

На правах рукописи



МУХАРЯМОВА ГУЛЬШАТ ИЛЬДАРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОВЯЗКИХ И ПАРАФИНИСТЫХ
НЕФТЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель: **Ковалева Лиана Ароновна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Николаев Александр Константинович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Рахимов Артур Ашотович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Экспериментальная гидродинамика» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Нефтегазтехнология», г. Уфа

Защита диссертации состоится «03» октября 2024 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.05 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук, доцент



Киреев Виктор Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Трубопроводный транспорт – это стратегический вид транспорта нефти в России с наибольшим объёмом грузооборота. Так в 2021 году перекачка нефти составила 449,7 миллиона тонн, нефтепродуктов – 38,9 миллиона тонн. Действующая на сегодняшний день сеть нефтепроводов снабжает углеводородным сырьём Россию, страны Западной Европы, Юго-Восточной Азии, Турцию. Протяжённость магистральных трубопроводов в России составляет более 250 тыс. км.

Объемы транспортируемой по сети нефтепроводов нефти увеличиваются из года в год, вместе с тем, в связи с выработкой месторождений с залежами легкой ньютоновской нефти, все больше в системе магистральных нефтепроводов становится доля парафинистых, высоковязких нефтей со сложными реологическими свойствами. Для обеспечения трубопроводного транспорта таких нефтей требуется применение качественно новых технических решений. Существует целый ряд решений в области улучшения свойств тяжелых, высоковязких, парафинистых нефтей, наиболее популярными среди которых являются: термообработка, введение депрессаторов, компаундирование, газонасыщение, перекачка в виде эмульсий. Но данные методы, несмотря на наличие большого опыта их применения в промышленной практике, недостаточно экономически эффективны.

В связи с этим проблемы управления свойствами высоковязких, парафинистых, тяжелых нефтей в системе трубопроводного транспорта и разработки соответствующих методик расчета трубопроводов являются актуальными. Причем в качестве путей решения данных проблем все чаще рассматриваются методы, реализуемые на основе различных видов физического воздействия: магнитного, ультразвукового, электромагнитного, радиационного и др.

Степень разработанности темы исследования

С целью обеспечения заданной производительности нефтепровода и во избежание его застывания при трубопроводном транспорте высоковязких и парафинистых нефтей используются различные технологии улучшения свойств нефти. Одной из таких перспективных технологий является электромагнитная обработка, изучению влияния которой посвящена данная работа.

Вопросами электромагнитных воздействий на углеводородные системы занимались такие ученые, как: Л.Н. Андреева, А.Т. Ахметов, Б.Р. Ахметов, Р. Велес Парра, С.С. Душкин, И.Н. Евдокимов, В.Н. Евстратов, Н.Ю. Елисеев, Р.Р. Зиннатуллин, А.А. Кислицын, В.И. Классен, Л.А. Ковалева, А.А. Коршак, О.Л. Кузнецов, А.Х. Мирзаджанзаде, Н.А. Пивоварова, Ф.Л. Саяхов, Е.Ф. Тебенезин, Ф.Г. Унгер, И.Л. Хабибулин, Р. Н. Харлампида, В.В. Шайдаков, Т. Babadagly, F. G. Unger, Veles Parra R., R. Tao, X. Xu, K. Huang, H. Tang, D. Bell, G.A. Mansoori и другие. В результате разработана достаточно обширная база теоретических и экспериментальных исследований по вопросам воздействия электромагнитных полей на нефти, нефтяные эмульсии и шламы.

В рамках аналитического обзора выполненных исследований выявлено, что эффективность воздействия электромагнитными (ЭМ) полями на высоковязкие нефти зависит от их компонентного состава, в частности, от содержания парафинов,

асфальтенов и смол, а также от параметров ЭМ поля, таких как: частота, время и мощность воздействия. Показано, что ЭМ воздействие на нефть снижает тенденцию к образованию асфальто–смоло–парафиновых отложений нефтей. Выяснено, что максимально эффективное ЭМ воздействие на углеводородные системы проявляется в том случае, когда частота поля соответствует резонансной частоте, определяемой электрофизическими параметрами среды.

Несмотря на наличие большого объема исследований, посвященных влиянию ЭМ воздействий на углеводородные системы, по-прежнему остаются открытыми вопросы влияния ЭМ поля на необходимые для моделирования процессов течения обработанных нефтей и их смесей в системе трубопроводного транспорта.

Соответствие диссертации паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки) по следующим направлениям исследований:

п. 2 «Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях».

п. 3. «Гидравлические модели и методы расчета течений в водоемах, технологических устройствах и энергетических установках».

п. 17. «Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы».

Цель диссертационной работы

Моделирование течения высоковязких и парафинистых нефтей в трубопроводах с учетом результатов экспериментальных исследований влияния высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных полей на свойства нефтей и их смесей.

Задачи исследования

1. Анализ современного состояния проблем транспортировки высоковязких, парафинистых и сернистых нефтей и их смесей.

2. Разработка адаптированной к практике трубопроводного транспорта методики проведения экспериментально-аналитического исследования влияния электромагнитной обработки на реологические свойства высоковязких, парафинистых и сернистых нефтей и их смесей.

3. Экспериментальные исследования влияния электромагнитной обработки на реологические свойства нефтей при ВЧ и СВЧ ЭМ воздействиях; на процессы образования асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО) на внутренних стенках трубопроводов; обоснование эмпирических зависимостей вязкости нефтей и их смесей от их состава до и после ЭМ обработки; определение регрессионных зависимостей для расчета вязкости смеси нефтей.

4. Моделирование процессов трубопроводного транспорта нефтей, обработанных ЭМ полями, с учетом полученных эмпирических зависимостей; разработка программного обеспечения для гидравлических расчетов «горячих» нефтепроводов высоковязких и парафинистых нефтей с применением ЭМ методов воздействия.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика проведения экспериментальных исследований влияния электромагнитной обработки на реологические свойства высоковязких и парафинистых нефтей и их смесей, адаптированная к практике промышленной эксплуатации нефтепроводов.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния электромагнитной обработки на реологические свойства высоковязких парафинистых ньютоновских и неньютоновских нефтей, сернистых нефтей и их смесей, а также на процессы образования АСПО на внутренних стенках трубопроводов, осуществляющих перекачку указанных нефтей. Регрессионные уравнения для расчета вязкости смеси сернистых нефтей, в том числе, после их ЭМ обработки.

3. Результаты численного моделирования и программное обеспечение для гидравлических расчетов изотермических и неизотермических нефтепроводов при транспортировке нефтей, обработанных ЭМ полем.

Научная новизна работы

1. Разработана методика обработки нефтей ЭМ полем, адаптированная к использованию в практике транспорта нефти по «горячим» трубопроводам.

2. Получены кусочно-экспоненциальные зависимости коэффициентов динамической вязкости неньютоновских нефтей от температуры, определено время релаксации реологических свойств исследованных нефтей.

3. Предложен критический параметр, определяющий степень влияния ЭМ полей на реологические свойства высоковязких и сернистых нефтей в зависимости от их компонентного состава и количество асфальто-смоло-парафиновых отложений на внутренних стенках модельных нефтепроводов. Получено решение о выдаче патента на способ электромагнитной обработки высоковязких и высокопарафинистых нефтей в трубопроводах; заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023.

4. Установлена зависимость реологических характеристик сернистых нефтей и их смесей после высокочастотного электромагнитного воздействия от исходного содержания серы в нефтях и концентрации высокосернистого компонента.

5. Сформулирована математическая модель для расчета неизотермических нефтепроводов при ЭМ воздействии на перекачиваемые нефти с учетом полученных экспериментальных данных, разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ.

Научная и практическая значимость

В результате проведенных в работе исследований разработана приближенная к реальным условиям методика обработки ЭМ полем нефтей, с целью их последующего трубопроводного транспорта. Выявлены закономерности изменения реологических свойств ньютоновских и неньютоновских нефтей после ВЧ и СВЧ ЭМ воздействий и причины, отвечающие за характер этих изменений. Создано ПО, позволяющее производить гидравлические расчеты нефтепроводов, в том числе и для перекачки нефтей обработанных ЭМ полем. Получены корреляционно - регрессионные уравнения для расчета коэффициентов кинематической вязкости смеси необработанных и обработанных ВЧ ЭМ полем нефтей. Результаты работы могут быть применены в практике трубопроводного транспорта нефтей, в том числе, при промышленной апробации ЭМ воздействия.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием стандартного калиброванного и аттестованного оборудования при проведении экспериментальных исследований, применением фундаментальных уравнений гидромеханики для гидравлических расчетов изотермических и неизотермических «горячих» нефтепроводов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации, были представлены на следующих конференциях, семинарах и научных школах:

1. 9-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», 18-20 октября 2023 г., Москва

2. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», 10-21 апреля 2023 г., Москва

3. Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-27), 3-6 апреля 2023 г., Екатеринбург

4. Международная конференция «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения», 13-17 марта 2023 г., Якты-Куль

5. VII Международная Конференция «Наноявления в геоэкологии и при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Nanotechoilgas-2022), 22-23 ноября 2022 г., Москва

6. XIII Международная школа-конференция «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании», посвященная 50-летию образования математического и физического факультетов в БашГУ, 19-22 октября 2022 г., Уфа

7. 8-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», 12-14 октября 2022 г., Москва.

8. Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле», 26 марта 2021 г, Октябрьский.

