельск, 2015); «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований» (North Charleston, USA, 2015); Международная научно-практическая конференция: «Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения» (Архангельск, 2016); XVII Международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2016» (Ухта, 2016); XX Международный научный симпозиум им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016); «Геонауки — ключ к рациональному освоению недр» (Тюмень, 2017).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, обосновании выводов, апробации и подготовке публикаций по результатам выполненной работы. Соискателем на 25 скважинах севера ТПНГП выполнены определения основных ФЕС (более 2500 определений), теоретически обоснована и на представительном объеме экспериментальных данных (более 200 экспериментов) доказана необходимость использования полноразмерного керна при изучении сложнопостроенных нефтенасыщенных коллекторов.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных трудах, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 1 публикация в издании, входящем в международную реферативную базу цитирования Scopus.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, библиографического списка, включающего 130 наименований, заключения и 2 приложений. Материал диссертации изложен на 122 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю заслуженному геологу РФ, д.г.-м.н., профессору М.Г. Губайдуллину за постоянное внимание и поддержку при выполнении данной работы. Признательность за консультации и поддержку в работе над диссертацией автор выражает д.т.н. И.С. Путилову.

### **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, затрагивающих проблему изучения сложнопостроенных коллекторов, рассмотрены результаты исследований с использованием полноразмерного керна.

Первые упоминания о лабораторных исследованиях полноразмерного керна датируются началом 50-х годов XX века. Исследователи из США В. Atkinson, D. Johnston, F. C. Kelton, В. Charles, J.W. Spurlock, R.S. Bynum, E.N. Koepf разработали процедуру анализа полноразмерного керна для определения пористости и проницаемости. Накопленный опыт нашел распространение и практическую значимость в работах других зарубежных ученых, таких как J.P. Batycky, В.В. Maini, D.B. Fisher, E. R. Carrillo, J. F. Arango, L. Lander, M. Dix, J. Kharrazi, L. Rendon, L. Matute, M. M. Honarpour, N.F. Djabbarah, K. Sampath.

В России проблемами изучения сложнопостроенных коллекторов начали заниматься сравнительно недавно. С середины 70-х годов, стали использовать полноразмерный керн при определениях ФЕС в атмосферных условиях, а середины 80-х годов XX века для этих целей использовали совместные данные геофизических и петрографических исследований. С 2006 года в исследованиях при моделировании термобарических условий стали применять образцы полноразмерного керна из сложнопостроенных коллекторов (И.П. Гурбатова и др.). В дальнейшем исследованиями сложнопостроенных коллекторов, применяя методы ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и литолого-петрографические методы для оценки ФЕС занимались такие ученые как В.Г. Топорков, С.Ю. Рудаковская и другие.

Значительное количество опубликованных работ посвящено проблемам влияния смачиваемости на показатели относительных фазовых проницаемостей и коэффициент вытеснения нефти водой, таких ученых и специалистов, как К.И. Багринцева, А.А. Губайдуллин, В.С. Балинов, В.М. Березин, А.А. Злобин, Н.А. Семенова, Т.Н. Кольчицкая, Г.П. Хижняк, В.М. Добрынин, М.Н. Дмитриев, А.Н. Кузьмичев, Н.Н. Михайлов, В.М. Максимов, М.Ю. Зубков, В.В. Семенов, А.В. Пушин и др.

Немаловажным является вопрос по определению остаточной

нефтенасыщенности для сложнопостроенных коллекторов, в лабораторных условиях, рассматривающийся в работах таких авторов, как В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Е.В. Паникаровский, Н.Ш. Хайредин, С.А. Блинов, Д.А. Кожевников, С.Г. Рассохин, А.Н. Кузьмичев, Р.С. Зайнутдинов и др.

На основе проведенного анализа ранее опубликованных работ автором был сделан вывод о том, что отсутствует единая методология в определении ФЕС и четкая позиция о применении полноразмерного керна в изучении сложнопостроенных коллекторов. Имеющиеся методы исследований керна материала ориентированы на образцы стандартного размера, однако используя только образцы стандартного размера в определениях ФЕС сложнопостроенных коллекторов, снижается достоверность данных привлекаемых для подсчета запасов и геологического обеспечения разработки месторождений нефти и газа. В связи с этим совершенствование методов в определении ФЕС с применением образцов полноразмерного керна представляет актуальную научно-практическую задачу. Для решения данной задачи необходимо дальнейшее развитие методов проведения исследований применительно к образцам полноразмерного керна, а также изучение роли масштабного эффекта, обусловленного различием размеров образцов.

**Во второй главе** описывается разработка методических рекомендаций по определению ФЕС в лабораторных условиях на образцах полноразмерного керна (массой свыше 1500 г.) для получения параметров открытой пористости и коэффициента начальной нефтенасыщенности.

На данный момент для определения коэффициента открытой пористости методом жидкостенасыщения существует ГОСТ 26450.1-85, который ориентирован на образцы керна массой до 800 г. Масса образцов полноразмерного керна составляет 1500-2000 г., что исключает возможность руководствоваться режимами отдельного и совместного вакуумирования указанными в данном документе при насыщении образцов полноразмерного керна.

