

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



СЕКАЧЁВ АНДРЕЙ ФЕДОРОВИЧ

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

Специальность:

2.8.5 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор, Шалай В.В.

Омск 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРАХ. 12	12
1.1 Особенности хранения нефти	12
1.2 Свойства донных отложений	15
1.3 Зачистка резервуаров от остатков высоковязких нефтепродуктов.....	18
1.4 Погружные нагреватели для подогрева нефти внутри резервуаров.....	20
1.5 Методы и устройства для предотвращения образования и накопления асфальтосмолопарафиновых отложений	22
1.6 Обзор современных методов очистки резервуаров.....	31
1.7 Влияние СВЧ на нефтяные дисперсные системы.....	41
1.8 Области применения ЭМ полей в нефтяном деле	44
1.9 Выводы по главе.....	50
ГЛАВА 2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ СВЧ ЭМ ПОЛЯ В НЕФТЯНЫЕ СРЕДЫ.....	52
2.1 Излучающие системы электромагнитных полей для нефтяных сред	53
2.2 Исследование типов излучателей электромагнитных полей для нефтяных сред.....	55
2.3 Центральный композиционный план экспериментальных измерений КСВ биконического рупорного излучателя	60
2.4 Исследование применимости биконического рупорного излучателя для воздействия на нефтяные среды	66
2.5 Особенности излучателей электромагнитного поля для нефтяных шламов и оценка масштабируемости технологии	67
2.6 Контейнер для транспортировки битума с СВЧ излучателем.....	72
2.7 Выводы по главе.....	74
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА НЕФТЯНОЙ СРЕДЫ СВЧ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ	75

3.1 Математическая модель распределения энергии ЭМ поля в нефтяной среде.....	75
3.2 Удельная поглощаемая мощность	80
3.3 Термодинамический расчёт	84
3.4 Численное моделирование	85
3.5 Выводы по главе.....	89
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА НЕФТЯНОЙ СРЕДЫ БИКОНИЧЕСКИМ РУПОРНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ	90
4.1 Критерии подобия аппаратов реструктуризации нефтяных дисперсных систем антенными излучателями СВЧ поля	90
4.2 Проблемы методов исследования процессов, протекающих в нефти под воздействием ЭМП.....	92
4.3 Ёмкость безопасного экспериментального стенда для исследования воздействия ЭМП на нефтяную среду	93
4.4 Описание экспериментальной установки	94
4.5 Экспериментальное измерение температурного поля нефтяной среды, нагреваемой СВЧ ЭМ полем.....	96
4.6 Моделирование эксперимента по нагреву нефтяной среды, нагреваемой СВЧ ЭМ полем	98
4.7 Проверка адекватности соответствия математической модели экспериментальным данным.....	104
4.8 Методика расчёта теплового режима нефтяной среды, облучаемой биконическим рупорным излучателем	108
4.9 Выводы по главе.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное). Решение задачи нестационарной теплопроводности в MATLAB.....	134

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное). Акт внедрения результатов исследования	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное). Патент на изобретение.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное). Патент на полезную модель	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Мировое экономическое развитие идёт по пути увеличения суммарного энергопотребления [82]. Вместе с тем, на сегодняшний день доля запасов высоковязкой нефти преобладает и продолжает расти [98]. 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 высоковязковязкой 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 [86].

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 «объемное тепловыделение». В диссертации представлено обоснование технологии СВЧ разогрева нефтешламов внутри технологических емкостей 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 $2,4 \div 2,5$ 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 $2,4 \div 2,5$ 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, четырех 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 полезную модель.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРАХ

1.1 Особенности хранения нефти

Магистральный трубопроводный транспорт в России играет ключевую роль в обеспечении экономических и социальных интересов национальной безопасности. Будучи специфическим видом транспорта для перемещения опасного сырья на дальние расстояния, согласно [21], магистральный нефтепровод представляет собой единый производственно-технологический комплекс, основным назначением которого является транспортировка подготовленной нефти из пункта приема до пункта сдачи. Данный комплекс включает в себя связанную с обеспечением транспортного процесса инфраструктуру хранения углеводородов.