9. XIX Всероссийская конференция-конкурс молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 12-16 апреля 2021 г., Санкт-Петербург

10. Двадцать шестая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–26), 27 марта-3 апреля 2020 г., Уфа

11. 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2019», 22-25 апреля 2019 г., Москва

12. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19-24 августа 2019 г., Уфа

13. Международная молодежная научная конференция «Научоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса», 10-14 декабря 2018 г., Уфа

14. Вторая всероссийская летняя школа-конференция «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения», 25–30 июня 2018 г., Уфа

Методы исследования

Для решения поставленных задач проведены экспериментальные исследования и сформулирована математическая модель трубопроводного транспорта нефтей после ЭМ обработки. Численная реализация результатов

моделирования производилась в интегрированной среде для разработки программ Qt Creator. При верификации предложенных моделей и методов их численной реализации применялся сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя

Постановка задач, анализ полученных результатов и построение моделей, разработка программного обеспечения: «Гидравлический расчет изотермических и неизотермических нефтепроводов (ГРИНТ)», подготовка публикаций осуществлены совместно с научным руководителем Ковалевой Л.А. и научным консультантом Киреевым В.Н. Исследования воздействия ЭМ поля на нефти, получение патента (заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023) автором совместно с доцентом кафедры прикладной физики к.т.н. Зиннатуллиным Р.Р. Экспериментальные и аналитические исследования, расчеты, обработка, оформление результатов, проведены автором самостоятельно. Результаты совместных работ представлены с согласия соавторов.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 21 научной работе, в том числе 1 статья в рецензируемом научном издании, входящем в международную реферативную базу данных Scopus, 2 статьи в журналах, входящих в базу данных RSCI, 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 15 статей – в изданиях, входящих в РИНЦ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и Решение о выдаче патента, заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 136 страниц, включая 58 рисунков и список литературы, состоящий из 119 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю д.т.н. Ковалевой Лиане Ароновне, доцентам кафедры прикладной физики к.ф.-м.н. Кирееву Виктору Николаевичу за помощь в постановке задач и численном моделировании, а также к.т.н. Зиннатуллину Расулу Рашитовичу – за консультации при проведении экспериментальных исследований при подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность темы диссертации, цель и задачи исследования, кратко описаны результаты работы с обоснованием их достоверности, указанием их научной новизны и практической значимости.

В первой главе выполнена оценка современного состояния процессов трубопроводного транспорта высоковязких, парафинистых, сернистых нефтей и их смесей, приведен обзор существующих методов улучшения реологических свойств таких систем. Рассмотрено электромагнитное воздействие, как один из возможных методов решения проблемы транспорта высоковязких нефтей. Представлены результаты приведенных в литературных источниках исследований влияния ЭМ

воздействия на реологические свойства нефти, перекачиваемой по нефтепроводу «Восточная Сибирь - Тихий океан», на нефти Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна, нефти месторождения Карамай, нефти Кучуковского месторождения, нефти Аделяковского месторождения, сборной Акташской нефти, нефти Усть-Тегусского и Игнялинского месторождений. Выявлено, что воздействие различными электромагнитными полями может приводить как к улучшению, так и ухудшению реологических свойств нефти, в зависимости от ее состава. У нефтей со значительным содержанием асфальтенов и смол реологические свойства после ЭМ воздействия улучшаются: происходит снижение значений коэффициентов динамической вязкости, уменьшение величин предельного напряжения сдвига, регистрируется достаточно длительное время релаксации. В связи с этим можно сделать вывод о том, что ЭМ метод воздействия является достаточно перспективным методом улучшения реологических свойств асфальтеновых нефтей.

Представлен анализ технических решений по осуществлению ЭМ воздействия, в частности, микроволновой нагрев нефтепродуктов в трубопроводах путем введения внутрь трубопровода спирального электрода, а также различные варианты ВЧ ЭМ обработки.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния ВЧ ЭМ поля частоты 13,56 МГц и СВЧ ЭМ поля частоты 2,4 ГГц на реологические свойства высоковязких и парафинистых нефтей и исследованиям влияния ВЧ и СВЧ ЭМ полей на величину отложений нефти на стенках моделей трубопроводов. В качестве объектов исследования использованы как ньютоновские, так и неньютоновские нефти. Для проведения исследования была разработана методика в соответствии с практикой эксплуатации нефтепроводов и отвечающая наиболее перспективным техническим решениям. Полагается, что по аналогии со схемой «горячей перекачки», на первой по потоку нефтеперекачивающей станции (НПС) производят ЭМ обработку нефти на выходе из резервуарного парка после подпорных насосных агрегатов. Далее обработанная нефть подается на магистральные насосные агрегаты и направляется на следующую по потоку НПС, на которой в стандартной схеме «горячего» трубопровода предусмотрен пункт подогрева остывающей по мере движения по нефтепроводу нефти.

В связи с вышесказанным, а также с тем, что, как правило, в практике трубопроводного транспорта нефтей наибольшее распространение получили динамические режимы работы, при подготовке диссертации основной акцент на исследования ЭМ воздействия на нефти и их смеси в динамическом режиме.

В соответствии с описанной схемой работы «горячих» трубопроводов в данной работе разработана методика проведения экспериментальных исследований ЭМ обработки образцов нефти в следующей последовательности: образец подвергается ЭМ нагреву до достижения температуры порядка 45°C, затем он охлаждается в холодильной установке до температур соответствующих температурам на глубине залегания нефтепроводов в весенне-зимний период (3-5°C), после чего помещается в измерительную чашу вискозиметра Brookfield DV II Pro с последующим пошаговым нагревом и измерением показаний вязкости с помощью программного обеспечения RheoCalc T. В работе использовались образцы

нефтей нескольких месторождений: Девонского, Арланского, Тюменского, Ярегского, Тайлаковского и Уренгойского.

В результате выявлено, что после ВЧ ЭМ обработки, реологические свойства нефтей в интервале температур, соответствующих преимущественным температурам эксплуатации неизотермических нефтепроводов, улучшаются, вязкости снижаются. Время релаксации реологических свойств исследованных нефтей составляет 3 - 5 суток в зависимости от состава нефти. У ньютоновских нефтей после ВЧ ЭМ воздействия отмечается отсутствие петель гистерезиса на графиках зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига; у неньютоновских – уменьшение площади петель.

В качестве примера на рис. 1 представлен график зависимости коэффициента динамической вязкости Ярегской нефти от температуры после различных видов обработок, охлаждения и последующего теплового нагрева.

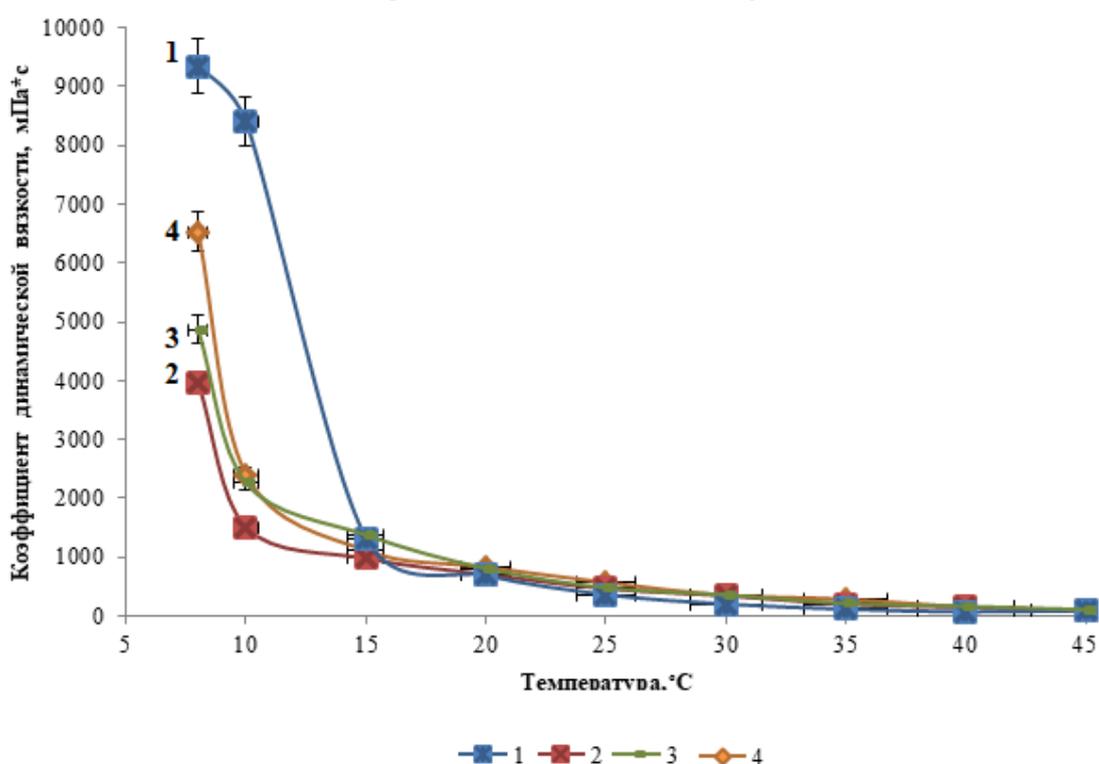


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамической вязкости Ярегской нефти от температуры после различных видов обработок
1 – необработанная нефть; 2 – после ВЧ ЭМ обработки; 3 – после СВЧ ЭМ обработки; 4 – после тепловой обработки.