Для экспериментальных исследований использовались образцы полноразмерного керна диаметром 100 мм и длиной 100 мм из месторождений севера ТПНГП. Керновый материал представлен следующими скважинами: № 4 ОЦ Восточно-Ламбешорского месторождения (карбонатные отложения  $D_3fm$  - известняки микробиаально-детритовыми, локально доломитизированны), скважина № 2106 Перевозного месторождения (терригенные отложения  $D_3fr$  - кварцевый песчаник)

В результате проведенных исследований автором были рекомендованы оптимальные режимы отдельного и совместного вакуумирования образцов полноразмерного керна для карбонатных отложений, аналогично и для терригенных отложений, которые сводятся к обоснованию времени насыщения образцов по сравнению с регламентированными в государственном стандарте. На представительном объеме экспериментальных данных показано (200 экспериментов), что для полноразмерных образцов керна, карбонатных отложений до полного насыщения без давления требуется 32 часа (время отдельного вакуумирования 24 часа), а с давлением - 6 часов. Для терригенных отложений полное насыщение в режиме без давления наступает за 16 часов (время отдельного вакуумирования 8 часов), а с давлением 4 часа.

На основании экспериментальных данных построены графические зависимости, степени насыщения образцов полноразмерного керна от времени раздельного вакуумирования без давления. Графические зависимости получены впервые, отдельно для карбонатных и терригенных отложений (рис. 1).

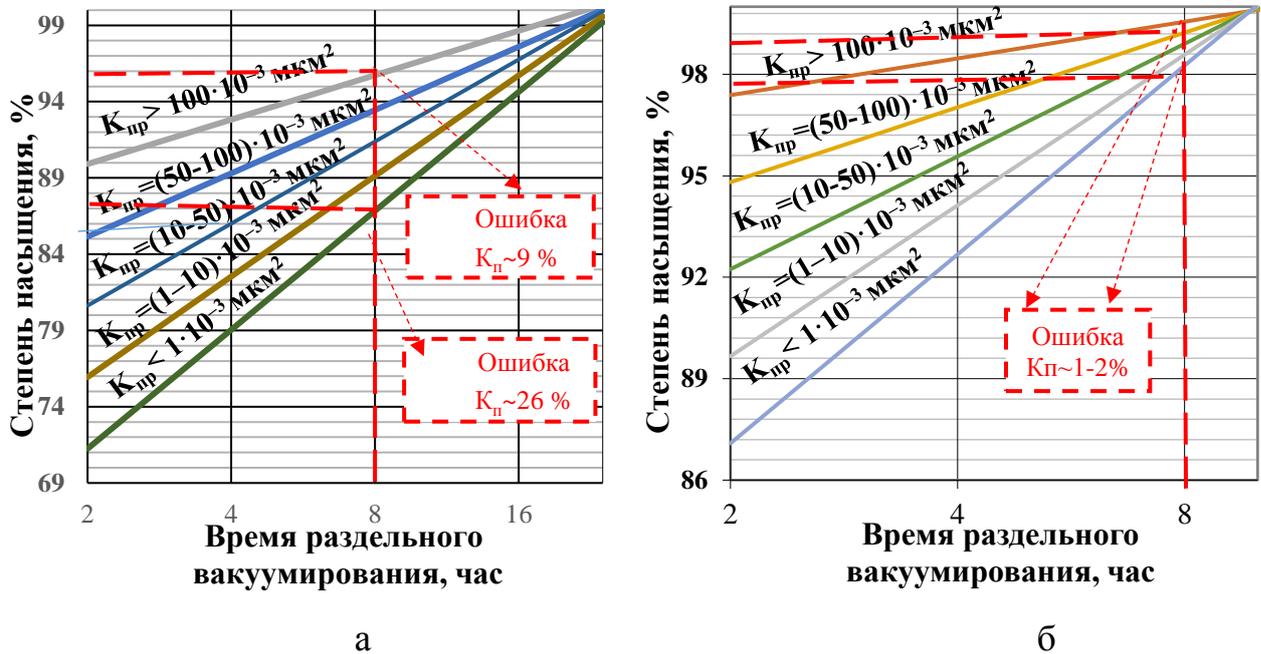


Рис. 1. Графики логарифмических зависимостей степени насыщения образцов полноразмерного керна от времени раздельного вакуумирования: (а) карбонатные отложения; (б) терригенные отложения

Применение полученных зависимостей на этапе раздельного вакуумирования, позволяет полностью насыщать образцы полноразмерного керна флюидами и получать достоверные значения коэффициента открытой пористости методом жидкостенасыщения. На рисунке 1 показано графически (пунктирные линии), если использовать режимы, указанные в регламентирующих документах, то на сколько, будут недонасыщены образцы полноразмерного керна. Для карбонатных отложений (рис. 1, а) ошибка при определении коэффициента открытой пористости в группе образцов с  $K_{пр} < 1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$  составит  $\sim 26\%$ , а в группе с  $K_{пр} > 100 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$  будет  $\sim 9\%$ , что является значительным, а для терригенных отложений полученная ошибка в 1-2% находится районе погрешности 5% в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 (рис. 1, б). Таким образом, актуальность предложенных методических рекомендаций доказана.