Наиболее важной задачей при хранении нефти и нефтепродуктов в резервуарах является обеспечение его надежной эксплуатации на протяжении всего срока службы. В связи с этим необходимо контролировать техническое состояние и своевременно проводить зачистку нефтяных резервуаров. Вовремя проведенная зачистка резервуаров от остатков нефтепродуктов, влаги, механических примесей и высоковязких смолистых осадков обеспечивает бесперебойную работу всего комплекса по транспорту и хранению нефти и нефтепродуктов.

В стальных вертикальных резервуарах в результате длительного хранения на дне возникает осадок, который сокращает полезную ёмкость и затрудняет эксплуатацию. С течением времени происходит уплотнение осадка, что существенно затрудняет его вымывание. Кроме этого, из-за трудности очистки резервуаров степень поражения днища коррозией в большинстве случаев остается невыявленной и становится известной только после прорыва днища [32]. Для предотвращения этого необходимо своевременно проводить очистку резервуаров.

Согласно [18] металлические и железобетонные резервуары для хранения нефти, мазутов, моторных топлив и аналогичных по физико-химическим свойствам нефтепродуктов следует зачищать по мере необходимости, определяемой условиями сохранения их качества, надежной эксплуатации резервуаров и оборудования.

Оценка объёмов осадка затруднена, поскольку его распределение по площади днища неравномерно: чем дальше от приемо-раздаточных патрубков, тем осадок толще. В [101] отмечается, что даже при использовании СПВК в РВС для хранения нефти уровень донных отложений 700...800 мм, при общей площади застойных зон 30...40 % от площади днища. В нормативно-технической документации (таблица 1) представлены рекомендуемые по [19] геометрические параметры резервуаров. Таким образом, можно оценить, что для РВС 5000 диаметром 22,8 м при уровне донных отложений 0,5 м, равномерно распределённых по днищу, объём осадка составит порядка 200 м³, а для РВС 50000 с диаметром 60,7 м при уровне донных отложений 0,3 м объём осадка составит порядка 850 м³. Работа по удалению донных отложений относительно небольшого уровня осадка требует наличия дополнительной ёмкости для временного хранения. Кроме того, согласно [104] при разогреве донных отложений горячей водой объём полученной водонефтяной эмульсии возрастает минимум в 5-6 раз. Более того, в районах крайнего севера при хранении тяжелых нефтей уровень осадка может достигать нескольких метров.

Донные отложения – это осадок в резервуаре, представляющий собой гетерогенную систему, состоящую преимущественно из нефти (нефтепродукта), твердых парафинов, асфальто-смолистых веществ, механических примесей и подтоварной воды [60]. Стоит различать понятия донные отложения от нефтешламы. Согласно [21] нефтешлама – это отходы III и IV классов опасности, представляющие собой сложные физико-химические смеси, состоящие из нефтепродуктов, механических примесей и воды. К механическим примесям относят песок, глину, окислы металлов.

Таблица 1 – Рекомендуемые геометрические параметры резервуаров

Номинальный объем V, м	Тип резервуара					
	РВС, РВСП			РВСПК		
	Внутренний диаметр стенки D*, м	Высота стенки Н*, м		Внутренний диаметр стенки D*, м	Высота стенки Н*, м	
100	4,73	5,96	6,0	-	-	
200	6,63					
300	7,58					
400	8,53					
700	10,43	8,94	9,0			
1000		11,92	12,0	12,33	8,94	9,0
2000	15,18			11,92	12,0	
3000	18,98					
5000	22,80					
10000	20,92	14,90	15,0	22,80	11,92	12,0
	28,50	17,88	18,0	28,50		
20000	34,20	11,92	12,0	34,20	11,92	12,0
	39,90	18,0		39,90	18,0	
30000	47,40 (45,6)	12,0				
	40000	45,60	18,0	45,60		
50000	56,90	56,90				
100000- 120000	60,70	60,70				
	95,40	95,40				

* Уточняется в зависимости от ширины и длины листов стенки и метода изготовления (рулонного или полистового).