В результате анализа данных, представленных на рисунке 1, можно сделать выводы о том, что ВЧ ЭМ воздействие на неньютоновскую Ярегскую нефть, приводит к улучшению ее реологических характеристик, например, при температуре близкой к 5°C вязкость снижается более чем в 2,4 раза (кривая 2), СВЧ ЭМ воздействие также улучшает реологические свойства Ярегской нефти, но не столь значительно как ВЧ, при температуре близкой к 5°C вязкость снижается в 1,9 раз (кривая 2). Сравнение реологической кривой, полученной после тепловой обработки Ярегской нефти (кривая 4), из которой видно, что при температуре, близкой к 5°C,

вязкость после теплового воздействия снижается в 1,3 раза, с кривыми, полученными после ЭМ воздействия, позволяет сделать вывод о том, что улучшение реологических свойств данной нефти связано не только с ЭМ нагревом, но и с «нетепловым» эффектом от электромагнитного воздействия. Этот эффект объясняется частичным разрушением некоторых высокомолекулярных соединений нефти за счет взаимодействия поля с полярными компонентами (в основном, асфальтенами).

На рисунке 2 представлена реологическая кривая прямого и обратного хода (петля гистерезиса) для Ярегской нефти до и после ВЧ ЭМ воздействий. Стрелками обозначено направление приложения нагрузки.

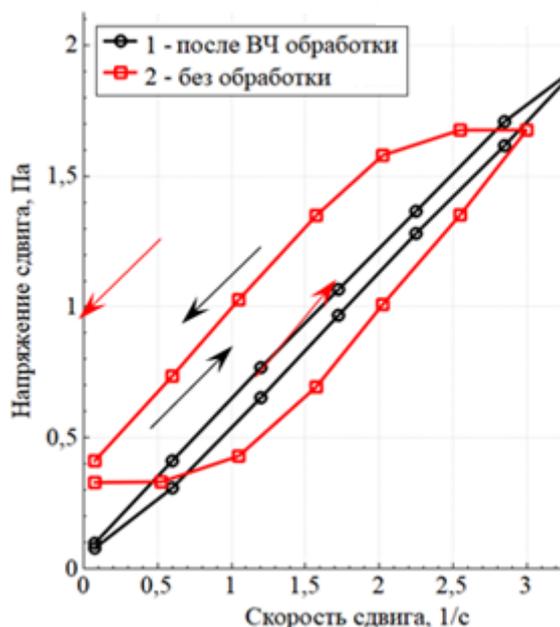


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига при температуре 25°C для Ярегской нефти до и после ВЧ ЭМ обработки.

Из рисунка 2 видно, что Ярегская нефть (кривая 1) является нелинейно-вязкопластичной, поведение таких жидкостей хорошо описывается моделью Балкли-Гершеля, кроме того она нереостабильная - тиксотропная, так как видны характерные для тиксотропных жидкостей петли гистерезиса. ВЧ ЭМ обработка Ярегской нефти приводит к уменьшению площади петли гистерезиса, а значит ослаблению тиксотропных свойств данной нефти, что позволяет рассматривать ее как вязкопластичную жидкость и описывать ее поведение моделью Шведова - Бингама. ВЧ ЭМ воздействие на Ярегскую нефть, приводит к уменьшению величины предельного напряжения сдвига для данной нефти.

Анализ результатов всех проведенных экспериментов показал, во-первых, что состав нефти определяет величину изменения вязкости, во-вторых, что вполне однозначную количественную характеристику эффективности ЭМ обработки определяет выявленный в результате проведенных в диссертационной работе исследований, параметр К, выражаемый следующим соотношением компонентов в составе нефтей:

$$K = \frac{A+C}{\Pi+S}, \quad (1)$$

где А, С, П и S – содержание асфальтенов, смол, парафинов и серы в составе нефти, соответственно, % масс.

На рис. 3 приведены интегральные кривые относительного изменения коэффициента динамической вязкости исследованных нефтей после ЭМ воздействия, последующих охлаждения и пошагового нагрева до определенной температуры в зависимости от содержания асфальтенов, смол, парафинов и серы.

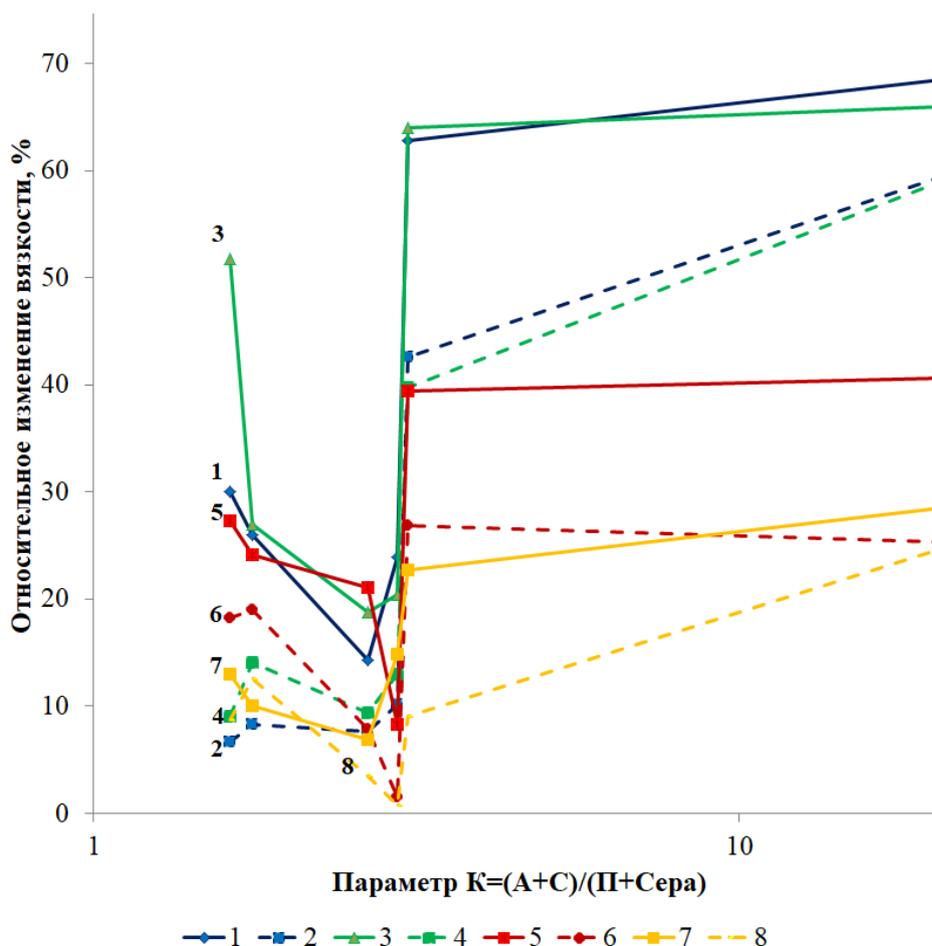


Рис. 3. Зависимость относительного изменения коэффициента динамической вязкости нефти от параметра K после ЭМ обработки при различных температурах:

1,2 – T= 5°C; 3,4 – T=10°C; 5,6 – T=15°C; 7,8 – T=15°C;

Сплошные линии – после ВЧ ЭМ обработки, пунктирные – после СВЧ обработки.

Анализ данных, приведенных на рис.3, позволяет сделать следующие выводы:

Для нефтей со значением параметра $3 \leq K \leq 25$ высокую эффективность демонстрирует ВЧ ЭМ воздействие. Наблюдается значительный рост относительного изменения вязкости нефти.

Для нефтей со значением параметра $K < 3$ наблюдается уменьшение относительного изменения вязкости с ростом K. Объясняется это тем, что одновременно с ростом параметра K в этом диапазоне происходит уменьшение содержания асфальтенов в исследованных нефтях. Выбор ВЧ или СВЧ ЭМ воздействия для нефтей при $K < 3$ производится индивидуально путем сравнения

данных по относительному изменению вязкости и технико-экономической оценке метода.

Для нефтей с $K > 25$ более высокую эффективность оказывает СВЧ ЭМ метод обработки. Как правило, такое значение K характерно для высокосмолистых нефтей, смолы, как известно, способствуют пептизации асфальтенов, переводу в коллоидный раствор более подвижных скоагулированных частиц дисперсной фазы, которые интенсивнее реагируют на более высокие частоты ЭМ поля.

Таким образом, предложенный параметр K может быть использован для выбора метода ЭМ воздействия, который будет наиболее эффективен для конкретной нефти. На основании применения сведений об указанном параметре, получено решение о выдаче патента на способ электромагнитной обработки высоковязких и высокопарафинистых нефтей в трубопроводах; заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с аппроксимацией полученных экспериментальных зависимостей изменения вязкости от температуры, необходимых для дальнейшего моделирования процесса течения высоковязких парафинистых нефтей в трубопроводах при использовании ЭМ воздействия.

В результате экспериментально-аналитического анализа предложены эмпирические зависимости в виде кусочно-непрерывных функций, в основу которых положена экспоненциальная зависимость вязкости от температуры Филонова-Рейнольдса:

$$\mu(T) = \begin{cases} \mu_1 e^{-u_1 T}, & T \leq T_* \\ \mu_2 e^{-u_2 T}, & T > T_* \end{cases}, \quad T_* = \frac{\ln(\mu_1 / \mu_2)}{u_1 - u_2} \quad (2)$$

где μ_1 и μ_2 – предэкспоненциальные коэффициенты динамической вязкости, u_1 и u_2 – коэффициенты крутизны вискограмм, определяемые при аппроксимации экспериментальных данных для каждого из образцов нефти в указанных интервалах температур.

