

На правах рукописи



СЕКАЧЁВ АНДРЕЙ ФЕДОРОВИЧ

**ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЁМКОВ СИСТЕМ
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ОТ НЕФТЕШЛАМОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ НАГРЕВА**

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология»

Научный руководитель: **Шалай Виктор Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный работник Высшей школы
Российской Федерации, ФГАОУ ВО «Омский
государственный технический университет»,
заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело,
стандартизация и метрология»

Официальные оппоненты: **Пивоварова Надежда Анатольевна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Химическая технология
переработки нефти и газа»

Валеев Анвар Рашитович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», доцент
кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет», г. Уфа

Защита состоится «16» декабря 2022 года в 14 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе ФГБОУ
ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625000, г. Тюмень,
ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском
комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте
www.tyuiu.ru.

Автореферат диссертации разослан «09» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Мировое экономическое развитие идёт по пути увеличения суммарного энергопотребления. Вместе с тем, на сегодняшний день доля запасов высоковязкой нефти преобладает и продолжает расти. Такой ожидаемый рост спроса на энергоресурсы рождает различного рода предложения и технологические решения, направленные на обеспечение товаром рынка энергопотребителей.

Указом президента № 642 от 1 декабря 2016 года утверждена «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», в которой указывается, что приоритетными направлениями развития Российской Федерации являются формирование новых способов транспортировки и хранения энергии и ресурсосберегающая энергетика.

Кроме того, распоряжением правительства Российской Федерации №207-р от 13 февраля 2019 года, утверждена «Стратегия пространственного развития», согласно которой необходимо обеспечить расширение и модернизацию системы магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

Также на сегодняшний день имеет силу Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 26.07.2019) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". В статье 15 об энергетическом обследовании прямо указывается требование к организациям, осуществляющим транспортировку, разработать перечень мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и провести их стоимостную оценку.

На уровне технологических гигантов нефтегазовой индустрии уже сегодня имеются проблемы эксплуатации систем трубопроводного транспорта углеводородов. Согласно перечню проблемных тематик АО «Транснефть – Сибирь» года актуальными являются повышение энергоэффективности и совершенствование процесса перекачки и хранения нефти и нефтепродуктов, основанного на альтернативных мероприятиях. Отдельно отмечена необходимость разработки концепций принципиально нового оборудования для транспортировки и хранения нефти и нефтепродуктов. Ожидаемым решением

данных проблем для компании является внедрение инновационного оборудования отечественного производства.

Нарастающая доля запасов высоковязкой нефти формирует у нефтяных компаний спрос на технологии и устройства для работы с тяжелыми нефтями на всех этапах производства, включая транспортировку и хранение. В связи с этим научно-технические проблемы создания и поддержания жидкой фазы нефтяных сред, являясь актуальными, становятся преобладающими проблемами для транспортировки и хранения углеводородов.

К таким проблемам в первую очередь относится разжижение донных отложений в резервуарах. Меры, предотвращающие образование осадка, необходимы не только для дальнейшей надежной и бесперебойной эксплуатации резервуара, но и для сохранения его целостности. Содержание в нефтяном осадке воды, которая, в свою очередь, содержит в себе такие компоненты как сероводород, кислород, углекислый газ и сульфатвосстанавливающие бактерии, приводит к возникновению и развитию коррозии металла днища и нижних поясов резервуара.

Основной проблемой разогрева нефтяных шламов является их низкая теплопроводность. В этой связи для повышения эффективности термодинамического процесса разогрева целесообразно внедрение методов разогрева с использованием электромагнитного (ЭМ) поля обеспечивающего «объёмное тепловыделение». В диссертации представлено обоснование технологии СВЧ разогрева нефтешламов внутри технологических ёмкостей систем трубопроводного транспорта.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями процесса накопления, а также определения состава осадка в резервуарах и хранилищах занимались Александров В.Н., Бобровский С.А., Вургафт А.В., Кононов О.В., Лерке Г.Э., Мастобаев Б. Н., Нестерова М.П., Свиридов В.П. и др. Исследованиями в области эксплуатации нефтяных резервуаров в разные годы занимались следующие учёные: Брезгин А.Е., Галиакбаров В.Ф., Едигаров С.Г., Каравайченко М.Г., Кононов О.В., Коробков Г.Е., Лерке Г.Э., Лежнев М.А., Лукьянова И.Э., и другие. Состоянию нефтяных сред, подверженных волновому воздействию, посвящены труды отечественных и зарубежных ученых: З.И. Сюняева, Ф.Л. Саяхова, М. А. Фатыхова, Л.А. Ковалевой, Р.З. Миннигалимова, Р.Р. Зиннатуллина, В. И. Анфиногентова, Г.А. Морозова, Ю.С. Архангельского, М.С. Муллакаева, Р.В. Ануфриева, В.С.

Великанова, И.Н. Евдокимова, Р.Р. Суфьянова, А.В. Стрекалова, А.А. Кислицина, J.E. Bridges, R.G. Bosisio, L. Homer, C. Jackson, Jr. Spenser, R.N. Snow, D.D. Tanner и др.

Недостаточно изученным остается вопрос об эффективности передачи СВЧ энергии в нефтяные среды. Наибольший интерес представляют термодинамические процессы преобразования энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяных дисперсных системах.

Объектом исследования являются реологические характеристики нефтяной среды, хранимой и транспортируемой системами трубопроводного транспорта, подвергнутой электромагнитному СВЧ облучению.

Предметом исследования является термодинамический процесс передачи СВЧ энергии электромагнитного поля в нефтешламы непосредственно внутри ёмкостей для хранения углеводородов при технологической очистке.

Цель работы: разработка технологии СВЧ разогрева нефтешламов внутри ёмкостей систем трубопроводного транспорта при технологической очистке.

Задачи исследования:

1. Обосновать эффективность и определить условия передачи энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяные шламы внутри ёмкостей систем трубопроводного транспорта.

2. Разработать физико-математическую модель нагрева нефтяного шлама погружными излучателями СВЧ ЭМ поля внутри резервуаров.

3. Установить закономерности изменения теплового поля в зависимости от времени воздействия. Экспериментально измерить термодинамические характеристики нефтяного шлама, нагреваемого погружным излучателем СВЧ ЭМ поля.

