

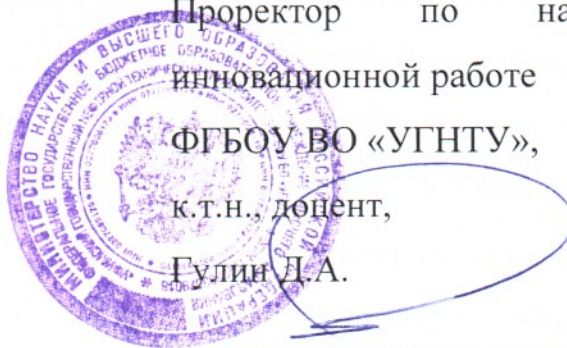
«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
инновационной работе

ФГБОУ ВО «УГНТУ»,

к.т.н., доцент,

Гулин Д.А.



2 апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на диссертационную работу **Кряжева Ярослава Александровича** на тему:

«Моделирование устойчивости процесса неизотермического вытеснения нефти», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет». Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Шевелёв А.П.

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Повышение эффективности топливно-энергетического комплекса является важным национальным приоритетом Российской Федерации, в частности, в контексте истощения традиционных запасов углеводородов и необходимости обеспечения долгосрочной ресурсной базы. Особую актуальность приобретает освоение трудноизвлекаемых запасов, которые составляют значительную долю в ресурсном потенциале страны. Одним из ключевых типов трудноизвлекаемых

Уфимский университет науки и технологий		
Вх. №	1353-13	
« 07 »	04	2026 г.

запасов являются высоковязкие нефти, при разработке которых может наблюдаться неустойчивое вытеснение, которое приводит к снижению эффективности добычи. Для повышения нефтеотдачи в таких условиях активно применяются тепловые методы, такие как закачка пара или пароциклическое воздействие. Однако в этих процессах проблема неустойчивости фронта вытеснения полностью не решается.

Исследование устойчивости в этом случае является актуальным направлением исследований, так как позволяет выявить основные параметры системы «порода-флюид-система разработки», которые оказывают наибольшее влияние на устойчивость фронта, и определить методы их регулирования, к которым могут относиться изменение характеристик вытесняющего агента или изменение условий закачки.

Таким образом диссертационное исследование является актуальным, так как направлено на совершенствование методов разработки месторождений высоковязких нефтей.

2. Цель работы

Разработка методики исследования устойчивости процессов изотермического и неизотермического вытеснения нефти высокоподвижным флюидом.

3. Обоснованность и достоверность результатов диссертационных исследований

Обоснованность результатов диссертационных исследований соответствует общепринятой в рамках научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Достоверность результатов исследования обеспечивается за счет использования фундаментальных уравнений механики многофазных сред и уравнений фильтрации в многокомпонентном неизотермическом случае, применения классических численных методов решения задач в рамках введенных допущений к рассматриваемым физическим процессам.

Дополнительно достоверность результатов подтверждается валидацией разработанной методики критериального анализа устойчивости фронта вытеснения нефти и верификацией модели трехфазной неизотермической фильтрации. Материалы диссертационных исследований опубликованы в ряде рецензируемых профильных научных журналах России и мира и успешно представлены на российских и международных конференциях, что говорит о достаточной апробации проведенных исследований.

4. Анализ структуры и содержания работы

Первая глава диссертационной работы посвящена литературному обзору имеющихся исследований в области изучения и моделирования устойчивости фронта вытеснения нефти при закачке в пласт высокоподвижных флюидов. Рассмотрены как основополагающие работы, заложившие основу теории устойчивости фронта вытеснения, так и более поздние работы, включающие математическое моделирование неустойчивого вытеснения в масштабе пор и масштабе месторождения.

Во второй главе диссертационной работы автором приводится методика критериального исследования устойчивости фронта вытеснения нефти высокоподвижным флюидом в изотермическом приближении.

Приводится физико-математическая модель несмешивающейся фильтрации несжимаемых флюидов в процессе вытеснения нефти в пористой среде, которая позволяет рассчитать значение водонасыщенности на фронте вытеснения. Приводится аналог уравнения Баклея-Левретта с учетом гравитационных и капиллярных сил.

Вводится и обосновывается условие возникновения неустойчивости фронта вытеснения в виде системы неравенств, совместный анализ которой вместе с представленной физико-математической моделью изотермической фильтрации позволил автору выявить критические числа, которые определяют устойчивость фронта вытеснения:

1. отношение подвижности флюида перед фронтом вытеснения к подвижности флюида за фронтом вытеснения M ;
2. безразмерная фильтрационная скорость U_{cr} , характеризующая стабилизационное влияние гравитационных и капиллярных сил.