Как отмечалось ранее, эффективность влияния ЭМ воздействия на нефти определяется их составом и реологическими свойствами. Так, после ВЧ ЭМ обработки вязкость неньютоновской Ярегской нефти уменьшилась в 2,6 раз, Тайлаковской и Уренгойской в 1,4 и 1,3 раза, соответственно; Тюменской, Арланской, Девонской нефтей – в 1,5 раза. Отметим, что у неньютоновской Тайлаковской, и ньютоновских нефтей, схожий порядок содержания асфальтенов (около 2-3%).

Из практики промышленной эксплуатации «горячих» нефтепроводов известно, что такой реологический параметр как коэффициент крутизны вискограммы оказывает непосредственное влияние на гидравлическую характеристику нефтепровода. Уменьшение данного коэффициента, приводит к уменьшению зоны неустойчивой работы нефтепровода, делает доступным для эксплуатации более широкий спектр расходов перекачки. У исследованных неньютоновских нефтей после их ВЧ ЭМ обработки наблюдается снижение величины коэффициента крутизны вискограммы.

На рис. 4 в качестве примера приведены результаты экспериментальных исследований нефтей и соответствующие им аппроксимационные зависимости.

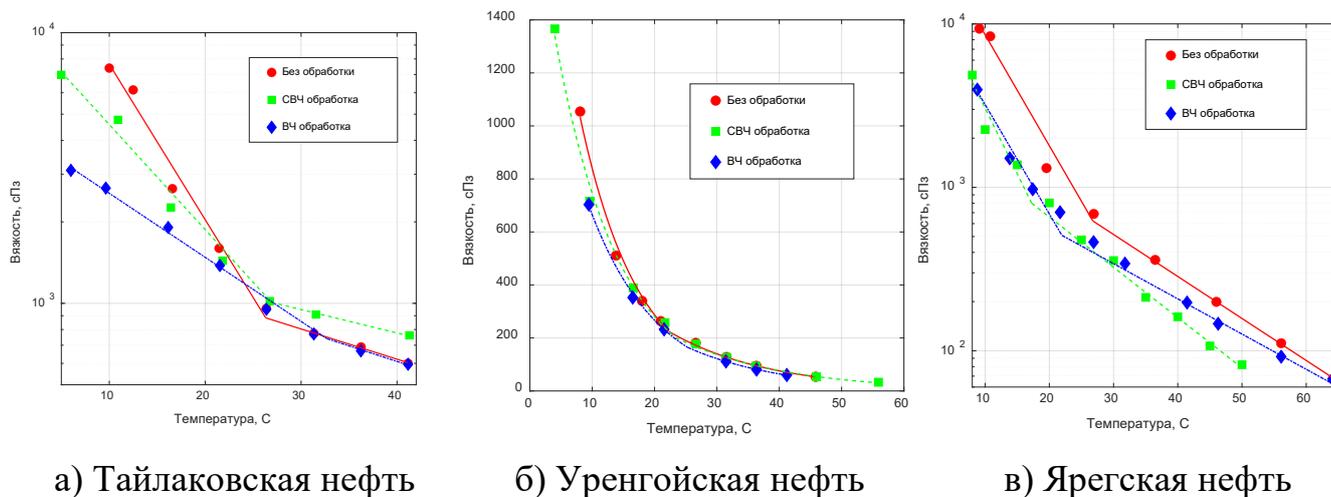


Рис. 4. Зависимость коэффициентов динамической вязкости исследованных нефтей от температуры при ЭМ обработке: точками показаны экспериментальные данные, линии – аппроксимационные зависимости по формуле (2).

Из рис. 4 видно, что экспериментальные данные достаточно точно описываются выбранной кусочно-экспоненциальной зависимостью, величина достоверности аппроксимации составляет более 98%.

Также в данной главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния ВЧ ЭМ обработки на процессы образования АСПО на внутренних стенках нефтепроводов. Необработанная и обработанная ВЧ ЭМ полем нефть прокачивалась через предварительно взвешенные трубки разного диаметра – модели участков нефтепровода. Во время проведения экспериментов поддерживалась температура 10°С. По завершении процесса прокачивания трубки освобождались от нефти путем гравитационного отстоя в вертикальном положении. При достижении постоянного веса трубки взвешивались на весах высокой точности Sartorius, по разности массы трубки до и после прокачки нефти рассчитывался вес остатка.

Результаты проведенных исследований для Девонской нефти представлены на рис. 5, из которого видно, что после ВЧ ЭМ обработки девонской нефти происходит уменьшение количества отложений внутри трубки диаметра 0,025 дюймов в 3 раза; 0,05 дюймов - в 3,5 раза. СВЧ ЭМ обработка также способствует снижению количества отложений, но не столь значительному уменьшению количества отложений: внутри трубки диаметра 0,025 дюймов - в 1,7 раза; 0,05 дюймов - в 2,3 раза. Увеличение диаметра трубки приводит к уменьшению количества отложений и более значительному снижению количества отложений обработанных нефтей, но в целом наиболее эффективна ВЧ ЭМ обработка.

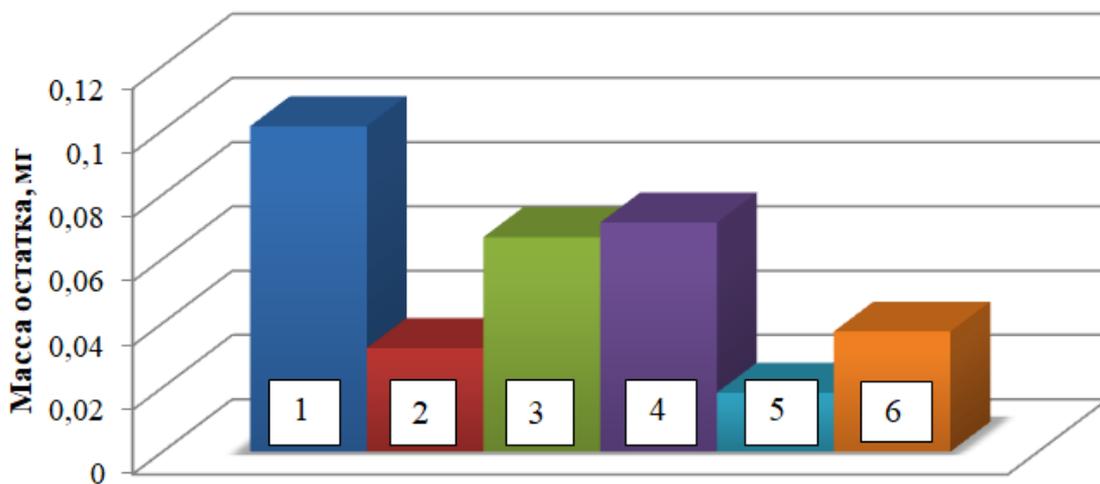


Рис. 5. Зависимость массы отложения Девонской нефти от метода воздействия на нефть в трубках разного диаметра:
 1,2,3 – $d=0,025$ дюйма; 4,5,6 – $d=0,050$ дюйма;
 1 и 4 – без предварительной обработки, 2 и 5 – после ВЧ ЭМ обработки,
 3 и 6 – после СВЧ ЭМ обработки.

Для остальных нефтей получена аналогичная картина: после ВЧ ЭМ воздействия уменьшается количество отложений нефти на внутренних стенках моделей нефтепроводов, и чем ниже температура нефти, тем более выражен этот эффект. В целом, можно сказать, что ЭМ обработка является «ингибитором» осадкообразования и превентивным методом борьбы с отложениями АСПО на внутренних стенках нефтепроводов. Отметим, что согласно классификации по АСПО, все исследованные нефти являются асфальтовыми: величина соотношения $P/(A+C)$, называемого параметром нестабильности, меньше единицы. При росте данного критерия интенсивность отложений стремительно растет за счет выпадения парафинов, при его уменьшении образуются отложения асфальтосмолистого типа. Для исследованных нефтей зависимость количества АСПО от данного параметра без обработки и после ВЧ ЭМ воздействия представлены на рис. 5.

Из рисунка 6 видно, что до достижения параметром нестабильности значения 0,6 происходит увеличение количества АСПО с малой интенсивностью, при более высоких значениях наблюдается резкий рост количества АСПО. При этом эффект от ЭМ воздействия для неньютоновских нефтей гораздо более ощутим, чем для ньютоновских: эффективность ВЧ ЭМ воздействия для неньютоновских нефтей в среднем более, чем в 1,25 раза выше, чем для ньютоновских, для СВЧ – в 1,1 раз, соответственно.

Таким образом, ВЧ и СВЧ ЭМ обработки нефтей являются достаточно эффективным способом снижения коэффициентов динамической вязкости нефти и количества АСПО в нефтепроводах для перекачки нефтей асфальтового класса.