Далее на основе экспериментальных исследований для лабораторий, где исследования полноразмерного керна носят массовый характер, был установлен оптимальный метод моделирования остаточной водонасыщенности, которым является метод капиллярной вытяжки. Применение метода капиллярной вытяжки для образцов полноразмерного керна позволяет более точно моделировать распределение остаточной воды в поровом пространстве, сократить время моделирования остаточной водонасыщенности по сравнению с другими методами, в итоге повышается достоверность в определении начальной нефтенасыщенности.

В результате проведенных исследований на представительном объеме экспериментальных данных (200 экспериментов) установлено время моделирования остаточной водонасыщенности для карбонатных и терригенных отложений. Получены графические зависимости динамики уменьшения массы для образцов полноразмерного керна в процессе моделирования методом капиллярной вытяжки.

Полученные результаты показывают, что текущая водонасыщенность достигает начальных ее значений по карбонатным отложениям примерно за 6-7 суток, а по терригенным отложениям примерно за 5-6 суток, а в последующем происходит процесс естественного усыхания с малозначительным уменьшением массы (рис. 2). Таким образом, использование полученных зависимостей позволяет смоделировать остаточную водонасыщенность на образцах полноразмерного керна в широком диапазоне пористости, как для карбонатных, так и для терригенных отложений, и получить достоверные значения начальной нефтенасыщенности.

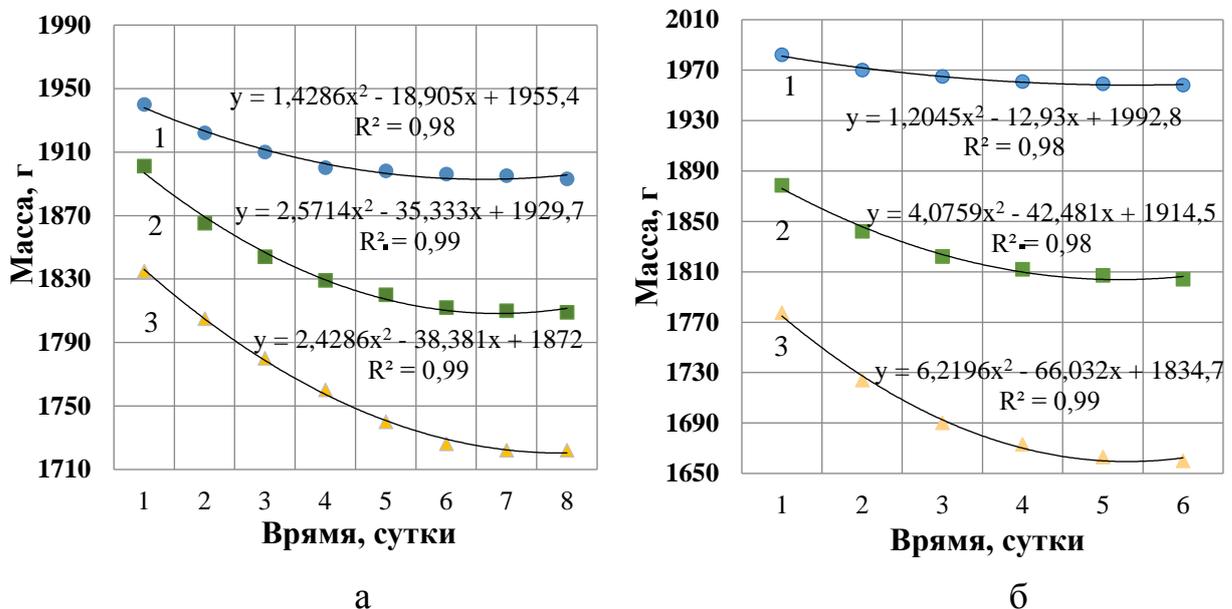


Рис. 2. Динамика уменьшения массы полноразмерных образцов в группах: (а) карбонатных отложений - 1 образцы с  $K_{п} = 5,17-5,23$  %; 2-образцы с  $K_{п} = 11,37-11,39$  %; 3-образцы с  $K_{п} = 14,0-17,46$  %; (б) терригенных отложений – 1-образцы с  $K_{п} = 9,22-9,87$  %; 2-образцы с  $K_{п} = 12,54-12,76$  %; 3-образцы с  $K_{п} = 14,37-15,15$  %

В результате проведенных исследований получены графики в широком диапазоне проницаемости, позволяющие полностью насыщать образцы полноразмерного керна флюидами, учитывающие режимы отдельного и совместного вакуумирования при определении пористости методом жидкостенасыщения. Установленные по результатам исследований изменения нелинейности в зависимости от пористости описаны квадратичными зависимостями, представленными на рисунке 2 с коэффициентами детерминации от 0,98 до 0,99.

На основе экспериментальных исследований установлено, что для лабораторий, где потоковые исследования на полноразмерном керне носят

массовый характер, наиболее оптимальным при моделировании остаточной водонасыщенности и определении начальной нефтенасыщенности на образцах полноразмерного керна является метод капиллярной вытяжки.

Предложенные методические рекомендации по подготовке образцов полноразмерного керна к физико-гидродинамическим исследованиям, позволяют повысить достоверность значений коэффициента вытеснения нефти водой, относительных фазовых проницаемостей и остаточной нефтенасыщенности определяемых в лабораторных условиях.