Такое различие в определениях отраслевого регламента прямо указывает на то, что донные отложения, состоящие преимущественно из нефти, сами по себе ещё не являются отходами из-за низкого содержания воды. Другими словами, можно сказать, что в процессе существующих технологий очистки за счёт разогрева с использованием горячей воды и моющих средств донные отложения становятся отходами не пригодными для трубопроводного транспорта и требующими переработки и утилизации. В этой связи разработка технологий подведения теплоты в донные отложения без использования водных теплоносителей способны качественно улучшить экологическую составляющую проблемы очистки резервуаров.

Отраслевой регламент [60] также разделяет понятия жидкие и твердые донные отложения в резервуаре. Жидкие донные отложения – это суспензия с твёрдой дисперсной фазой, состоящей из твёрдых парафинов, асфальто-смолистых веществ и механических примесей, и жидкой дисперсной средой, представляющей собой эмульсию нефти и подтоварной воды. Твердые донные отложения – это компактный осадок, состоящий из твёрдых парафинов, асфальто-смолистых веществ, остатков нефти (нефтепродукта) и механических примесей. Асфальто-смолистые вещества, образующие основную массу отложений, – широкая гамма тёмноокрашенных неуглеводородных компонентов битуминозных веществ, включающая все элементы их группового состава, кроме масляной фракции:

- силикагелевые смолы – компоненты, растворимые в петролейном эфире и адсорбируемые из него силикагелем, флорицином и др.;
- асфальтены – нерастворимые в петролейном эфире компоненты, осаждаемые им из раствора в бензоле, хлороформе и др.;
- карбоиды – нерастворимые в хлороформе и сероуглероде компоненты, являющиеся главной частью группового состава керитов и антраксолитов.

1.2 Свойства донных отложений

Представленное выше определение донных отложений как многокомпонентной среды накладывает трудности на определение их физических свойств. Однако, хорошо известно, что физические свойства донного осадка в резервуарах в значительной степени схожи со свойствами асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). Многие из этих свойств, прямо или косвенно, определяются химическим составом АСПО, который влияет на межмолекулярные взаимодействия и структурные особенности данной нефтяной системы.

В работе [29] исследовались физико-химические свойства и химический состав АСПО, отобранных на различных участках технологического оборудования:

- нефтезаводские АСПО: отложения в связующих коммуникациях Московского НПЗ (АСПО-1), донные отложения товарного резервуара (АСПО-2) и мазутового резервуара (АСПО-3) Рязанского НПЗ;
- нефтепромысловые АСПО: отложения, образовавшиеся в нефтепромысловых скважинах, выкидных коммуникациях Асомкинского (АСПО-4), Вьенгапуровского (АСПО-5) месторождений и отложения с месторождений Калмыкии (АСПО-6). В таблице 2 приведены физико-химические характеристики исследованных АСПО.

Таблица 2 – Физико-химические характеристики АСПО

Показатели	Нефтезаводские АСПО			Нефтепромысловые АСПО		
	АСПО 1	АСПО 2	АСПО 3	АСПО 4	АСПО 5	АСПО 6
Плотность, г/см ³	0,94	1,0	1,3	1,0	0,9	0,81
Содержание мех. примесей, % масс	6,97	49,9	44,5	37,34	12,06	18,53
Содержание воды, % об,	5	2,6	1,4	–	0,3	4
Температура плавления, °С	44	57	53,4	75	70	66
Содержание серы, % масс	0,3	1,7	1,5	0,4	0,2	0,1

Отложения в резервуарах мазутохранилищ можно разделить на четыре основных типа по плотности, а также по способности к физико-химическим реакциям (омылению, эмульсации, растворимости и солубилизации) [87]. Характеристики отложений приведены в таблице 3.

Следует различать определения основных физико-химических свойств отложений, определяющих сложность процесса очистки резервуаров, указанных в таблице 3:

1. Омыление - нейтрализация щелочами кислых органических соединений (в том числе не растворимых в воде) с переходом продуктов нейтрализации в раствор в виде растворимых мыл, способных к дальнейшим сложным физико-химическим процессам.
2. Растворимость - способность вещества образовывать с растворителем однородную, гомогенную, стабильную жидкость.