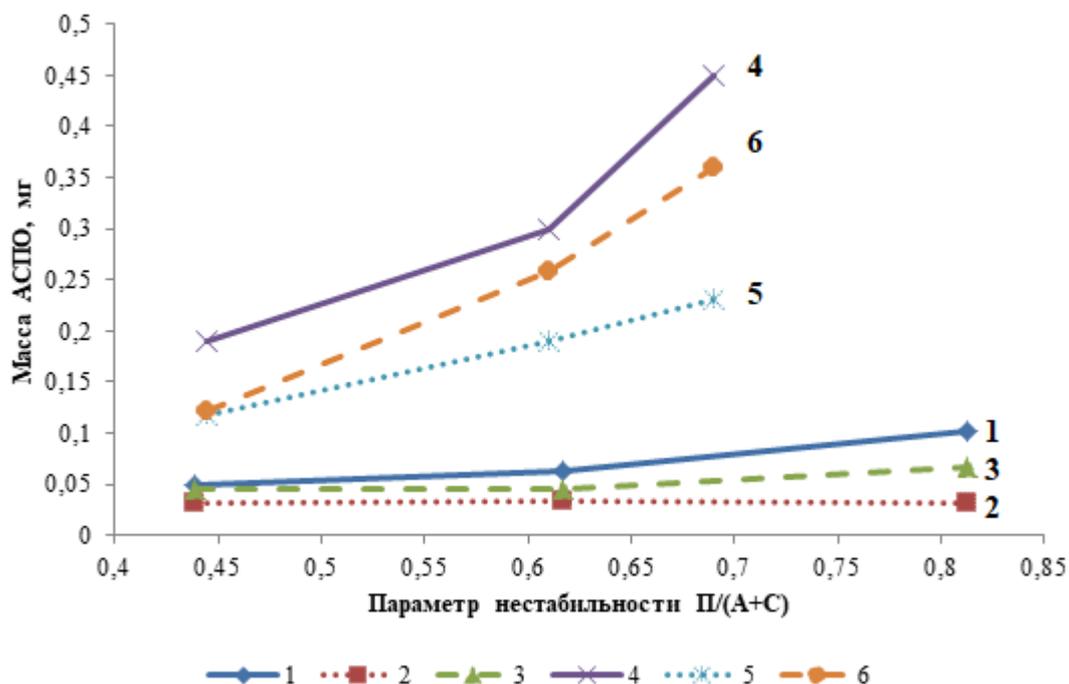


Рис.6. Зависимость массы АСПО в трубке от параметра неустойчивости для различных видов ЭМ обработки и типа перекачиваемой нефти: 1,4 – без обработки; 2 и 5 – после ВЧ ЭМ, 3 и 6 - после СВЧ обработки; три верхние кривые – неньютоновские, три нижние – ньютоновские нефти.

Третья глава посвящена исследованиям влияния ЭМ методов воздействия на вязкость смеси сернистой и высокосернистой нефтей и аппроксимации зависимости вязкости смеси нефтей без и после обработки ВЧ ЭМ полем.

Необходимость рассмотрения этого вопроса связана с тем, что структура Российского рынка нефти такова, что большая часть добытой нефти является сернистой (52,2% по данным Росстата на 2020 г.). Для реализации этой нефти производят ее смешение в трубопроводах с легким западносибирским сортом Siberian Light, в результате чего получается российская марка экспортной нефти Urals, которая является основной маркой, реализуемой на сегодняшний день российскими нефтедобытчиками.

Достаточно распространенной в нашей стране является практика трубопроводного транспорта смеси сернистых нефтей, и становятся актуальными задачи прогнозирования и определения свойств смеси сернистых нефтей, в том числе, при ЭМ воздействии на такие смеси. Существует целый ряд исследований и методик определения вязкости смеси нефтей, в том числе, методы Кендалла и Монро; Аррениуса; Лима; Шукла и Бхатнагара; Лобе, номограммы Е.Г. Семенидо и Г.В. Виноградова; формула Вальтера, формула Ш.Н. Ахатова с соавторами, для определения вязкости смеси нефтей и нефтепродуктов, регрессионные уравнения.

В работе выполнена оценка вязкости смеси по наиболее распространенным методикам Кендалла-Монро, Аррениуса, Вальтера. Кроме того, путем проведения многофакторного эксперимента и анализа его результатов, получены регрессионные уравнения, позволяющие оценить вклад в изменение вязкости смеси нефтей исходных параметров сернистых нефтей, таких как: вязкости, плотности и

концентрации исходных компонентов, содержание серы, воды и механических примесей, давления насыщенных паров и др.:

для необработанной смеси сернистой и высокосернистой нефтей:

$$\nu_{mix} = 36,866 + 3,449 \cdot x_1 + 10,5527 \cdot x_2 - 2 \cdot \nu_1 + 0,5 \cdot \nu_2 - 8 \cdot s_1 + 4 \cdot s_2, \quad (3)$$

для смеси этих нефтей после ВЧ ЭМ воздействия:

$$\nu_{mix} = 107,12 - 5,7449 \cdot x_1 + 0,1 \cdot x_2 + 5 \cdot \nu_1 + 0,004 \cdot \nu_2 + 0,01 \cdot s_1 + 1,14 \cdot s_2, \quad (4)$$

где ν_{mix} – коэффициент кинематической вязкости смеси; ν_1 и x_1 , ν_2 , и x_2 – коэффициенты кинематической вязкости и объемные доли первого и второго компонентов, соответственно; s_1 , s_2 – массовая доля серы в сернистой и высокосернистой нефтях.

На рис. 7 представлены результаты экспериментального определения коэффициента кинематической вязкости смеси сернистых нефтей и рассчитанных на основании формул Кендалла-Монро, Аррениуса, Вальтера, как для необработанных нефтей, так и для подвергшихся ВЧ ЭМ воздействию.

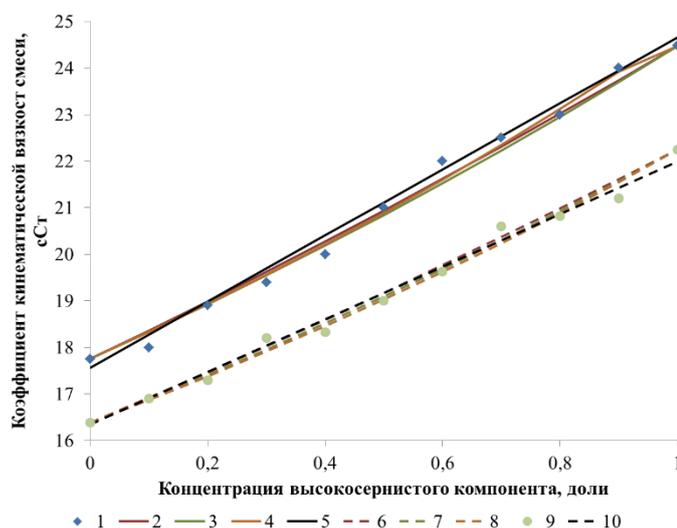


Рис.7. Зависимость коэффициента кинематической вязкости смеси сернистых нефтей до (сплошные линии) и после ВЧ ЭМ обработки (пунктирные линии); сравнение экспериментальных данных и расчетных зависимостей:

- 1,9 – экспериментальные точки до и после ВЧ ЭМ воздействия, соответственно;
- 2,6 – зависимости по формуле Аррениуса; 3,7 – Кендалла-Монро; 4,8 – Вальтера;
- 5,10 – по уравнениям регрессии (8) и (9).

Из рис.7 видно, что ВЧ ЭМ воздействие на смесь сернистых нефтей приводит к улучшению реологических характеристик полученной смеси, снижению ее вязкости в среднем на 7-8%; все расчетные зависимости демонстрируют достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными. Наименьшая погрешность расчетов получена для уравнений регрессии: 1,07% – для необработанной нефти и 1,49% – для нефти после ВЧ ЭМ воздействия.

На рис. 8 представлен график зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для смеси сернистой и высокосернистой парафинистой нефтей при 50% концентрации и температуре 5°C.

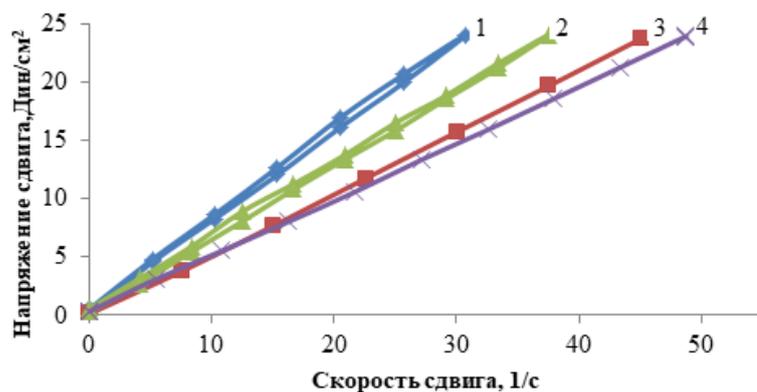


Рис.8. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для смеси сернистой и высокосернистой парафинистой нефти при 50% концентрации и температуре 5°C:
 1 – нефть до обработки; 2 и 3 – через 5 и 3 дня после ВЧ ЭМ обработки, соответственно; 4 – сразу после ВЧ ЭМ обработки.

Из рис. 8 видно, что петля гистерезиса, характерная для необработанной смеси (синяя кривая 1), после ВЧ ЭМ воздействия на нефть (фиолетовая кривая 4) исчезает и начинает проявляться снова только по прошествии 5 дней с момента обработки (зеленая кривая 2). Время релаксации ВЧ ЭМ воздействия на смесь сернистых нефтей составляет не менее 5 дней.