**В третьей главе** приведены краткие сведения о ТПНГП: географическое положение, нефетегазоносность, тектоника, геологическое строение, литологические и стратиграфические особенности, физико-химический состав нефтей.

Представлены результаты петрографического изучения пород и определения основных ФЕС в атмосферных условиях, также приведены технические характеристики лабораторного оборудования, используемого в данной работе при проведении исследований на керновом материале.

Для детальной характеристики отложений и выполнения литолого-петрографических, а также петрофизических исследований использовался керновый материал из месторождений севера ТПНГП, представленный следующими скважинами: № 4 ОЦ Восточно-Ламбешорского месторождения, скважина № 1 Восточно-Тэдинского месторождения, скважины: 101, 114, 123, 134 137 Тэдинского месторождения.

Литолого-петрографическое изучение свойств пород, выполненное на 265 шлифах, позволило уточнить основной структурно-генетический тип пород. Петрофизические исследования в атмосферных условиях позволили определить значения коэффициента открытой пористости и коэффициента абсолютной газопроницаемости для образцов стандартного размера и для полноразмерного керна. Для проведения исследований использовалось 2062 образца стандартного размера и 696 образцов полноразмерного керна.

Статистический анализ ФЕС, выполненный по указанным месторождениям, показал различия в их средних значениях, определенных на образцах стандартного размера и полноразмерном керне. При анализе использовались следующие характеристики:  $K_{\text{прг}}$  - коэффициент проницаемости по газу и  $K_{\text{п}}$  - коэффициент открытой пористости. Наибольшее различие в ФЕС отмечено для карбонатных отложений  $D_{3\text{fm}}$  Тэдинского месторождения. Отложения представлены известняками микробиально-детритовыми с вторичной сгустково-комковатой структурой, обломочными. Карбонатные отложения  $D_{3\text{fm}}$  Восточно-Ламбешорского месторождения в изученном разрезе, представлены известняками микробиально-детритовыми, локально доломитизированными (таблица 1).

Результаты определения основных фильтрационно-емкостных свойств, литолого-петрографических исследований и статистического анализа сведены в таблицу 1.

T-критерий подтверждает статистически значимое различие параметров по полноразмерным и стандартным образцам керна, что является проявлением масштабного эффекта. На основе проведенных литолого-петрографических

исследований можно сделать вывод о том, что масштабный эффект для Тэдинского и Восточно-Ламбейшорского месторождений связан с различным генезисом отложений и их составом.

Таблица 1  
Результаты определения основных ФЕС, литолого-петрографических исследований и статистического анализа

Месторождение	Породы	Тип коллектора	Пористость, %		Критерии К <sub>п</sub> : t - числитель p - знаменатель	Проницаемость, 10 <sup>-3</sup> мкм <sup>2</sup>		Критерии К <sub>пр</sub> : t - числитель p - знаменатель
			станд.	полн.		станд.	полн.	
Восточно-Ламбейшорское	Известняк	Поровый, каверно-поровый	0,4 - 20,0	1,7- 16,4	<u>0,33431</u> 0,000002	0- 450,8	0- 259,4	<u>-4,85027</u> 0,007382
Тэдинское	Известняк	Поровый, каверно-поровый	0,2- 23,95	0,2- 22,6	<u>-4,58893</u> 0,000005	0- 3847,3	0- 1147,3	<u>3,00633</u> 0,002676

На примере Тэдинского месторождения наблюдается проявление масштабного эффекта, вследствие чего данные коллектора можно отнести к сложнопостроенным (таблица 1). Как видно из рисунка 3, корреляционные поля по двум выборкам перекрываются, однако точки по образцам стандартного размера имеют большой разброс.



Рис. 3. Зависимость газопроницаемости от пористости

Для того что бы повысить информативность анализов возникает необходимость совершенствования методов исследования и более детального изучения масштабного эффекта в широком диапазоне, в зависимости от изменения структуры порового пространства, что требует разработки новых методов оценки

масштабного эффекта и разработки методики выбора представительной коллекции образцов.

**В четвертой главе** приводится обоснование методических рекомендаций по выбору представительной коллекции образцов при проведении физико-гидродинамических исследований. При разработке данных методических рекомендаций использовалось 2075 образцов керна (1532 образца стандартного размера и 543 образца полноразмерного керна), отобранных из шести скважин, приуроченных к объекту D<sub>3fm</sub> Тэдинского месторождения.

На первом этапе рассчитывалась накопленная корреляция между коэффициентом открытой пористости и коэффициентом газопроницаемости по всей выборке образцов. Построены графики корреляции отдельно для образцов стандартного размера и полноразмерного керна (рис. 4). Графики накопленной корреляции характеризуют взаимосвязь коэффициента открытой пористости и газопроницаемости в разных диапазонах пористости. Разрывы, перерывы и кривизна на графиках для полноразмерных образцов и образцов стандартного размера отражают изменение структуры порового пространства в разных диапазонах. Площадь между графиками образцов стандартного размера и полноразмерным керном является мерой масштабного эффекта во всем диапазоне ФЕС изучаемого месторождения. Расстояние между отдельными точками графика в узком значении коэффициента проницаемости по газу количественно характеризует масштабный эффект данного диапазона. Подобные меры учета масштабного эффекта предлагаются впервые. Так же используя данный график можно оценить граничные значения независимо от расчетных и использовать для оценки запасов и выделения коллекторов.