3. Солюбилизация - приобретение различными соединениями способности к эмульгации или растворимости при обработке этих соединений соответствующими веществами.
4. Эмульсация - способность жидких, не растворимых в какой-либо среде органических соединений к образованию мелких капель, удерживаемых этой средой во взвешенном состоянии, в виде однородной смеси в течение определенного отрезка времени.

Таблица 3 – Типы отложений в резервуарах мазутохранилищ

Тип отложений (плотность, г/см ³)	Количество компонентов, способных к физико-химическим реакциям, %			
	Омыля- емые	Эмульгиру- ющиеся	Растворимые	Солюбили- зирующиеся
А (0,96-0,99)	72-77	85	96	98-100
Б (1-1,07)	0-13	35	94	98-100
В (1,08-1,4)	0	до 10	50	75
Г (1,5-2)	0	5	15	65

Как видно из таблицы, с возрастанием плотности отложений уменьшается количество компонентов, способных к простейшим физико-химическим реакциям. Более твердые отложения требуют и более сложных реакций, таких как солюбилизация, обуславливающая применение многокомпонентных растворителей. Соответственно усложняются процессы механизированной очистки твердых отложений.

Донные отложения имеют свойства неньютоновской жидкости. Это в первую очередь связано с наличием высокомолекулярных соединений, таких как парафинистые скелеты и глобулы асфальтенов. Для описания движения молекул такого вещества среда может быть рассмотрена как сложно упорядоченная решетчатая структура, в которой протекает процесс перехода молекул в пустые ячейки [17]. Длинные молекулы могут «перетекать» змеевидным образом – по звену за раз. Такой подход к физическому описанию природы вязкостного трения даёт основание полагать, что для интенсификации процесса течения целесообразно использовать механические колебания [51; 61; 96; 138], СВЧ излучения и др.

1.3 Зачистка резервуаров от остатков высоковязких нефтепродуктов

Все операции по подготовке и размыву донных отложений выполняют в соответствии с технологической картой по размыву донных отложений в резервуарах [22]. Типовая технологическая карта технологии очистки резервуара от остатков нефтепродуктов [104] предусматривает следующие виды работ:

- разогрев остатка нефтепродукта в резервуаре системой подогрева;
- удаление остатка нефтепродукта;
- предварительную дегазацию в случае остатка нефтепродукта с температурой вспышки газов ниже 60 °С;
- промывку внутренних поверхностей резервуара ТМС;
- удаление продуктов зачистки;
- чистовую обработку днищевой поверхности.

Рассмотрим отдельно процессы разогрева и удаления остатка вязкого нефтепродукта. Подогрев выполняется одним из способов:

- разогрев горячей водой;
- циркуляционным;
- гидромониторным.

1.3.1 Разогрев горячей водой

При разогреве горячей водой или паром на остаток нефтепродукта наливают горячую воду (80-85 °С) на высоту, равную высоте остатка нефтепродукта. Для интенсификации разогрева подают острый пар непосредственно в нефтепродукт. При возможности секционного включения штатного поверхностного подогревателя вводят в работу и секции, находящиеся под слоем разогреваемой массы (вода + нефтепродукт). Пар подается по паровым трубам (рукавам) диаметром 50-63 мм. Давление пара в магистрали должно быть не более 3 кгс/см². Температура подаваемого пара не должна превышать значения, равного 80% от температуры самовоспламенения нефтепродукта. Продолжительность подогрева в зависимости от количества остатка составляет 18-24 часа в летний период и 30-32

часа в зимний. Разогретый остаток совместно с водой откачивается в разделочный резервуар или в сборник каскадного отстойника, или в выделенную емкость.