4. Разработать технологию очистки резервуаров с использованием погружных СВЧ излучателей ЭМ поля для нагрева нефтешламов.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод разогрева нефтяных сред с повышенным содержанием тяжелых фракций внутри технологических ёмкостей для хранения углеводородов с использованием погружных устройств СВЧ излучения;

2. Создана физико-математическая модель нагрева нефтешлама описывающая процесс объёмного тепловыделения энергии СВЧ ЭМ поля от

погружного биконического рупорного излучателя, учитывающая направленное воздействие СВЧ ЭМ волн и волн, отраженных от стенок резервуара;

3. Разработана методика расчёта температурных режимов, позволяющая определить время нагрева и количество погружных СВЧ излучателей для нагрева нефтешламов внутри технологических ёмкостей для хранения высоковязких нефтяных сред, с учётом энергии волн, отражённых от стенок. Результаты моделирования термодинамического процесса подтверждены экспериментальными исследованиями на прототипе погружного нагревателя в масштабе по мощности и объёму;

4. Экспериментально установлено влияние содержания легких фракций углеводородов в нефтяной среде на эффективность передачи энергии СВЧ электромагнитного поля в диапазоне 2,4÷2,5 ГГц.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. Разработана технология разогрева нефтяных сред с повышенным содержанием тяжелых фракций внутри технологических ёмкостей для хранения углеводородов. Результаты исследования могут быть использованы проектными организациями при разработке технологического оборудования для удаления донных отложений;

2. Разработанная методика позволяет рассчитать тепловой режим нефтяной среды, облучаемой погружным СВЧ излучателем;

3. Создана установка СВЧ нагрева, позволяющая эффективно воздействовать на нефтяные среды, хранимые и транспортируемые системами трубопроводного транспорта. Запатентованы устройства СВЧ воздействия на нефтяные среды;

4. Предложена методика расчета параметров технологических устройств для хранения и транспортировки высоковязких нефтяных сред;

5. Даны рекомендации по использованию предлагаемого метода для разогрева нефтешламов в нефтехранилищах.

Соответствие диссертации паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно п. 5 «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора,

подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на специально созданной для целей работы установке. Измерения производились с помощью современного оборудования: для измерения коэффициента стоячей волны (КСВ) использовался векторный анализатор СВЧ цепей CABAN R54; для измерения температуры использовался тепловизор FLIR E50.

Численное моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов, реализованных в программных комплексах ANSYS HFSS и MatLab.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Эффективность передачи энергии СВЧ ЭМ поля от излучателя в диапазоне частот 2,4÷2,5 ГГц в нефтяные среды, транспортируемые системами трубопроводного транспорта, значимо и нелинейно коррелирует с содержанием лёгких фракций углеводородов.

2. Физико-математическая модель объёмного тепловыделения энергии СВЧ ЭМ поля, учитывающая направленное воздействие СВЧ ЭМ волн и волн, отраженных от стенок резервуара, создаваемого погружным излучателем, позволяет определить температуру нефтяного шлама с относительной погрешностью, не превышающей 13 %.

3. Погружной биконический рупорный излучатель СВЧ ЭМ поля позволяет нагревать асфальтосмолопарафиновые отложения до температуры плавления внутри технологических ёмкостей.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается соответствием численной модели с экспериментальными данными. Результаты, полученные с помощью метода конечных элементов в программном комплексе MathLab на основе разработанной в диссертационной работе численной модели, согласно критериям Фишера и Кохрена адекватно коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Экспериментальное определение коэффициента передачи СВЧ энергии в

нефтяную среду проводилось с использованием метода планирования эксперимента, основанном на центрально-композиционном плане второго порядка. Основные положения, результаты и научная новизна диссертационной работы были доложены на 7 международных и всероссийских научно-практических конференциях, форумах и семинарах:

1. 6-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», г. Омск 2016 г.

2. XIV (II Международная) Научно-техническая конференция молодежи Транснефть 2017. АО «Транснефть Западная Сибирь», г. Омск. Диплом III степени за доклад «СВЧ-модуль для разжижения нефтешлама».

3. II Международная молодежная конференция «Tatarstan UpExPro 2018». Казанский Федеральный университет, г. Казань. Диплом I степени за доклад «Разжижение асфальто-парафинистых отложений в резервуарах».

4. XV (III Международная) Научно-техническая конференция молодежи Транснефть 2018. АО «Транснефть Западная Сибирь», г. Омск. Диплом II степени за доклад «Перспективы применения электромагнитного излучения в системе магистральных нефтепроводов».

5. Научно-технический семинар «Перспективы развития науки и техники радиосвязи», г. Омск АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» 2018 г.

6. Международная научно-практическая конференция молодых исследователей им. Д.И. Менделеева, посвященная 10-летию института промышленных технологий и инжиниринга. Тюмень, 22-26 октября 2019 г.

7. Международная научно-техническая конференция «Транспорт и хранение углеводородного сырья». Тюмень, 2-3 июня 2022 г.

Личный вклад автора

Автор работы принял непосредственное участие в разработке и создании прототипа устройства, патентовании, разработке численной модели, проведении эксперимента, организации деятельности коллектива студенческой научно-исследовательской лаборатории «СВЧ технологии в нефтегазовом деле».

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 139 наименований. Работа содержит 139 страниц, 43 рисунка.

Публикации по теме диссертации

Основное содержание работы отражено в 10 публикациях из которых 2 статьи из перечня ВАК РФ ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, 1 статья включена в базу данных Scopus. На предложенные технические решения получены 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, поставлена цель работы, сформулированы задачи исследований и основные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая ценность.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу методов и способов снижения уровня асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в резервуарах. Описаны физико-химические характеристики АСПО. Установлено, что существующие методы, основанные на использовании электромеханических винтовых мешалок и сопел или струйных гидравлических смесителей с гидромониторными головками не решают проблему образования донных отложений и имеют ряд недостатков: дополнительные вибрации стенки, подвержены засорению и коррозии, имеют низкую эффективность.

На основе научных публикаций отечественных и зарубежных ученых выявлено, что такие преимущества использования энергии ЭМ полей, как «объёмное тепловыделение» и безынерционность термодинамического процесса передачи энергии в нефтяную среду, обусловили широкое распространение применения ЭМ воздействия в следующих областях нефтяной отрасли: утилизация нефтешламов; транспортировка и обезвоживание нефти; устранение асфальтопарафиновых пробок в трубопроводе; снижение вязкости; повышение нефтеотдачи. Наибольшую эффективность среди волновых методов по воздействию на вязкость оказывает СВЧ метод.

Кроме того, установлено, что аппараты и системы СВЧ воздействия на нефтяные среды на основе излучателей обладают следующими преимуществами:

- применимы для эксплуатации внутри уже существующих технологических ёмкостей для транспортировки и хранения углеводородов;
- применимы для сред как с жидкой, так и с твердой начальной фазой.

Во второй главе представлены результаты сравнения применимости различных типов излучателей СВЧ ЭМ поля для воздействия на нефтяные среды и результаты предварительных экспериментов.

Результат СВЧ воздействия на нефтешлам демонстрирует следующий опыт (рисунок 1). Образец сформированной массы нефтешлама, собранного в процессе очистки резервуара был размещен на образце лакокрасочного покрытия взятого с внутренней поверхности резервуара. Уклон плоскости к горизонту составлял примерно 1°. Под действием СВЧ излучения спустя несколько минут образец расплавился, и масса стекла вниз по уклону.