Рис. 4. График изменения коэффициента корреляции

Рассмотрим более подробно изменение угла наклона и другие эффекты на графиках накопленной корреляции. На графике выделена зона 1, в которой не может быть эффективного пустотного пространства, повышенное значение

коэффициента проницаемости вызвано трещинами техногенного происхождения образовавшихся при изготовлении образцов. Это подтверждается отсутствием корреляционных связей - образцы располагаются не линейно. По графику, можно четко выделить граничные значения, которые согласуются с расчетными значениями, взятыми на основании использования корреляционных связей проницаемости с открытой пористостью. Таким образом, используя данный подход, возможно, независимо определить граничные значения для оценки запасов и выделения коллекторов. В интервале пористости от 5 до 15 % (зона 2-3) прослеживается рост значений накопленной корреляции для обоих графиков, но для полноразмерного керна в интервале значения пористости 9 % отмечен резкий подъем, а также разрыв, вызванный значительным вкладом трещин в эффективное поровое пространство (зона 2). Далее происходит падение и выполаживание графика накопленной корреляции, обусловленное участием в большей степени каверн, пор в пустотном пространстве. График накопленной корреляции по полноразмерному керну демонстрирует более тесную связь с пористостью, но после значения пористости более 15 % наблюдается разрыв и резкий рост, что обусловлено преобладающей ролью открытых пор в проницаемости и пористости - это говорит о достоверности и информативности полученных данных (зона 4). Разрывы графика накопленной корреляции по полноразмерному керну четко отбивают и фиксируют границы разделения по типам коллектора в представленном разрезе. По образцам стандартного размера данный эффект проявляется не четко и о нем можно судить лишь по изменению угла наклона. Кривая по полноразмерному керну расположена выше, а по образцам стандартного размера ниже, что демонстрирует масштабный эффект. В целом можно сделать вывод о том, что для оценки резервуара в сложнопостроенных коллекторах наиболее представительным является полноразмерный керн, а образцы стандартного размера следует использовать для определения граничных значений.

На втором этапе проведено сопоставление результатов определения коэффициента открытой пористости и абсолютной газопроницаемости (рис. 5).

Соотношение открытой пористости и абсолютной газопроницаемости отчетливо выделяет различный характер связи между этими показателями для сложных карбонатных коллекторов с разным типом пустотного пространства.

Экспериментально, на основе методических рекомендаций по подсчету запасов, в зависимости от того, по каким пустотам преобладает фильтрация флюида, вся выборка была разделена на четыре группы: 1) трещины; 2) трещинно-порово-каверновый тип коллектора; 3) каверново-поровый тип коллектора; 4) поровый тип коллектора.

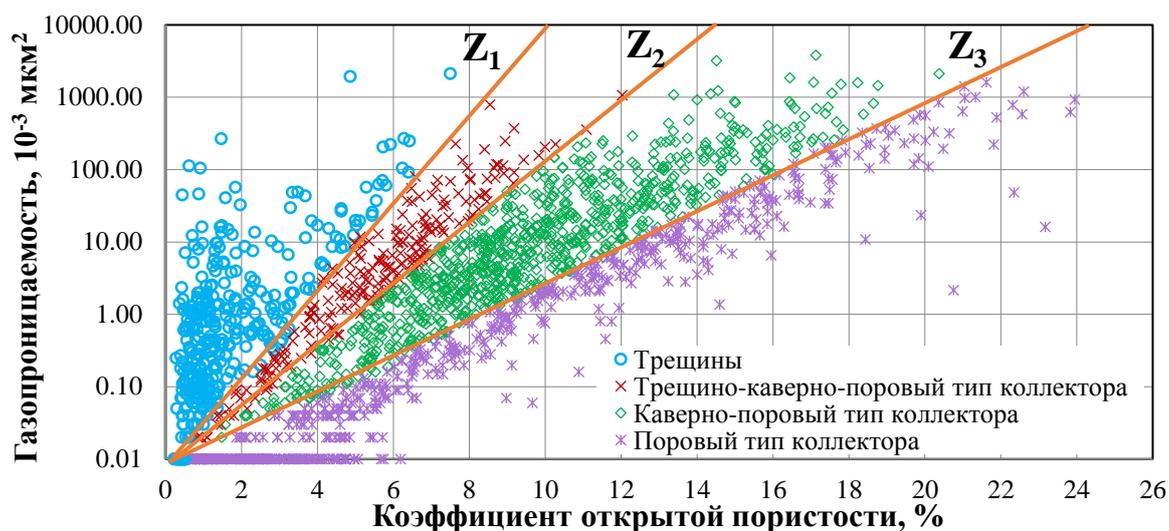


Рис. 5. Зависимость газопроницаемости от пористости с разделением образцов по типу коллекторов

На основе полученных данных построены линейно дискриминантные функции (ЛДФ), которые позволяют разделять пространство корреляционного поля по группам с качеством классификации от 92 % до 94 %. Все полученные ЛДФ - статистически значимы. Они могут быть использованы для классификации образцов в будущем, а их статистическая значимость подтверждает экспериментальное разделение на группы.