Расчет введенных критических чисел на модельных данных позволил выявить диапазон вязкостей нефти, для которого наблюдается устойчивое вытеснение и значения предельной скорости фильтрации, при которой не будет возникать неустойчивость, когда вытесняемый флюид обладает большей подвижностью чем вытесняемый.

Особый интерес имеет приведенный анализ влияния температуры углеводорода на введенные критические числа за счет использования корреляционной зависимости Эйнштейна для вязкости нефти, что может позволить использовать разработанную методику для анализа эффективности тепловых методов.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке физико-математической модели трехфазной неизотермической фильтрации нефти, воды и пара при закачке пароводяной смеси в пласт с учетом введенных допущений.

Приводятся основные уравнения, включающие в себя уравнения сохранения массы, импульсов, энергии и замыкающие соотношения, характеризующие зависимость плотностей и вязкостей фаз от термобарических условий. Стоит отметить что в качестве уравнений состояния для жидких фаз используются уравнения Лихачева-Фогельсона, которые хорошо аппроксимируют экспериментальные исследования.

Особое внимание привлекает обезразмеривание полученной системы уравнений, которое позволило выделить новый комплекс подобия – безразмерное A , характеризующее отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем.

В четвертой главе диссертационной работы приводится алгоритм расчета температуры, давления и насыщенностей флюидов в процессе вытеснения нефти пароводяной смесью на основе применения явной конечно-разностной схемы.

Ключевым моментом является анализ распределения температуры, газонасыщенности и нефтенасыщенности в зависимости от ранее введенного безразмерного числа A , который показал, что при высоких тепловых потерях происходит более раннее образование «языков» вытесняющей фазы. Проведенный анализ позволил автору получить корреляционную зависимость между введенным числом A и временем начала интенсивного «языкообразования».

Основные выводы, обладающие научной и практической значимостью, по мнению специалистов ведущей организации, следующие:

- разработанная методика критериальной оценки устойчивости фронта вытеснения нефти позволяет рассчитать критическую скорость вытеснения высоковязкой нефти водой в поле гравитационных и капиллярных сил в пористой среде, при которой фронт вытеснения является устойчивым даже в случае, когда подвижность вытесняемой жидкости ниже, чем у вытесняющей;
- разработанная модель трехфазной двухкомпонентной неизоэнтальной фильтрации нефти, воды и пара позволяет интегрально оценить время начала интенсивного образования «языков» вытесняющей фазы;
- проведенный анализ влияния критического числа A , определяющего отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем позволяет получить корреляционную зависимость времени начала «языкообразования» от этого числа.

5. Значимость результатов диссертационных исследований автора для развития науки

Исследования, проведенные в диссертационной работе, имеют следующее научное применение:

- модифицированный подход Баклея-Леверетта позволяет учесть влияние капиллярных и гравитационных сил на динамику фронта вытеснения нефти.
- предложена новая физико-математическая модель, углубляющая существующие представления о процессе вытеснения нефти пароводяной смесью, которая позволяет оценить время начала образования «языков» вытесняющей фазы.

6. Значимость результатов диссертационных исследований автора для производства

- разработанная методика критериального исследования устойчивости фронта вытеснения нефти позволила выявить основные параметры в системе «порода-флюид-система разработки», влияющие на устойчивость и их значения, при которых не возникает образования «языков» вытесняющей фазы;
- введенное критическое число A , определяющее отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем с помощью полученной корреляционной зависимости позволяет оценить время начала интенсивного «языкообразования»

7. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследований, проведенных автором диссертации, могут быть использованы в академических научных и научно-исследовательских организациях: Отделение наук о Земле и нефтегазовых технологий Академии наук Республики Башкортостан, Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук при проведении исследований процессов многофазной фильтрации в пористой среде, процессов тепломассопереноса для тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Рекомендуется также использование результатов диссертационных исследований, выполненных автором, в таких организациях нефтегазовой отрасли, как ООО «РН Геология Исследования Разработка», ПАО «ЛУКОЙЛ», АО «Институт геологии и разработки горючих ископаемых», ООО «РН-БашНИПИнефть», ПАО «Татнефть» для анализа и проектирования методов разработки высоковязких нефтей.