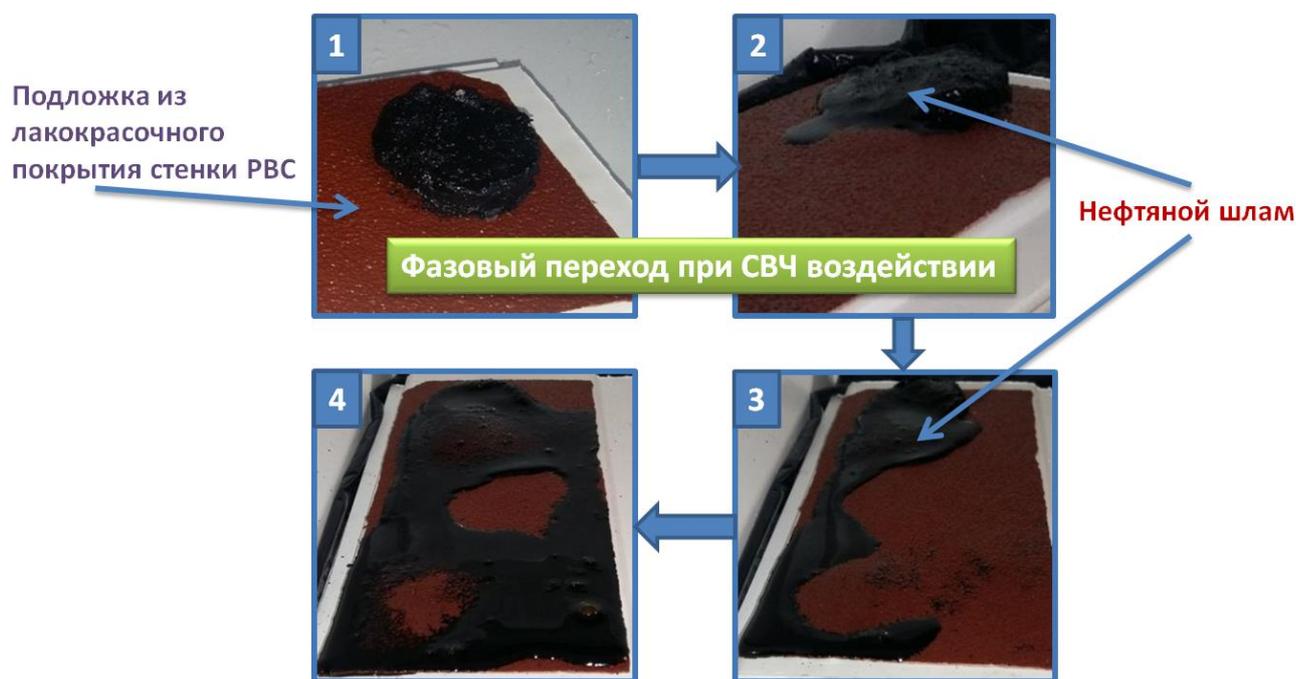


Рисунок 1 – Разжижение нефтяного шлама при СВЧ нагреве

Сложность извлечения углеводородов (УВ) из резервуаров, в первую очередь, связана с высокой вязкостью, которая зависит от процентного содержания лёгких фракций углеводородов, являющихся растворителями в нефтяной среде.

Температура нефтяной среды напрямую зависит от количества переданной в среду энергии от источника СВЧ ЭМ поля. КПД передачи энергии СВЧ излучателя определяется как:

$$\eta = \left(1 - \left(\frac{\frac{1}{KCB} - 1}{\frac{1}{KCB} + 1} \right)^2 \right) \cdot 100\% ,$$

где КСВ – коэффициент стоячей волны, измеряемый в эксперименте параметр излучателя, который зависит от частоты ЭМ поля и состава нефтяной среды.

Для определения КПД процесса передачи энергии СВЧ ЭМ поля проведено исследование КСВ биконического рупорного излучателя в зависимости от частоты ЭМ поля и содержания легкой фракции углеводородов в нефтяной среде. Такое многофакторное исследование проведено с использованием методов планирования эксперимента.

Для экспериментального исследования составлен центральный композиционный план второго порядка для двух факторов. В используемом плане величина звездного плеча $\alpha=1$, а коэффициент преобразования плана второго порядка к ортогональному виду $\beta=2/3$. Ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов

Содержание плана	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x_2^2 - \frac{2}{3}$	y
План типа 2^2	1	+	+	+	+	+1/3	+ 1/3	y_1
	2	+	-	+	-	+1/3	+ 1/3	y_2
	3	+	+	-	-	+1/3	+1/3	y_3
	4	+	-	-	+	+1/3	+1/3	y_4
«Звездные» точки с плечом $\alpha=1$	5	+	+	0	0	+1/3	-2/3	y_5
	6	+	-	0	0	+1/3	-2/3	y_6
	7	+	0	+	0	-2/3	+1/3	y_7
	8	+	0	-	0	-2/3	+1/3	y_8
Нулевая точка	9	+	0	0	0	-2/3	-2/3	y_9

В данном случае имеются два основных влияющих фактора, имеющих три уровня:

X_1 – процентное содержание (0; 50; 100) легких фракций УВ, %.

X_2 – частота (2,4; 2,45; 2,5) ЭМ поля, ГГц.

Функция отклика аппроксимировалась полиномом второй степени вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} \left(x_1^2 - \frac{2}{3} \right) + b_{22} \left(x_2^2 - \frac{2}{3} \right), \quad (1)$$

где b_i – коэффициенты регрессии.

Все коэффициенты регрессии определяются по общей формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} \quad (2)$$

где i – номер столбца матрицы; j – номер опыта; x_{ij} – элементы соответствующего столбца матрицы; y_j – значение параметра оптимизации в j -ом опыте; N – число опытов.

Для проведения эксперимента был взят образец товарной нефти, подвергнутый перегонке до температуры 300 °С, что соответствовало испарению 50 % массы нефти. Далее измерялся КСВ в исследуемом диапазоне частот для нефтяных сред различного состава.

После проверки адекватности теоретической модели и значимости коэффициентов регрессии по t -статистике Стьюдента получено уравнение функции отклика

$$КСВ = 4,2 - 0,94x_1 + 0,42x_1x_2 + 1,09x_1^2 - 0,32x_2^2. \quad (3)$$

Поверхность отклика, описываемая уравнением (3), представлена на рисунке 2.