1.3.2 Циркуляционный подогрев

В случае наличия в резервуаре циркуляционной системы подогрева (специальные трубы с насадками, теплообменник, насос циркуляционный) на остаток наливают горячий аналогично остатку нефтепродукт (температура на 15-20 °С ниже температуры вспышки его паров) и производят циркуляцию этой массы затопленными струями. Циркуляция производится по схеме "резервуар-насос-теплообменник-резервуар". Продолжительность процесса 10-15 часов в зависимости от количества остатка. Температура циркулирующего нефтепродукта, поступающего в резервуар, должна быть не ниже 45 °С.

В случае зачистки заглубленного или подземного резервуара возможно использование водного раствора ТМС, например ММ-5, ТЕМП-300 и др. На остаток нефтепродукта наливают раствор ММ-5 в количестве не менее 5-6 объемов остатка при температуре 50-55 °С. Проводится циркуляция раствора по схеме "резервуар-насос-теплообменник-резервуар". Продолжительность циркуляции 16-24 часа в зависимости от количества остатка и его физико-химических свойств. Образовавшаяся эмульсия откачивается в разделочный резервуар или другую емкость, где производится ее регенерация.

1.3.3 Гидромониторный способ

При гидромониторном способе нефтепродукт разжижается и смывается с днища струей горячей воды под давлением. Вода подается насосом на моечные машинки (гидромониторы). Напор воды на насосе 10-12 кгс/см²; температура воды 75-80 °С. Моечные машинки заводят в резервуар через люки на кровле резервуара или через нижний люк-лаз (установка МБ-3). Машинки закрепляются на водоподводящих рукавах и опускаются на страховочных канатах на высоту 3-4 м от днища резервуара. Учитывая большую поверхность днища резервуара, операция разжижения остатка повторяется через другие горловины или рукава с машинками оттягиваются от центра их установки на 3-4 м. Оттяжку рукавов производят

пеньковым канатом, закрепленным одним концом за рукав выше машинки, второй конец закрепляют за конструкции в резервуаре, расположенные на днище или стенке. Эта операция выполняется только после полной остановки подачи воды на моечные машинки и выкачки разжиженной части остатка нефтепродукта из резервуара. Выкачка разжиженной подвижной массы производится постоянно при работе моечных машинок и продолжается в течение 30-60 минут по окончании подачи воды. Продолжительность разжижения зависит от количества остатка, его характеристик и может колебаться от 2-3 до 5-8 часов непрерывной работы моечных машинок. Выкачка разжиженной массы (вода + нефтепродукт) производится в разделочный резервуар или в каскадный отстойник, или в приспособленную емкость.

Таким образом, все вышеописанные способы являются неэкологичными, поскольку требуют использования воды. Кроме того, дальнейшая переработка водонефтяных эмульсий, полученных в ходе очистки резервуара от остатков нефтепродуктов, требует дополнительных затрат и производственных мощностей.

1.4 Погружные нагреватели для подогрева нефти внутри резервуаров

При хранении высоковязких и застывающих нефтепродуктов должен быть предусмотрен их подогрев [108]. Влияние температуры нефтяной среды при концентрации асфальтенов в диапазоне 7 – 35 г/л приводит к изменению размеров основных коллоидных частиц (рисунок 1) [118].

Погружные взрывозащищенные нагреватели применяются для разогрева и поддержания температуры нефтепродуктов и других жидких и вязких сред в открытых, закрытых, подземных, наземных и надземных резервуарах, находящихся во взрывоопасных зонах, как на открытых площадках, так и в помещениях. В подземных ёмкостях невозможна установка и обслуживание врезных нагревателей, поэтому применение погружных нагревателей остается единственным способом произвести нагрев рабочей среды. Кроме того, погружные нагреватели используются при местном разогреве застывших нефтепродуктов для увеличения их текучести и последующего слива. Конструкция представляет собой

сварной корпус с оболочками керамических электронагревателей (рисунок 2) [77].
Удельная поверхностная мощность таких нагревателей до 15 Вт/см².