ЛДФ для объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения имеют следующий вид:

$$Z_1 = 0,919 \cdot (K_p) - 0,907 \cdot (\log_{10}(K_{\text{прг}})) - 2,803, \quad (1)$$

$$\text{clas} = 92\%; F_p/F_t = 215,94, p < 0,00001,$$

$$Z_2 = 0,773 \cdot (K_p) - 2,066 \cdot (\log_{10}(K_{\text{прг}})) - 5,043, \quad (2)$$

$$\text{clas} = 93\%; F_p/F_t = 244,88, p < 0,00001,$$

$$Z_3 = 0,776 \cdot (K_p) - 2,940 \cdot (\log_{10}(K_{\text{прг}})) - 5,455, \quad (3)$$

$$\text{clas} = 94\%; F_p/F_t = 355,63, p < 0,00001,$$

где clas - процент правильной классификации;  $F_p/F_t$  - отношение расчетного и теоретического критерия Фишера; p - уровень значимости.

ЛДФ  $Z_1$  и  $Z_3$  позволяют ограничить зону возможного отбора представительной коллекции образцов для объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения (рисунок 5).

Применив данный подход можно выделить 4 зоны (рис. 6), которые наиболее корректно отражают физико-гидродинамическую картину пласта: 1) не представлена образцами, рекомендуемыми к отбору (сведена к минимуму по граничному значению пористости); 2-3) представлена смешанными образцами стандартного размера и полноразмерный керн; 4) представлена только полноразмерным керном.

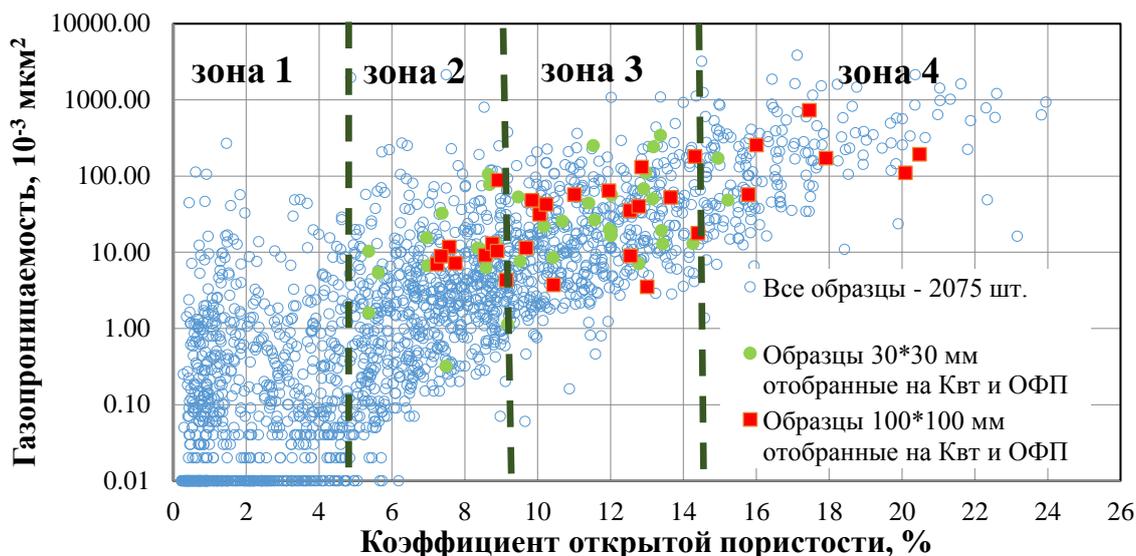


Рис. 6. Зависимость газопроницаемости от пористости

В результате выполненных исследований были научно обоснованы методические рекомендации по выбору представительной коллекции образцов для проведения физико-гидродинамических исследований. Путем сопоставления графиков накопленной корреляции по соотношению коэффициентов проницаемости и пористости впервые предложена, и описана количественная мера масштабного эффекта для полноразмерных и стандартных образцов керна.

Таким образом, на основе проведенного линейного дискриминантного анализа была решена практическая задача разделения по типам коллектора для продуктивных отложений объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения.

Впервые предложено разделение пространства на зоны с учетом структуры порового пространства и масштабного эффекта при выборе образцов керна для фильтрационных исследований, которые будут наиболее корректно отражать физико-гидродинамическую картину пласта, а результаты могут быть использованы при подсчете запасов и в проектно-технической документации.

**В пятой главе** представлены результаты физико-гидродинамических исследований на образцах керна стандартного размера и на полноразмерном керне (68 экспериментов, в т. ч. 38 на образцах стандартного размера и 30 на полноразмерных образцах) для объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения. В результате исследований получены ряд показателей: коэффициент вытеснения нефти водой, относительные фазовые проницаемости и коэффициент остаточной нефтенасыщенности.

Выполнено сопоставление значений коэффициента остаточной нефтенасыщенности, полученных для образцов стандартного размера и полноразмерных образцов. Анализ полученных результатов по коэффициенту остаточной нефтенасыщенности показывает, что для образцов полноразмерного керна наблюдаются меньшие значения стандартного отклонения 0,0647 д.ед., и более низкие значения максимальных значений 0,512 д.ед. (при средних значениях 0,305 д.ед.), чем на образцах стандартного размера соответственно 0,1123 д.ед., 0,639 д.ед. и 0,337 д.ед.