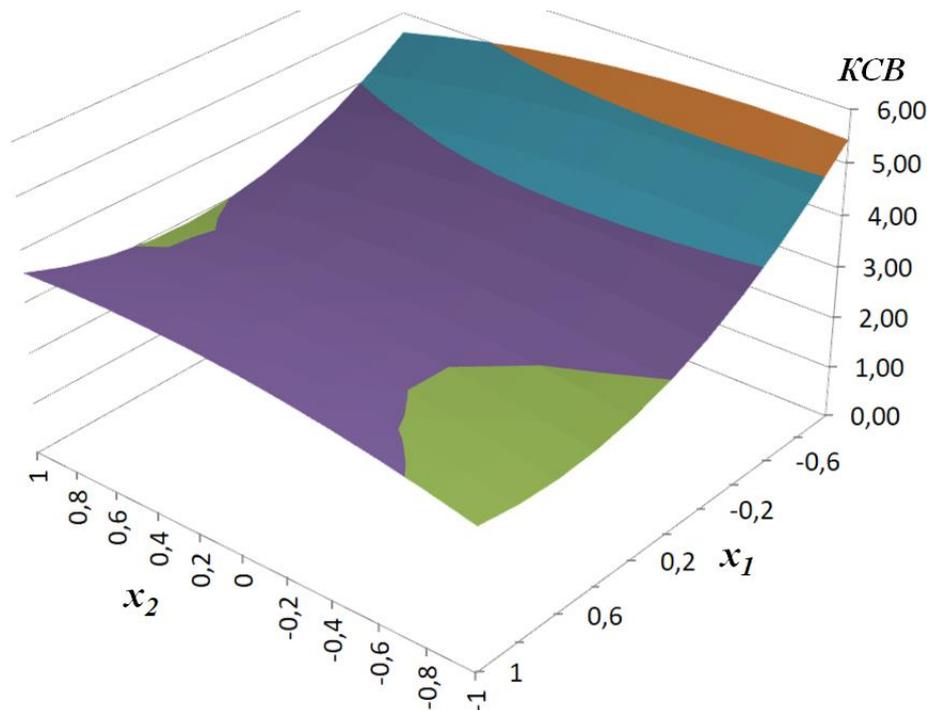


Рисунок 2 – Поверхность отклика КСВ биконического рупорного излучателя

По полученным данным видно, что КПД передачи энергии ЭМ поля во всём диапазоне содержания легких фракций углеводородов изменятся от 52 %

до 80 %, что означает достаточную эффективность процесса теплопередачи. Для тяжелых и битуминозных нефтей с содержанием легких фракций более 10 %, КПД находится в диапазоне 57 ÷ 75 % (рисунок 3). В исследуемых диапазонах частот и содержания легких фракций углеводородов КСВ излучателя хорошо описывается полиномиальной зависимостью второго порядка. Таким образом, можно сделать вывод о возможности эффективной передачи энергии СВЧ ЭМ поля от излучателя в нефтяные среды различного состава.

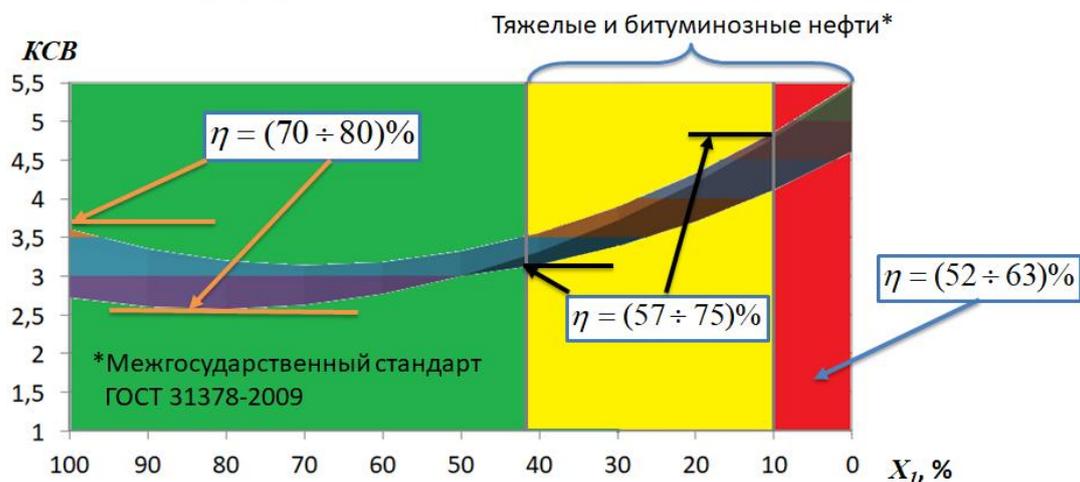


Рисунок 3 – КПД передачи энергии в тяжелые и битуминозные нефти

В третьей главе получена физико-математическая модель процесса передачи энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяные среды биконическим рупорным излучателем и произведен термодинамический расчет.

Математическая модель распределения энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяной среде описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_o = 2\pi f \cdot tg\delta \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \int_V E^2 dV \\ E_0^2 = \frac{30P_0}{r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \sqrt{\varepsilon}} \\ E = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} e^{-\alpha(r-r_0)} \\ \alpha = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} \cdot tg\delta}{c} \end{array} \right. \quad (4)$$

где P_o , – выделяемая в нефтяной среде мощность, Вт; P_0 – подведённая мощность, Вт; f – частота ЭМ поля, Гц; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических

потерь среды; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; E – напряженность электрического поля, В/м; E_0 – начальная напряженность электрического поля, В/м; c – скорость света м/с; r_0 – радиус сферического пояса, м; R – радиус прогреваемого слоя, м.

На рисунке 4 представлена диаграмма направленности рассматриваемого излучателя. В горизонтальной плоскости диаграмма $F(\varphi)$ рассматриваемого излучателя – круговая, а в вертикальной плоскости она характеризуется углом места θ .

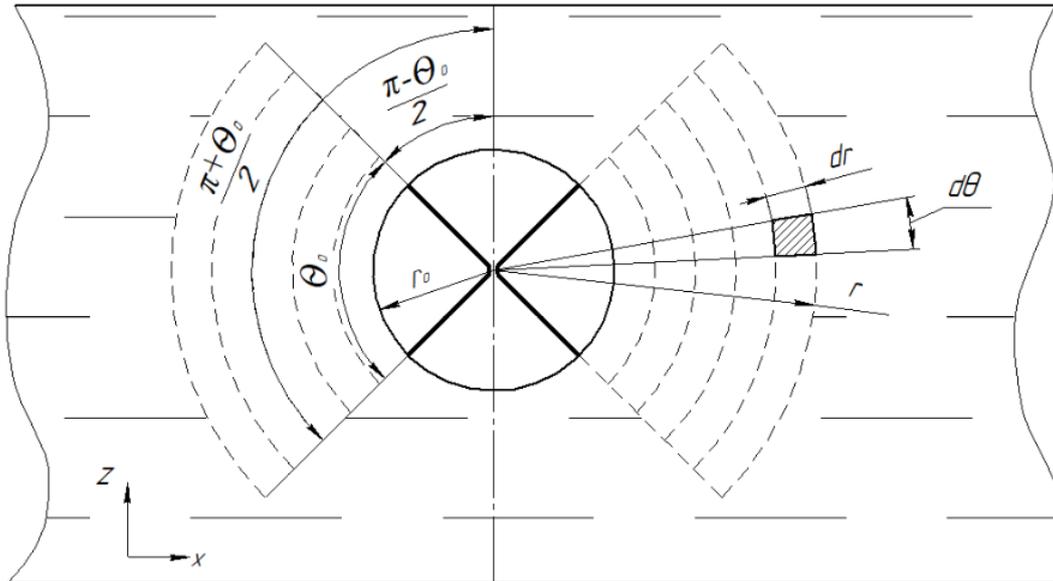


Рисунок 4 – Расчетная схема излучателя в сферической системе координат

Решая (4) относительно P_θ , получим выражение для определения поглощаемой мощности:

$$P_\theta = (1 - e^{-2\alpha(r-r_0)})P_0. \quad (5)$$

С помощью (5) находится удельная поглощаемая мощность падающей волны:

$$q(r) = \frac{\Delta P_\theta}{\Delta V} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2}. \quad (6)$$

Аналогичным образом получено выражение удельной поглощаемой мощности от отраженной волны

$$q^*(r) = \frac{\Delta P_\theta}{\Delta V} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)}}{2\pi r^2}. \quad (7)$$

где r_c – расстояние от излучателя до стенки.