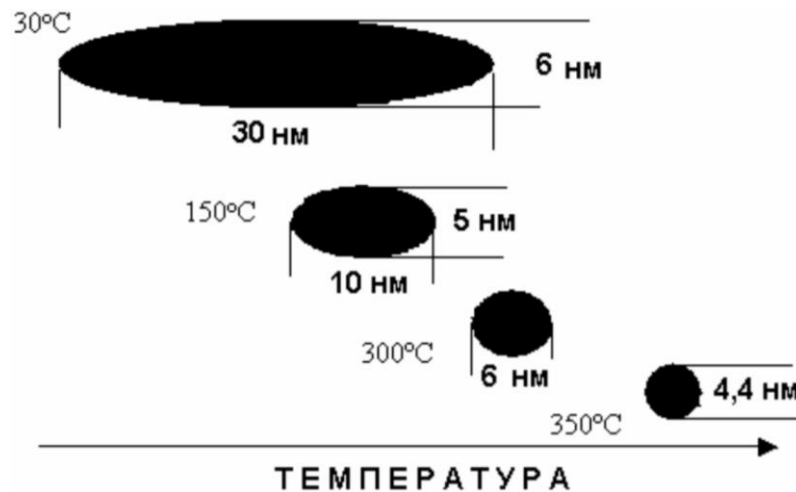


Рисунок 1 – Изменение размеров коллоидных частиц асфальтенов при изменении температуры нефтяной среды

Использование погружных электрических нагревателей для обогрева резервуаров обладает рядом преимуществ по сравнению с нагревательным кабелем. В частности [28]:

- ниже стоимость оборудования на единицу выделяемой тепловой энергии за счет более высокого удельного тепловыделения с поверхности нагревательных элементов электронагревателей;

- стоимость монтажных работ по установке электронагревателя на резервуар в десятки раз ниже по сравнению с системами на основе нагревательных кабелей, т.к. нет необходимости строительства дорогостоящих монтажных лесов и стропильных систем. Кроме того, не требуется проведение каких-либо сварочных работ непосредственно на объекте, соответственно не требуется привлечение большого количества персонала и других дорогостоящих квалифицированных специалистов, что особенно актуально для удаленных северных районов;

- разница в стоимости обогрева увеличивается в пользу электронагревателей при необходимости разогрева продукта в относительно больших резервуарах.



Рисунок 2 – Погружной взрывозащищенный электронагреватель

Несмотря на то что имеется довольно обширный ряд стандартных моделей взрывозащищенных погружных нагревателей под различные технические задачи, они имеют ограниченные технические возможности. Основным недостатком таких конструкций является то, что процесс передачи теплоты реализуется посредством теплопроводности. В частности, нефтяные среды обладают низким коэффициентом теплопроводности, что приводит к длительному процессу выхода на стационарный режим теплообмена. В ряде случаев при значительной массе нагреваемой среды и отдаленности нагревателя от границы раздела фаз погружные электронагреватели не обеспечат необходимый температурный режим.

1.5 Методы и устройства для предотвращения образования и накопления асфальтосмолопарафиновых отложений

Одним из главных факторов, влияющих на процесс образования АСПО, является понижение температуры перекачки нефти [41]. Если температура понижается до значений, при которых начинается кристаллизация парафиновых углеводородов [111], входящих в состав нефти, происходит уплотнение нефти, образуются АСПО в резервуарах, повышается вязкость. Если количество кристаллов парафина становится значительным или имеются другие материалы,

например, асфальтены, то кристаллы могут превращаться в более крупные частицы, затем выделяться из жидкости и образовывать твердые отложения.

При эксплуатации резервуаров на образование АСПО очень сильно влияет режим работы резервуарного парка, скорость течения жидкости. Основной задачей при эксплуатации резервуарного парка является постоянное вовлечение резервуаров в товарно-коммерческие операции и недопущение отстоя нефти в течение длительного времени. В работе [55] исследовалось влияние на образование АСПО в резервуарах объемом 1000 м³ на протяжении 5 суток при изменении температуры нефти от 15,3 до 10,7 °С и воздуха от 8,2 до -2,1 °С. Результаты исследований показали, что требуется больший срок для оседания кристаллов парафина и образования АСПО.