В целом, с увеличением концентрации высокосернистой нефти в смеси, растет и эффективность ВЧ ЭМ воздействия на смесь, так как на высокосернистую нефть ВЧ ЭМ поле влияет в большей степени, чем на сернистую (рисунок 9): вязкость сернистой нефти после ВЧ ЭМ воздействия уменьшается на 15 %, высокосернистой - на 20%.

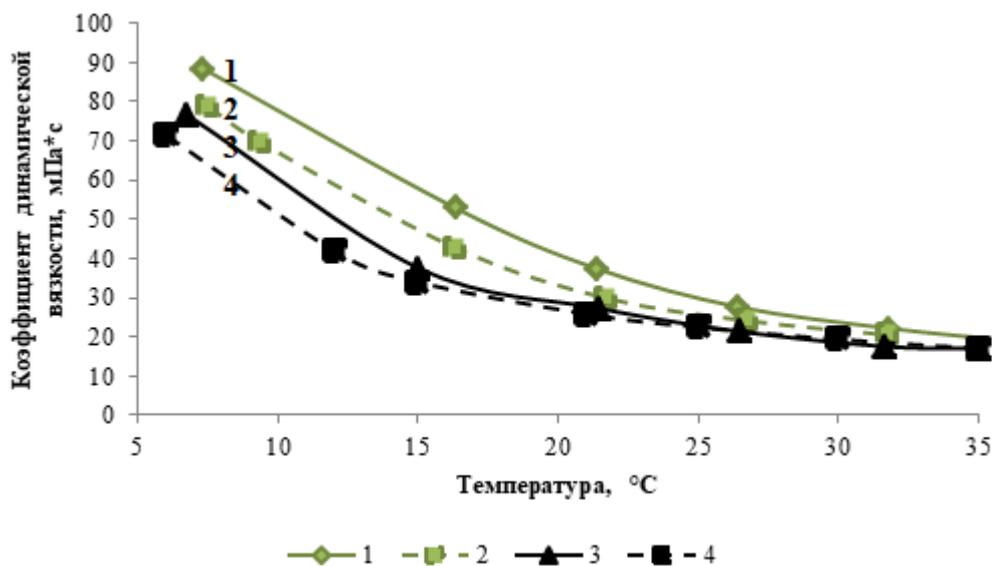


Рис.9. Зависимость коэффициента динамической вязкости нефти от температуры до и после ВЧ ЭМ обработки
 1,2 – высокосернистая нефть; 2,3 – сернистая нефть;
 Сплошные линии – необработанная смесь, пунктирные – после ВЧ ЭМ обработки.

В главе 4 выполнено численное моделирование течения высоковязких и парафинистых нефтей в трубопроводах с учетом полученных экспериментальных результатов. Разработана методика гидравлических расчетов нефтепроводов. Оценено влияние изменения вязкости нефти после ВЧ ЭМ обработки: на рабочую точку системы нефтепровод – нефтеперекачивающая станция (НПС), величины подпоров и напоров на входе и выходе из НПС, на изменение энергопотребления нефтеперекачивающих агрегатов.

В основе математической модели теплогидравлического расчета неизотермического нефтепровода лежит уравнение Лейбензона, которое в случае зависимости вязкости перекачиваемой жидкости от температуры и с учетом различия значений вязкости в пристенном слое и ядре потока в горячем нефтепроводе выглядит следующим образом:

$$\frac{dH}{dx} = \beta \frac{Q^{2-m} \nu(T)^m}{d^{5-m}} \left(\frac{\nu_{тр}}{\nu} \right)^{1/3} \quad \beta = \frac{8A}{4^m \pi^{2-m} g}, \quad (5)$$

где Q – расход перекачиваемой жидкости, м³/с; T – температура, °С; d – внутренний диаметр нефтепровода, м; ν – коэффициент кинематической вязкости нефти, м²/с; A , m и β – расчетные коэффициенты, зависящие от режима течения жидкости и механических свойств трубопровода (возникающих зон трения); g – ускорение свободного падения, м/с². Изменение температуры нефти в радиальном направлении не учитывается, так как при эксплуатации магистральных нефтепроводов преобладает преимущественно турбулентный режим и температура в радиальном направлении быстро выравнивается, следовательно $\frac{\nu_{тр}}{\nu} \approx 1$.

Распределение температуры в трубопроводе определяется из уравнения теплопроводности, которое в рассматриваемом одномерном случае имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c\rho u \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{4K}{d} (T - T_0), \quad (6)$$

где c , ρ – удельная массовая теплоемкость и плотность нефти, соответственно, Дж/кг·К; кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; u – средняя скорость потока нефти, м/с; T_0 – температура окружающей среды, К; K – полный коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду, Дж/(м²·с·К); d – внутренний диаметр нефтепровода, м.

В стационарном случае, для турбулентного режима течения при граничных условиях первого рода, аналитическое решение уравнения (6) имеет вид:

$$T(x) = T_0 + (T_n - T_0)e^{-ax/L}, \quad a = \frac{\pi d K L}{c G} \quad (7)$$

и называется формулой В.Г. Шухова.

В формуле (7) T_n – начальная температура нефти в трубопроводе, К; a – безразмерное число Шухова; G – массовый расход нефти, кг/с; L – протяженность трубопровода, м.

Задача определения рабочей точки и, соответственно, режима работы, системы нефтепровод – нефтеперекачивающая станция, в принятых допущениях сводится к решению системы уравнений (5), (7) с замыкающими уравнениями зависимости вязкости нефти от температуры (2), полученным в результате экспериментальных исследований в главе 2. Значения предэкспоненциальных

множителей и коэффициентов крутизны вискограммы в уравнении (2) выбираются из полученных экспериментальных данных для соответствующих видов обработки нефти ЭМ полем.

Рекомендуемые величины безразмерных коэффициентов A , β и m для уравнения (5) приведены в таблице 1.

Режим течения определяется числом Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{4Q}{\pi d v} = \frac{4Q\rho}{\pi d \eta}, \quad (8)$$

Таблица 1. Рекомендуемые величины коэффициентов A , β и m для уравнения Лейбензона

Режим течения	Зона трения	Область применения	A	β	m
Ламинарный		$Re < 2320$	64	4,15	1
Турбулентный	Гидравлически гладкие трубы (зона Блазиуса)	$2320 < Re < Re_I$	0,3164	0,0246	0,25
	Смешанного трения	$Re_I < Re < Re_{II}$	$0,236 \cdot \varepsilon^{0,127}$	$0,0802 \cdot A$	0,123
	Квадратичного трения	$Re > Re_{II}$	$0,11 \cdot \varepsilon^{0,25}$	$0,009097 \cdot \varepsilon^{0,25}$	0

Первое и второе переходные числа Рейнольдса из таблицы 1 вычисляются по формулам: $Re_I = 10 \frac{d}{K_3}$; $Re_{II} = 10$. Параметр $\varepsilon = K_3/d$ характеризует относительную шероховатость внутренней поверхности труб, где K_3 – эквивалентная шероховатость труб (мм) – параметр, зависящий от материала и состояния нефтепровода.

Интегрируя уравнение (5) по длине нефтепровода, с учетом формулы для изменения температуры (7) и закона изменения вязкости (2) получим величину общего напора:

$$H = \beta \frac{Q^{2-m}}{d^{5-m}} \frac{1}{a} \left\{ \mu_1^m e^{mu_1 T_0} [Ei(-mu_1(T_H - T_0)) - Ei(-mu_1(T_* - T_0))] + \mu_2^m e^{mu_2 T_0} [Ei(-mu_2(T_* - T_0)) - Ei(-mu_2(T_K - T_0))] \right\}, \quad (9)$$

где Ei – интегральная показательная функция.

Коэффициент теплопередачи K в формуле (9) для трубы с многослойной изоляцией определяется внутренним и наружным диаметрами трубопровода; числом слоев, учитываемых при расчете; коэффициентами теплопроводности слоев (трубы, изоляции, отложений и т.д.); внутренним и внешним коэффициентами теплоотдачи:

$$\frac{1}{K \cdot d} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{нар}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{iнар}}{d_{iвн}}, \quad (10)$$

где K – коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду; d и $D_{нар}$ – внутренний и наружный диаметры трубопровода; n – число слоев, учитываемых при расчете; $D_{iнар}$, $d_{iвн}$ – наружный и внутренний диаметры i -го слоя; λ_i – коэффициенты теплопроводности i -го слоя (трубы, изоляции, отложений и т.д.); α_1 и α_2 – внутренний и внешний коэффициенты теплоотдачи.

Коэффициент α_1 определяется по формуле Михеева, после предварительного определения чисел Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля для турбулентного режима:

$$\alpha_1 = 0,021 \frac{\lambda_n}{d} Re_n^{0,8} Pr_n^{0,43} \left(\frac{Pr_n}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

здесь индексы н, ст – при температуре нефти и стенки, соответственно, λ_n – коэффициент теплопроводности нефти, число Прандтля: $Pr = \frac{\nu}{a}$, $a = \frac{\lambda_n}{c_p \rho}$.

Удельную теплоемкость нефти c_p с достаточной для практических расчетов точностью можно определить по формуле Крето:

$$c_p = \frac{31,56}{\sqrt{\rho_{20}}} (762 + 3,39 \cdot T), \quad (12)$$

где c_p – удельная теплоемкость нефти, Дж/(кг град); ρ_{20} – плотность нефти при температуре 20 °С; T – температура нефти, К.