Удельная поглощаемая мощность волны, отраженной от противоположной стенки:

$$q^{**}(r) = \frac{\Delta P_{\partial}}{\Delta V} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r+2r_c-2r_0)}}{2\pi r^2}. \quad (8)$$

Процессы СВЧ нагрева диэлектриков описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; & \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{D} = 0; & \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{D} = \varepsilon(T) \vec{E}; & \vec{B} = \mu(T) \vec{E} \\ \vec{j} = \sigma(T) \vec{E} \\ \frac{\partial}{\partial t} (c(T) \cdot \rho_n(T) \cdot T) + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} T) = \operatorname{div} (\lambda(T) \cdot \vec{\nabla} T + q(T, \vec{E})) \end{cases} \quad (9)$$

где \vec{E} и \vec{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; \vec{D} и \vec{B} – векторы электрической и магнитной индукции; t – время; \vec{j} – плотность тока проводимости; σ – проводимость диэлектрика; ε – диэлектрическая проницаемость; q – удельная поглощенная мощность; T – температура; \vec{V} – вектор скорости перемещения среды; $\vec{\nabla}$ – оператор Гамильтона; c – теплоёмкость нефтяной среды; ρ_n – плотность нефтяной среды; λ – теплопроводность нефтяной среды.

В случае нагрева покоящихся сред, плотность, теплоёмкость и теплопроводность которых не зависит от температуры, уравнение нестационарной теплопроводности из системы (9) принимает вид:

$$c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \operatorname{div}(\nabla T) + q(r), \quad (10)$$

а с учётом (6) и (7) примет вид:

$$c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \nabla T) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)}}{2\pi r^2}. \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает распределение температурного поля нефтяного шлама нагреваемого погружным излучателем.

Из рисунка 5, где представлен сравнительный анализ процесса теплопередачи в твёрдые нефтешламы, видно, что реализация процесса объёмного тепловыделения значительно увеличивает область прогрева.

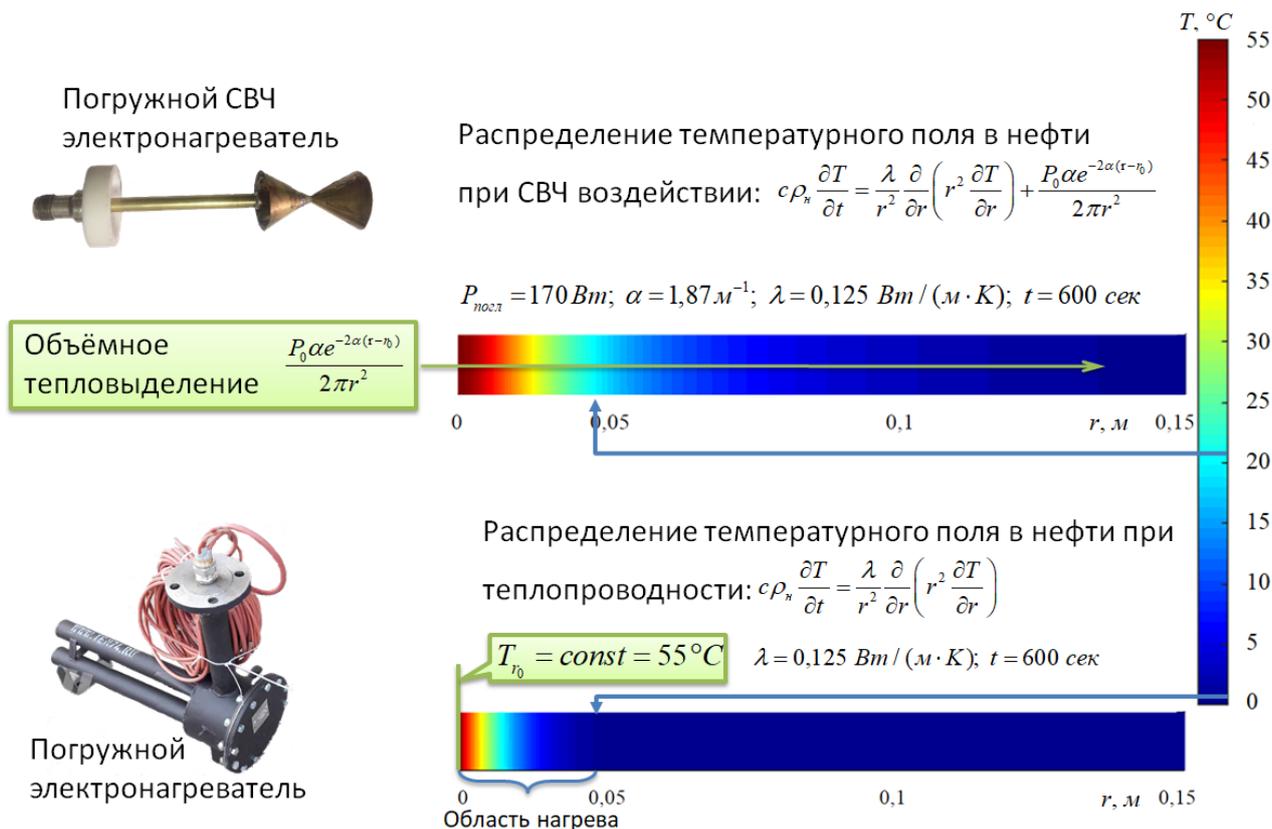


Рисунок 5 – Анализ процесса теплопередачи в твёрдые нефтешламы

Таким образом, получена физико-математическая модель, описывающая изменения теплофизических параметров нефти под воздействием энергии СВЧ ЭМ поля, излучаемого биконическим рупорным излучателем, на основе феноменологических (термодинамических) уравнений электродинамики и тепломассопереноса в сплошной среде. Они связаны между собой через источник член в уравнении энергии, входящего в систему уравнений тепломассообмена, мощность которого определяется из уравнения электродинамики, которое решалось аналитически, а уравнение тепломассообмена для определения теплофизических параметров нефти решались численно методом конечных элементов (MatLab), с учётом аналитических зависимостей мощности тепловыделения.

В четвертой главе проведена апробация работы аппарата СВЧ нагрева нефтяной среды на основе погружного излучателя; показана его работоспособность и эффективность.