Результаты исследования также могут быть использованы в образовательном процессе при подготовке магистров и аспирантов по направлениям подготовки, связанным с физикой, теплофизикой, механикой жидкости, газа и плазмы в таких высших учебных заведениях, как Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфимский университет науки и технологий, Тюменский государственный университет, Тюменский индустриальный университет.

8. Список литературы

Приведенный в работе список литературы содержит 110 источников, состоит из фундаментальных и современных работ в области исследований устойчивости фронта вытеснения нефти, а также моделирования неустойчивого вытеснения, включает необходимое количество отечественных и зарубежных материалов. По теме диссертационных исследований опубликовано 8 научных работ, в том числе 1 научная статья в рецензируемом научном издании, входящем в базу данных Chemical Abstracts, 1 – в журнале, входящем в базу данных Scopus, 2 – в журнале, входящем в перечень ВАК. Это подтверждает квалификацию автора и качество проведенных исследований.

9. Апробация работы

Результаты диссертационной работы прошли достаточную апробацию и были представлены на 6 профильных конференциях, в частности, на Международном научно-техническом семинаре «Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче» (Тюмень, 2019), Всероссийской конференции «X Школа-семинар молодых ученых по теплофизике и механике

многофазных систем «Трансформация нефтегазового комплекса» (Тюмень, 2023), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024» (Москва, 2024), Всероссийской конференции «XI Школа-семинар молодых ученых по теплофизике и механике многофазных систем «Трансформация нефтегазового комплекса» (Тюмень, 2024), Международной научно-практической конференции имени Д. И. Менделеева (Тюмень, 2024), Международной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации» (Тюмень, 2024). Имеется 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

10. Соответствие паспорту научной специальности

Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют пункту 1 – Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах (физико-математические науки), пункту 6 – Теория подобия теплофизических процессов (физико-математические науки), пункту 7 – Теоретическая и техническая термодинамика, теорию фазовых переходов при горении в гетерогенных системах (физико-математические науки), пункту 8 – Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте, расчет и проектирование нового теплотехнического оборудования (физико-математические науки) паспорта научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

11. Замечания по диссертационной работе

1. Определенный научный и практический интерес представляет сопоставление результатов численного моделирования с данными промысловых исследований на реальных объектах, однако такое сравнение в представленной работе отсутствует.

2. В диссертации не приведено сравнительного анализа полученных результатов с результатами моделирования неустойчивого процесса вытеснения нефти.
3. Из текста диссертации остается не до конца ясным: каким именно образом в модифицированной функции Баклея-Левретта учтено влияние капиллярных сил. Этот аспект требует более развернутого пояснения.
4. Выбор уравнения Лихачева-Фогельсона в качестве уравнения состояния жидких фаз для моделирования в рамках темы исследования обосновано недостаточно полно.
5. Не в полной мере исследовано влияние изменения относительных фазовых проницаемостей (ОФП) на итоговые результаты расчетов, а также не учтена зависимость ОФП от температуры, что является важным при моделировании неизотермических процессов.

12. Заключение по диссертационной работе


Автореферат написан качественным научным языком и полностью отражает основные положения диссертационной работы. Диссертационное исследование Кряжева Ярослава Александровича, представленное на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершенным и представляет собой цельную научную работу. Полученные в работе результаты физически не противоречивы и обоснованы, обладают научной новизной, имеют несомненную теоретическую и практическую значимость. Результаты исследований могут быть применены для проектирования разработки месторождений с высоковязкой нефтью

Диссертационная работа Я. А. Кряжева «Моделирование устойчивости процесса неизотермического вытеснения нефти» полностью соответствует требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ярослав Александрович Кряжев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

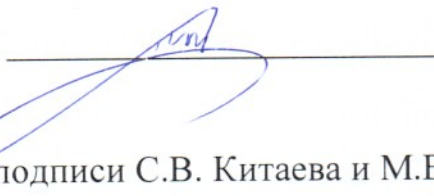
физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв ведущей организации рассмотрен и одобрен на совместном заседании кафедр «Промышленная теплоэнергетика» и «Физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» «11» марта 2026 г., протокол № 8

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», профессор, доктор технических наук по специальности 25.00.19 - Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, Китаев Сергей Владимирович



Доцент кафедры «Физика», кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы, Столповский Максим Владимирович



Личные подписи С.В. Китаева и М.В. Столповского заверяю

Начальник ОРГ





О.А. Дадаян

2.04.2026

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

Адрес: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: +7 (347)243-19-77

Эл. почта: info@rusoil.net

Сайт: <https://ugntu.ru>