Внешний коэффициент теплоотдачи α_2 , для подземных трубопроводов рассчитывают по формуле Власова-Форхгеймера:

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot \lambda_{гр}}{d_{нар} \ln \left[\frac{2 \cdot h_0}{d_{нар}} + \sqrt{\frac{2 \cdot h_0^2}{d_{нар}^2} - 1} \right]}, \quad (13)$$

где h_0 – глубина заложения трубопровода в грунт (до оси), $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности грунта.

Коэффициент теплопроводности, λ_n в Вт/(м·К). находится в пределах 0,1-0,2 Вт/(м·К) в диапазоне температур 273-473 К и определяется по формуле Крето-Смита:

$$\lambda_n = \frac{156,6}{\rho_{20}} (1 - 0,00047 \cdot T). \quad (14)$$

При турбулентном режиме перекачки $\alpha_1 \gg \alpha_2$, поэтому в расчетах α_2 можно пренебречь.

Таким образом, моделирование процессов трубопроводного транспорта высоковязких и парафинистых нефтей, с учетом экспериментальных данных (2) сводится к применению уравнения (9), являющегося решением системы уравнений (2, 5, 7), заданию входящих и определению вспомогательных параметров (8, 10-14).

Для численной реализации модели разработано программное обеспечение для ЭВМ: «Гидравлический расчет изотермических и неизотермических нефтепроводов (ГРИНТ)», свидетельство №202266714.

Данный программный продукт создан в интегрированной среде разработки Qt Creator. Он позволяет определять вязкость нефтей по полученным выше кусочно-экспоненциальным функциям (2), данным о коэффициенте крутизны вискограммы; рассчитывать вязкость смеси. В ПО ГРИНТ предусмотрено два варианта расчета внутреннего коэффициента теплоотдачи, отличительной особенностью ПО является высокая скорость проведения трудоемкого процесса расчетов нефтепроводов. В отличие от программы «Stac-Di», нашедшей широкое применение в научных кругах, составленной на языке OBJECT PASCAL в среде DELPHI и реализованной в двух режимах: для построения стационарной и динамической характеристик магистрального трубопровода, в ПО «ГРИНТ» возможно производить расчеты для нефтепроводов, перекачивающих нефть после ЭМ обработки и смесь нефтей.

С помощью программного продукта «ГРИНТ» были произведены теплогидравлические расчеты для модельных горячих нефтепроводов Ярегской и Девонской нефтей до и после ЭМ воздействий (рис. 10-11). Напор, отображенный на рисунках при нулевом значении расхода, соответствует статическому напору, определяемому разностью геодезических отметок начального и конечного пунктов перекачки, а также необходимым подпором для безкавитационной работы насосных агрегатов установленных на нефтеперекачивающей станции.

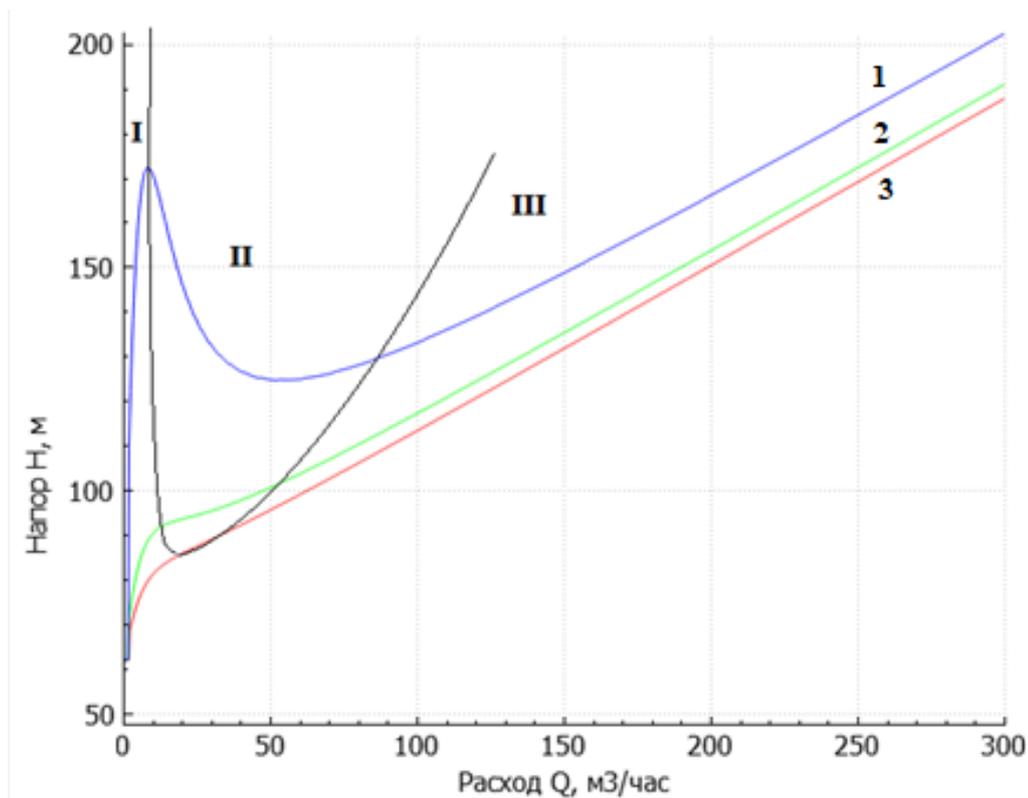


Рис.10. Гидравлическая характеристика неизотермического нефтепровода перекачивающего Ярегскую нефть, полученная в ПО «ГРИНТ»
 Синяя кривая 1 – необработанная нефть, зеленая 2 – нефть, после СВЧ ЭМ обработки; красная 3– нефть, после ВЧ ЭМ обработки;
 I - зона малых расходов; II - зона неустойчивой работы нефтепровода; III - рабочая зона;

Чем выше располагается характеристика горячего нефтепровода, тем шире зона неустойчивой работы нефтепровода. Визуализация гидравлического расчета проведенного для Ярегской нефти, наглядно демонстрирует снижение характеристики нефтепровода после ЭМ обработки нефти и уменьшение зоны неустойчивой работы, причем максимальное снижение характеристики наблюдается для случая ВЧ ЭМ воздействия на Ярегскую нефть (красная кривая).

ВЧ ЭМ воздействие на Девонскую нефть также приводит к улучшению гидравлической характеристики нефтепровода – снижению величины потребного для прокачивания одного и того же объема нефти напора (рис. 11).

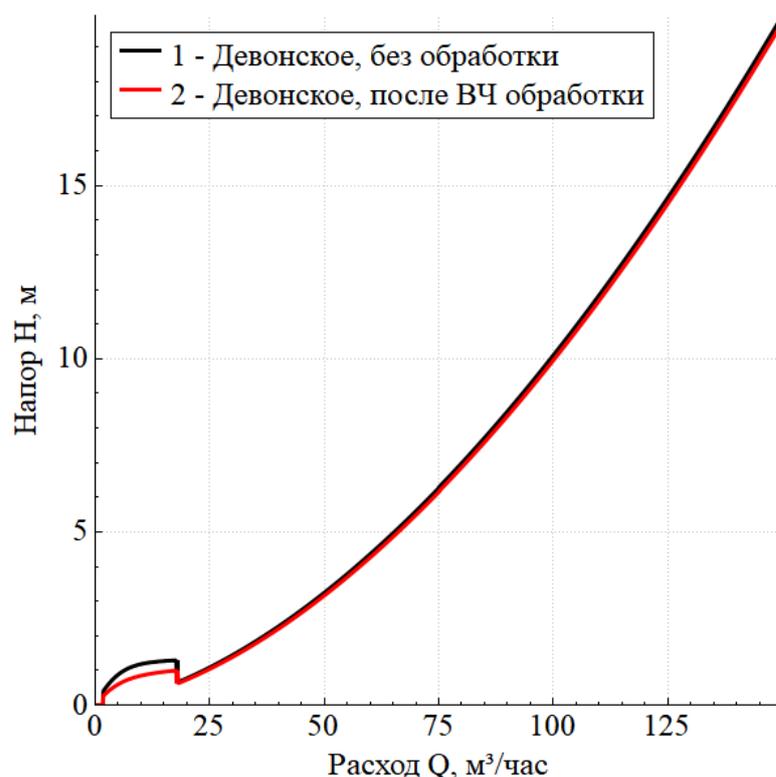


Рис.11. Гидравлическая характеристика нефтепровода для перекачки Девонской нефти:

I - зона малых расходов, II - зона неустойчивой работы нефтепровода, III - рабочая зона.

Из рис. 11 видно, что при очень малых расходах перекачки, наблюдается наличие небольшой выпуклости («горба»), характерного для аномальных нефтей, образование которого связано с наличием слабых неньютоновских свойств у данной нефти (тиксотропия). Наиболее значительно эффект от ВЧ ЭМ воздействия для нефтепровода Девонской нефти выражен в зоне очень малых расходов. При больших значениях расхода гидравлические характеристики нефтепроводов практически накладываются друг на друга, разница между характеристиками нефтепровода для нефти после ВЧ ЭМ воздействия и без становится незначительной.