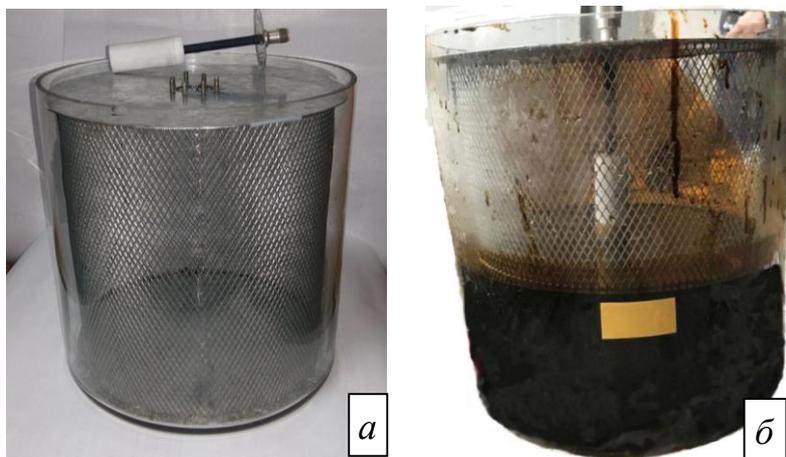
Изучение применимости технологии СВЧ ЭМ воздействия на нефть и нефтешламы проводилось на сконструированном экспериментальном макете, функциональном в масштабе по мощности и объёму, состоящем из излучателя, источника СВЧ энергии и соединяющего их перехода.

Биконический излучатель высотой 5 см (рисунок 6), помещался в диэлектрик из Ф-4 для исключения непосредственного контакта между поверхностью излучателя и нефтяной средой.



Рисунок 6 – Биконический рупорный СВЧ излучатель

Ёмкость для хранения нефти представляла собой цилиндрический бак из стекла, помещённый в сетчатый экран, снижающий излучение за его пределы. Биконический излучатель располагался по центру бака, после чего описанная система заполнялась исследуемой средой (рисунок 7) в количестве 7 литров.



а – пустой; б – наполненный нефтью и нефтешламом

Рисунок 7 – Радио-непроницаемый цилиндр в ёмкости

СВЧ установка, питающая излучатель, представленная на рисунке 8, состояла из генератора СВЧ излучения – магнетрона, работающего на частоте 2450 МГц, переходного устройства с короткозамыкателем, преобразующего поток ЭМ поля волновода в ТЕМ-волну, систем питания и охлаждения.



Рисунок 8 – СВЧ установка и её составляющие

С помощью данного макета был проведен эксперимент по нагреву нефти. Результаты зафиксированы тепловизором FLIR E60 (рисунки 9, 10). Начальная температура среды составляла 8 °С. Спустя 12 минут работы установки температура верхнего слоя среды повысилась на 17 °С и составила порядка 25 °С. Температура нижнего слоя составила 19 °С. Среда подвергалась механическому перемешиванию перед измерением.

При моделировании учитывалась энергия, передаваемая от падающей, отраженной и отраженной от противоположной стенки волн, то есть рассматривалось уравнение нестационарной теплопроводности (10) с учётом (6), (7) и (8):

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)}}{2\pi r^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r+2r_c-2r_0)}}{2\pi r^2} \quad (12)$$

Рисунок 11 показывает распределение температуры от падающей, отраженной и отраженной от противоположной стенки волн с учетом граничных условий. Среднее значение температуры через 720 с и составило 22,5 °С. На рисунке 12 представлены средние значения температур $T_{cp}^{теор}$ по (12) и по результатам экспериментов в зависимости от времени.

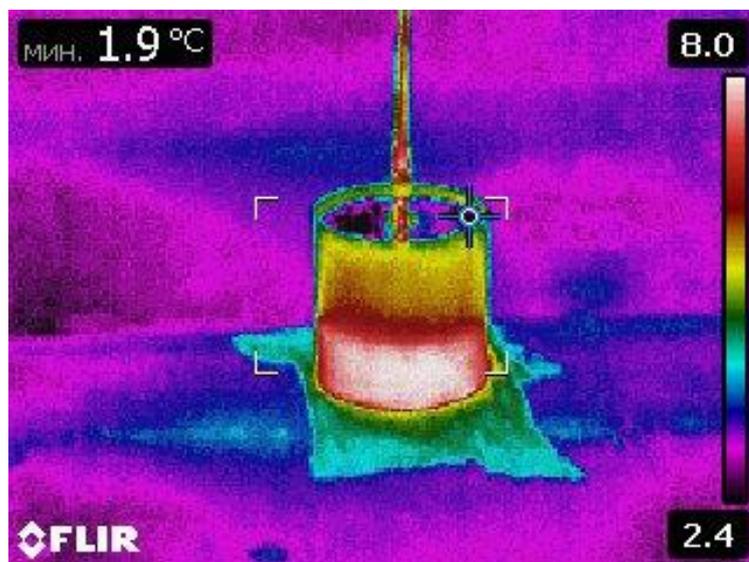


Рисунок 9 – Распределение температуры в среде до включения установки

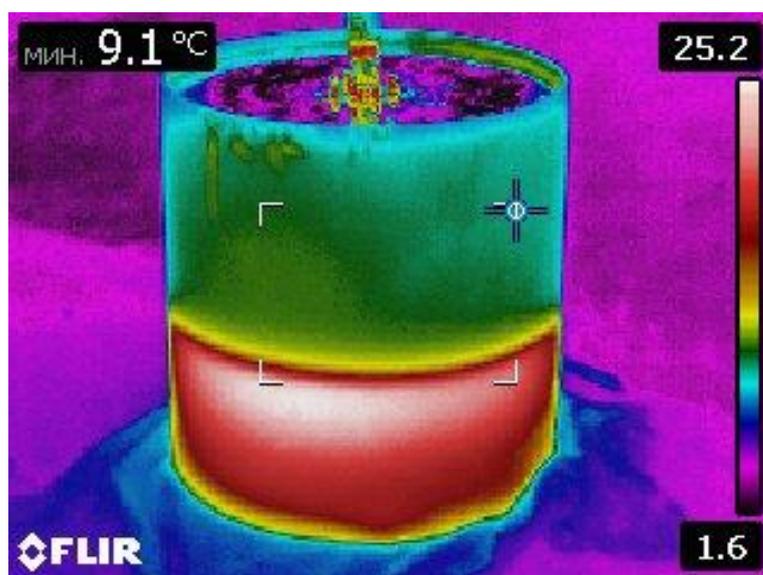


Рисунок 10 – Распределение температуры в среде спустя 12 минут работы установки

Анализ экспериментальных данных согласно критериям Фишера и Кохрена установил, что результаты физико-математической модели адекватно описывают экспериментальные данные.

Экспериментально подтверждено, что физико-математическая модель адекватно описывает термодинамический процесс в нефтяной среде, облучаемой СВЧ ЭМ полем, которое создаётся биконическим рупорным излучателем.