Значения остаточной нефтенасыщенности используются для расчета коэффициента динамической пористости, который рассчитывается по формуле 4:

$$K_{\text{дин.п}} = K_{\text{п}} * (1 - S_{\text{ост.в}} - S_{\text{ост.н}}), \quad (4)$$

где  $K_{\text{п}}$  - коэффициент открытой пористости,  $S_{\text{ост.в}}$  - начальная водонасыщенность и  $S_{\text{ост.н}}$  - остаточная нефтенасыщенность.

Коэффициент динамической пористости показывает объем пор, в которых возможно движение нефти при их извлечении из пласта. Получены регрессионные уравнения для полноразмерного керна (5) и образцов стандартного размера (6):

$$K_{\text{п}} = 1,6768 * K_{\text{п.дин}} + 2,8, \quad (5)$$

$$n=30, r=0,95,$$

$$K_{\text{п}} = 1,219 * K_{\text{п.дин}} + 5,8, \quad (6)$$

$$n=38, r=0,76,$$

где  $n$  - количество образцов;  $r$  - коэффициент корреляции.

Полученные уравнения линейных зависимостей статистически значимы. Самый высокий коэффициент корреляции 0,95 отмечается для образцов полноразмерного керна и 0,76 - для образцов стандартного размера. Таким образом, зависимость для полноразмерных образцов является более достоверной.

Использование зависимости только по стандартным образцам дает завышенное граничное значение коэффициента пористости, равное 5,8 %. По образцам полноразмерного керна граничное значение по пористости, составляет 2,8 %. Расхождение между граничными значениями при использовании стандартных и полноразмерных образцов составляет 3%, что весьма существенно для подсчета запасов. Следовательно, граничное значение по пористости для данного месторождения необходимо принимать по образцам полноразмерного керна, т.к. образцы стандартного размера не в полной мере отражают структуру порового пространства для условий карбонатных отложений D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения. Таким образом, используя предлагаемый подход, возможно, выделить граничные значения коэффициента открытой пористости для объема тех пор, по которым происходит движение нефти в пласте, и использовать полученное значение для оценки запасов и геологического обеспечения разработки месторождений.

Для детального анализа проявления масштабного эффекта на основе полученных экспериментальных данных рассчитана накопленная корреляция между коэффициентом открытой пористости и коэффициентом динамической пористости по всей выборке образцов, на которых проводились физико-гидродинамические исследования. Построены графики накопленной корреляции отдельно для образцов стандартного размера и полноразмерного керна (рис. 7). Графики накопленной корреляции отражают взаимосвязь коэффициента открытой пористости и коэффициента динамической пористости в разных диапазонах

пористости, что представляет интерес и может характеризовать извлекаемые запасы при вытеснении нефти водой.

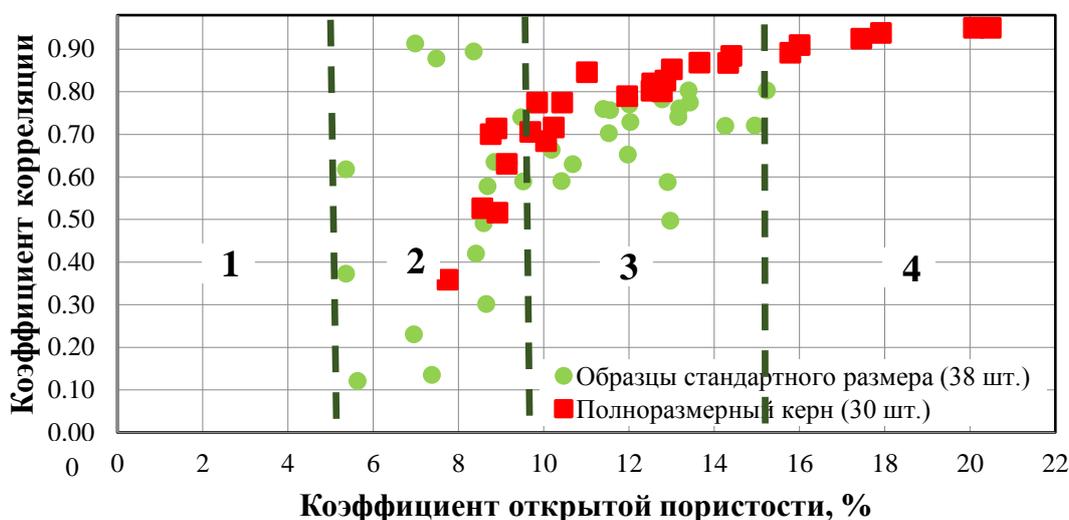


Рис. 7. График изменения коэффициента корреляции

Разрывы, перерывы и кривизна на графиках для полноразмерных образцов и образцов стандартного размера отражают изменение структуры порового пространства в разных диапазонах, что согласуется с данными на рисунке 4.

Как видно из рисунка 7, в диапазоне открытой пористости от 5 до 8 % (зона 2) наблюдается высокая дисперсия по образцам стандартного размера - корреляционная связь не прослеживается, но начиная с 8 % в данной зоне прослеживается рост значений накопленной корреляции для обоих графиков. В зоне 3 наблюдается рассеивание точек по образцам стандартного размера, корреляционная связь не прослеживается, но степень дисперсии меньше, чем в зоне 2. Для полноразмерных образцов происходит стабилизация накопленной корреляции, но при значении пористости 11 % происходит разрыв корреляционной связи, обусловленное изменение структуры порового пространства. Зона 4 представлена только образцами полноразмерного керна, накопленная корреляция демонстрирует плавный рост с выходом на стабилизацию.