Также в данной главе оценено влияние ВЧ ЭМ воздействия на величины подпоров и напоров на входе и выходе из модельной НПС. Выполнен анализ экономической эффективности электромагнитной обработки девонской нефти по РД 153-39.4-113-01 «Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов» и сравнение ВЧ ЭМ воздействия на Девонскую нефть с примером применения противотурбулентной присадки. В результате выявлено, что ЭМ ВЧ воздействие на нефть приводит к повышению эффективности работы магистральных нефтепроводов с гидравлической точки зрения, позволяет, при прочих равных условиях, выходить на режимы работы с большими производительностями, и является достаточно перспективным методом подготовки нефтей к трубопроводному транспорту.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Разработана экспериментальная методика электромагнитной обработки высоковязких нефтей, приближенная к реальному технологическому процессу перекачки нефти в магистральных трубопроводах.

2. Выполнены экспериментально-аналитические исследования реологических свойств ряда ньютоновских и неньютоновских нефтей до и после высокочастотной и СВЧ электромагнитных обработок. Установлено, что время релаксации реологических свойств до первоначальных значений составляет не менее 5 суток с уменьшением или полным исчезновением петель гистерезиса после электромагнитного воздействия и снижением величины предельного напряжения сдвига для неньютоновских нефтей.

3. Показано, что высокочастотное и СВЧ электромагнитные воздействия приводят к уменьшению количества асфальто-смоло-парафиновых отложений на внутренних стенках модельных нефтепроводов: высокочастотное – в среднем в 2 –3 раза, СВЧ – до 2 раз. Выявлено, что высокочастотное электромагнитное воздействие приводит к улучшению реологических характеристик сернистых нефтей и их смесей в зависимости от исходного содержания серы в нефтях и концентрации высокосернистого компонента.

4. Предложен критический параметр, определяющий степень влияния электромагнитного поля на реологические свойства нефтей и количество асфальто-смоло-парафиновых отложений в зависимости от компонентного состава, частоты электромагнитного воздействия. Получено решение о выдаче патента на способ электромагнитной обработки высоковязких и высокопарафинистых нефтей в трубопроводах, основанный на применении выявленного критического параметра; заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023.

5. Предложено использование кусочно-экспоненциальных температурных зависимостей коэффициентов динамической вязкости неньютоновских нефтей до и после электромагнитного воздействия. Сформулирована математическая модель и разработана методика расчета неизотермических нефтепроводов, в том числе с использованием электромагнитной обработки нефти, реализованная в программном продукте для ЭВМ «Гидравлический расчет изотермических и неизотермических нефтепроводов (ГРИНТ)», свидетельство №202266714.

6. В результате математического моделирования процессов трубопроводного транспорта представленных нефтей оценено влияние электромагнитного воздействия на режимы работы нефтеперекачивающих станций. Установлено, что высокочастотное электромагнитное воздействие приводит к изменению гидравлической характеристики нефтепровода, уменьшению величины потребного напора, росту производительности перекачки, увеличению зоны устойчивой работы нефтепровода.

Основные публикации автора по теме диссертации в изданиях ВАК:

1. Мухарямова Г.И., Зиннатуллин Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Исследование влияния электромагнитных методов воздействия на вязкость смеси сернистой и высокосернистой нефтей // Процессы в геосредах. 2023. № 4. С. 2221-2228.

2. Мухарямова Г.И. Зиннатуллин Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Экспериментальное и численное моделирование процессов трубопроводного транспорта высоковязких нефтей при электромагнитном воздействии // Процессы в геосредах. 2022. № 4. С. 557-562.

3. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Мухарямова Г. И. Исследования влияния высокочастотного, сверхвысокочастотного электромагнитного и теплового видов воздействия на свойства Ярегской и Девонской нефтей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7, № 4. С. 10-26.

В журнале, входящем в базу данных Scopus:

4. Baykova L.R., Garris N.A., Karimova G.I. Multiple regression model for determining and predicting the viscosity of crude oils mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272, No. 2. P. 022154.

В журналах, входящих в базу данных RSCI:

5. Ковалева Л.А., Мухарямова Г.И. Влияние электромагнитной обработки на реологические свойства нефти: эксперимент и приложение // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 3. – С. 734-740.

6. Ковалева Л.А., Киреев В.Н., Зиннатуллин Р.Р., Мухарямова Г.И. Влияние электромагнитной обработки на гидравлические характеристики горячих трубопроводов при транспортировке нефтяных ньютоновских и неньютоновских систем // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 2. С. 120-132. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-2-120-132>.

Публикации в изданиях РИНЦ:

7. Мухарямова Г.И., Зиннатуллин Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Комплексный анализ влияния электромагнитной обработки на некоторые свойства Тайлаковской нефти // В сборнике: Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения. сборник материалов Международной научной конференции. Уфа, 2023. С. 79-80.

8. Мухарямова Г.И. Экспериментально-аналитическое исследование влияния электромагнитной обработки на реологические свойства нефти и ее смесей // В книге: Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Том 2. Санкт-Петербург, 2021. С. 50-52.

9. Ковалева Л.А., Мухарямова Г.И. О влиянии высокочастотного электромагнитного поля на реологические свойства нефтей // В сборнике: Современные технологии в нефтегазовом деле – 2021. Сборник трудов международной научно-технической конференции. Уфа, 2021. С. 639-641.

10. Ковалева Л.А., Мухарьямова Г.И. Анализ влияния электромагнитной обработки на реологические свойства сырой нефти Тайлаковского месторождения // В книге: Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2021». Тезисы докладов XII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию профессора БашГУ Фарзтдинова Миркашира Минигалиевича. Отв. редактор Л.А. Габдрахманова. Уфа, 2021. С. 12-13.

11. Мухарьямова Г. И. Экспериментальное исследование влияния электромагнитной обработки нефти на величину отложений парафина и АСПО на внутренних стенках нефтепроводов // В книге: Сборник тезисов, материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26). материалы конференции, тезисы докладов. 2020. С. 308-310.

12. Каримова Г.И., Ковалева Л.А. Электромагнитная обработка нефти как способ увеличения производительности магистральных трубопроводов // В сборнике: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. сборник трудов в 4-х томах. 2019. С. 364-365.

13. Каримова Г.И., Ковалева Л.А. Улучшение реологических свойств нефти электромагнитными методами обработки // В сборнике: Научоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса. Материалы VIII Международной молодежной научной конференции. Ответственный редактор К.Ш. Ямалетдинова. 2018. С. 156-160.

14. Каримова Г.И., Ковалева Л.А. Особенности гидродинамики последовательной перекачки нефтепродуктов // В книге: Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения. Тезисы докладов Второй всероссийской летней школы-конференции. Ответственный редактор И.Л. Хабибуллин. 2018. С. 54.

15. Каримова Г.И., Ковалева Л.А. Комплексное исследование гидродинамических параметров смешения нефти // В книге: Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения. Тезисы докладов Второй всероссийской летней школы-конференции. Ответственный редактор И.Л. Хабибуллин. 2018. С. 53.

16. Каримова Г.И., Байкова Л.Р. Уточненное уравнение множественной регрессии для определения вязкости смеси нефтей // В книге: Трубопроводный транспорт - 2017. Тезисы докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции. Уфа, 2017. С. 398-399.

17. Каримова Г.И., Байкова Л.Р. Исследование физических свойств смеси сернистых нефтей // В сборнике: 68-я Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. 2017. С. 399.

18. Каримова Г.И., Байкова Л.Р. Разработка аналитических зависимостей для определения товарных свойств смесей сернистых нефтей // В сборнике: Научоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса. материалы Международной молодежной научной конференции. ответственный редактор Ямалетдинова К.Ш., 2016. С. 109-110.

19. Каримова Г.И., Байкова Л.Р. Регрессионный анализ необходимых для транспорта физических свойств нефти и ее смесей // В сборнике: Трубопроводный

транспорт - 2016. Материалы XI Международной учебно-научно-практической конференции. 2016. С. 410-411.

20. Каримова Г. И., Байкова Л. Р. Определение основных параметров компаундирования высокосернистой и сернистой нефтей // В сборнике: Современные технологии в нефтегазовом деле - 2016. Сборник трудов Международной научно-технической конференции посвященной 60-летию филиала. 2016. С. 235-239.

21. Байкова Л.Р., Каримова Г.И. Определение соотношения перепада давления в технологическом оборудовании на основании теории подобия // В книге: 64-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Сборник материалов конференции. 2013. С. 129-130.

Свидетельство о регистрации программы:

Киреев В.Н., Мухарямова Г.И., Ковалева Л.А. Гидравлический расчет изотермических и неизотермических нефтепроводов (ГРИНТ) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666714, 06.09.2022. Заявка № 2022665978 от 29.08.2022.

Решение о выдаче патента на изобретение:

Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Мухарямова Г.И. Способ электромагнитной обработки высоковязких и высокопарафинистых нефтей в трубопроводах//МПК H05B 6/64 (2006.01) F17D 1/17 (2006.01) // Патентообладатель: ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»// Заявка № 2023128167/07(062729) от 01.11.2023.

МУХАРЯМОВА Гульшат Ильдаровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОВЯЗКИХ И ПАРАФИНИСТЫХ
НЕФТЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2024 г.

Отпечатано на ризографе с оригинала заказчика.

Гарнитура «Times New Roman», бумага офсетная.

Формат 60x84/16. Объем ____ уч.-изд.-л.

Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Типографии ИП Гильмутдинова Р.Х.

Респ. Башкортостан, г.о. город Уфа, г. Уфа