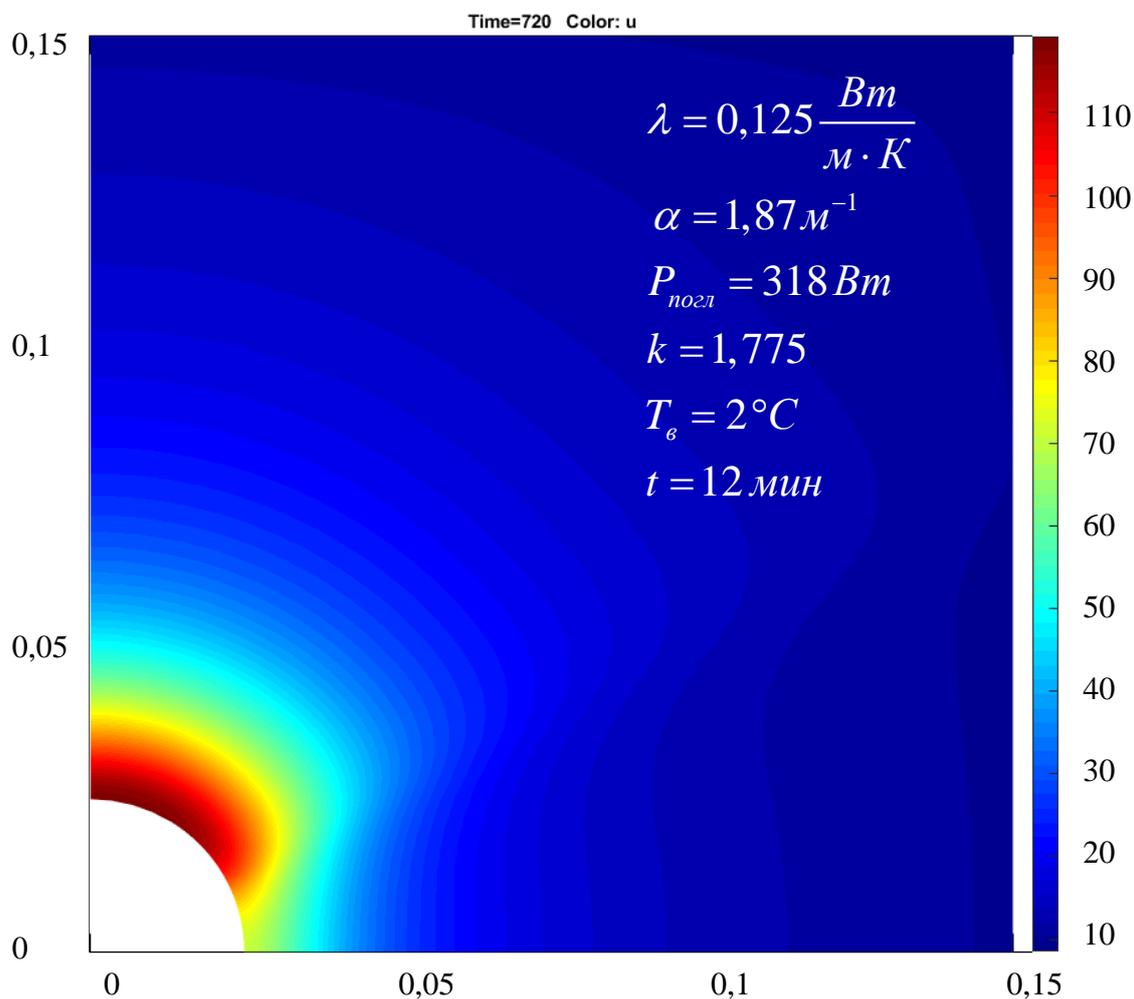


Рисунок 11 – Тепловое поле от падающей, отраженной и отраженной от противоположной стенки волн

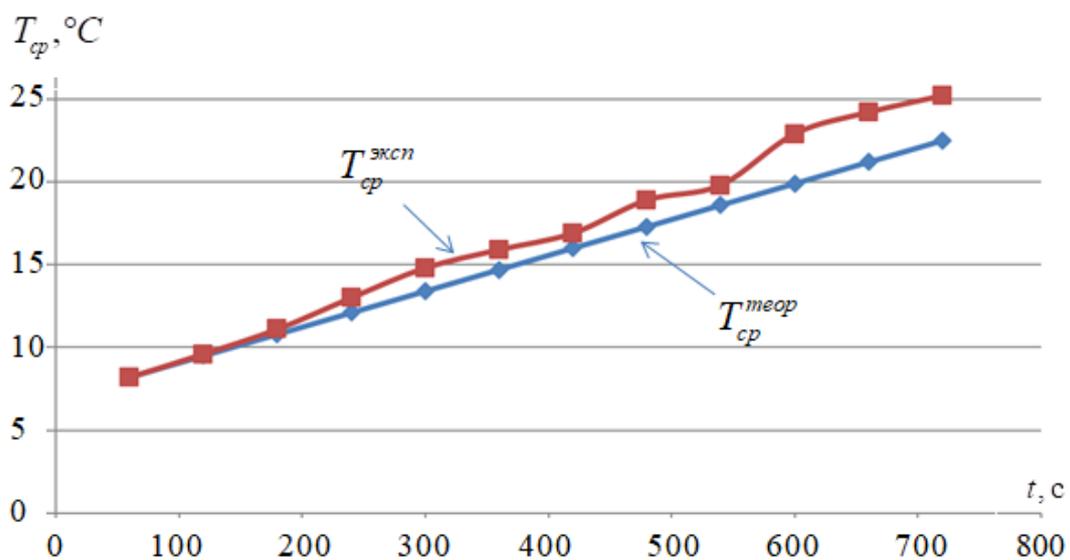


Рисунок 12 – Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Методика расчета разогрева АСПО отложений в резервуарах