Анализ накопленных корреляционных полей показывает, разброс точек стандартных образцов, и закономерное увеличение значений накопленной корреляции по полноразмерным образцам, что показывает их более высокую информативность для описания фильтрационных процессов в данном диапазоне и как следствие это влияет на качество полученного регрессионного уравнения для полноразмерного керна, выраженного в коэффициенте корреляции 0,95.

В целом накопленная корреляция по образцам полноразмерного керна расположена выше и имеет более высокое значение корреляции, что демонстрирует масштабный эффект для фильтрационных показателей и отражает с достаточной степенью достоверности физико-гидродинамические процессы, происходящие в пласте при движении флюидов. Следует отметить, что проявление масштабного эффекта было установлено даже на относительно небольшой

выборке.

В результате анализа результатов выполненных физико-гидродинамических исследований на образцах керна стандартного размера и на полноразмерном керне можно сделать следующие выводы:

- подтверждено значительное влияние масштабного эффекта при изучении ФЭС в сложнопостроенных коллекторах;
- структура порового пространства пород оказывают большое влияние на значение остаточной нефтенасыщенности, при вытеснении нефти водой из пористых сред.

Сопоставление полученных результатов на образцах стандартного размера и полноразмерном керне, позволило обосновать целесообразность применения образцов полноразмерного керна с учетом количественной меры масштабного эффекта дифференцированного в широком диапазоне ФЭС, при определении граничных значений пористости для карбонатных отложений объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения нефти.

Полученные результаты показывают необходимость учета масштабного эффекта с учетом особенностей структуры порового пространства при подсчете геологических и извлекаемых запасов.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Впервые установлены и описаны квадратичными зависимостями изменения нелинейности в зависимости от пористости для образцов полноразмерного керна при моделировании остаточной водонасыщенности.

2. Усовершенствованные методы для подготовки образцов полноразмерного керна к физико-гидродинамическим исследованиям позволяют повысить достоверность параметров используемых при подсчете запасов, которые включают в себя: режимы раздельного и совместного вакуумирования при определении пористости методом жидкостенасыщения; метод капиллярной вытяжки при моделировании остаточной водонасыщенности и определении начальной нефтенасыщенности.

3. Впервые предложена, и описана количественная мера учета масштабного эффекта, а также предложен подход для типизации пород по структуре порового пространства и определения граничных значений пористости с использованием графиков накопленной корреляции.

4. Выполненный большой объем исследований позволил проанализировать проявление масштабного эффекта на различных этапах определения ФЭС в лабораторных условиях, обосновать применение образцов полноразмерного керна при определении граничных значений пористости для карбонатных отложений объекта D<sub>3</sub>fm Тэдинского месторождения при выполнении подсчета запасов.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:**

1. Юрьев, А.В. Особенности изучения петрофизических и упругих свойств керна в сложнопостроенных коллекторах нефти и газа при моделировании термобарических пластовых условий / А.В. Юрьев, И.П. Гурбатова, С.В. Мелехин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2010. -

№ 5. - С. 67-72.

2. Юрьев, А.В. Разработка рекомендаций и оборудования по насыщению образцов полноразмерного керна в лабораторных условиях / А.В. Юрьев // Вестник ЦКР Роснедра. - 2014. - № 3. - С. 51-54.

3. Юрьев, А.В. Методические рекомендации по моделированию остаточной водонасыщенности в лабораторных условиях на образцах полноразмерного керна / А.В. Юрьев, Д.Б. Чижов // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. - 2015. - № 1. - С. 50-55.

4. Юрьев, А.В. Определение коэффициента вытеснения нефти водой на образцах полноразмерного керна / А.В. Юрьев, В.Е. Шулев // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. - 2015. - № 2. - С. 28-34.

5. Юрьев, А.В. 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.

6. Юрьев, А.В. Насыщение образцов полноразмерного керна водой в лабораторных условиях / А.В. Юрьев // Arctic Environmental Research. - 2017. - № 2. - С. 98-103.

**в издании, включенном в международную реферативную базу данных Scopus:**

7. Yurev, A. The model of the microstructure of a clastic oil and gas reservoir rock / A. Yurev, V. Berezovsky, I. Belozarov, M. Gubaydullin // 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.

**Прочие научные труды по теме диссертации:**

8. Юрьев, А.В. Определение относительных фазовых проницаемостей и коэффициентов вытеснения нефти водой на образцах полноразмерного керна / А.В. Юрьев, И.П. Белозеров, В.Е. Шулев // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы VII Всероссийской конференции. - 2014. - С. 342-345.

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

10. Юрьев, А.В. Влияние смачиваемости поверхности твердой фазы пород-коллекторов на характер кривых относительных фазовых проницаемостей и коэффициента вытеснения нефти водой / А.В. Юрьев, И.П. Белозеров, В.Е. Шулев // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII международной научно-практической конференции. - 2015. - С. 11-15.