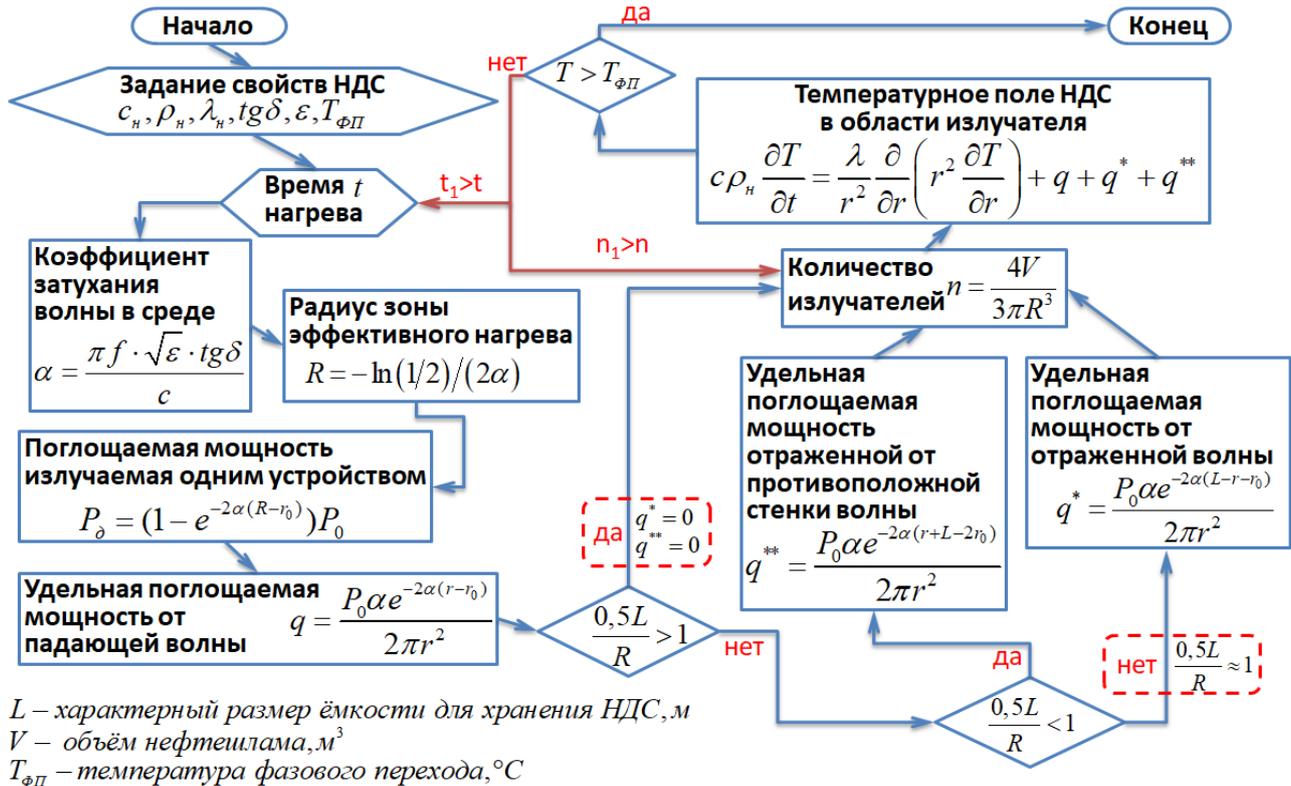


Рисунок 13 – Методика расчета разогрева АСПО отложений в резервуарах

На основании полученных зависимостей в диссертации разработана методика расчета теплового режима нефтяной среды, облучаемой погружным излучателем СВЧ. На рисунке 13 показана методика расчета разогрева АСПО отложений в резервуарах, позволяющая рассчитать тепловой режим технологического процесса удаления донных отложений из РВС не пригодных для трубопроводного транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика и прототип установки передачи СВЧ энергии ЭМ поля в нефтяные среды на основе биконического рупорного излучателя. Экспериментально определены условия максимальной передачи СВЧ энергии излучателя в нефтяную среду в диапазоне частот 2,4÷2,5 ГГц. Экспериментально получена зависимость КПД передачи энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяную среду в зависимости от содержания легких фракций углеводородов. Для битуминозных и тяжелых нефтей с содержанием легких фракций более 10 % максимальный КПД передачи СВЧ энергии ЭМ поля достигает 75 %.

2. На основании анализа многофакторной зависимости температурных полей в нефтяных средах от ЭМ излучения СВЧ диапазона 2,4÷2,5 ГГц

разработана физико-математическая модель термодинамического процесса в нефтяной среде, облучаемой СВЧ ЭМ полем, создаваемым погружным излучателем, которая согласуется с экспериментом.

3. С целью определения скорости нагрева и проверки адекватности методики расчета проведена апробация работы установки СВЧ нагрева нефтяной среды на основе биконического рупорного излучателя; показано, что изменение температуры нефтяной среды объемом 7 литров за 12 минут составило 15 °С, что согласно критериям Фишера и Кохрена, адекватно коррелирует с результатами математической модели.

4. Экспериментально подтверждено, что предложенные способ и устройство передачи СВЧ энергии ЭМ поля в нефтяную среду позволяют уменьшить вязкость нефтяных шламов тепловым СВЧ воздействием непосредственно внутри резервуара и использовать как основу технологии очистки нефтяных резервуаров.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Экспериментальное исследование передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля в нефтяную среду посредством погружного излучателя / **А. Ф. Секачёв**, В. В. Шалай, Ю. Д. Земенков [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 120–129.

2. Анализ эффективности передачи в нефтяные среды энергии СВЧ электромагнитного поля, создаваемого погружным излучателем / **А. Ф. Секачёв**, В. В. Шалай, Р. Н. Иванов [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2021. – № 9-10. – С. 74–79.

Патенты:

3. Патент № 2681619 Российская Федерация, МПК В08В 9/08, В08В 3/10. Способ и устройство разжижения нефтяных шламов внутри резервуаров и закрытых емкостей СВЧ-полем : № 2017147175 : заявл. 29.12.2017 : опубл. 11.03.2019 / В. П. Кисмерешкин, **А. Ф. Секачёв**, А. Е. Яковлев, А. Ф. Фицнер ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

4. Патент № 164578 Российская Федерация, МПК F17D 1/16. Устройство для создания импульсов давления при перекачке высоковязкой нефти : № 2016106462/06 : заявл. 24.02.2016 : опубл. 10.09.2016 / В. В. Шалай, С. М.

Слободян, Р. Н. Иванов, **А. Ф. Секачѳв**, К. В. Щербань, В. И. Крупников ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

5. Патент № 203589 Российская Федерация, МПК В65D 88/74. Контейнер для транспортировки битума с СВЧ-излучателем: № 2020143548 : заявл. 29.12.2020 : опубл. 13.04.2021 / **А. Ф. Секачѳв**, А. В. Сеченова, В. В. Шалай, А. Р. Осипов ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus

6. The Innovative Design of the Disperser for Separating Particles of Oil / **А. Ф. Sekachev**, V. S. Deeva, S. M. Slobodyan [et al.] // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 152. – P. 158–162.

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

7. Создание волновой динамики вязкой нефти в трубопроводе / В. С. Тетерин, В. С. Деева, С. М. Слободян, **А. Ф. Секачѳв**, Р. Н. Иванов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 497–500.

8. Технология очистки резервуаров с использованием СВЧ нагрева / **А. Ф. Секачѳв**, В. В. Шалай // Транспорт и хранение углеводородного сырья : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Тюмень, 2-3 июня 2022 года) / Т. 1 / под общ. ред. Ю. Д. Земенкова. – Тюмень: ТИУ, 2022. – 236 с.

9. Разработка СВЧ модуля для разжижения нефтешлама / **А. Ф. Секачѳв**, В. П. Кисмерешкин, А. Е. Яковлев [и др.] // Трубопроводный транспорт углеводородов : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 28–29 сент. 2017 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ. – 2017. – С. 125–128.

10. Анализ возможности применения электромагнитного излучения в трубопроводном транспорте высоковязкой нефти / В. А. Иванов, О. В. Прямоносков, В. П. Кисмерешкин, **А. Ф. Секачѳв** // Трубопроводный транспорт углеводородов : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 30–31 окт. 2018 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – С. 7–12.

Подписано в печать 11.10.2022. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1,31.
Тираж 100 экз. Заказ № 2509.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.