В результате влияния на процесс накопления донных отложений движения поступающей через приемо-раздаточные патрубки (ПРП) нефти появляются зоны максимальных и минимальных отложений [1 - 3]. В зависимости от скорости входящей через ПРП нефти (1...2 м/с) зоны минимальных отложений составляют (при закачке через один патрубок) в резервуаре РВС-20000 от 1,1 до 4,3 % площади днища резервуара (рисунок 3) [101; 102].

Для уменьшения образования и накопления парафиновых отложений в резервуарах применяются различные методы и устройства, основанные на гидродинамическом, гидромеханическом, тепловом, химическом, ультразвуковом и комбинированном воздействиях. Наибольшее распространение получили гидромеханические и гидродинамические системы: электромеханические винтовые мешалки и сопла или струйные гидравлические смесители с гидромониторными головками.

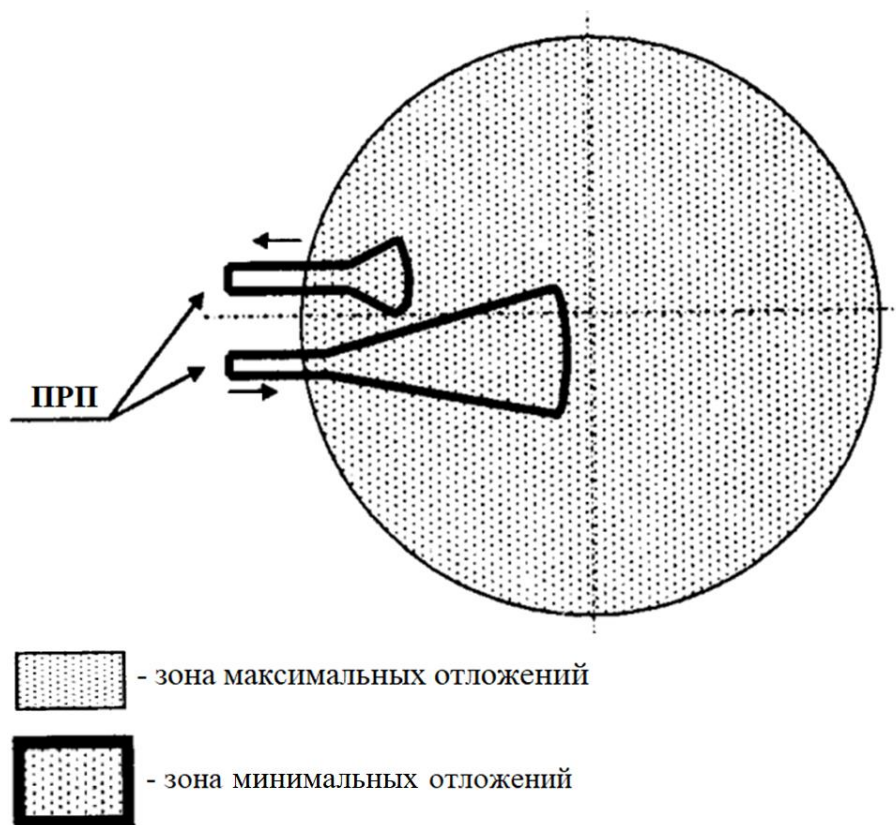


Рисунок 3 – Зона распределения АСПО на днище нефтяного резервуара типа РВС

1.5.1 Размыв донных отложений в резервуарах с помощью мешалок типа НХ

Мешалки предназначены для перемешивания сырья (нефть и др.), нефтепродуктов и нефтехимических жидкостей в вертикальных цилиндрических резервуарах и емкостях на нефтеперерабатывающих, нефтехимических, нефтедобывающих предприятиях, резервуарных складах, заводах по производству битума и т. п. (рисунок 4).

Мешалки устанавливаются на люк первого пояса резервуара. Вал мешалки располагается параллельно днищу резервуара. Под воздействием затопленной струи от пропеллера продукт в резервуаре интенсивно перемешивается, имеющиеся донные отложения размываются. При повороте выходного вала мешалки с пропеллером на угол до 30° от нейтрального положения всему продукту в резервуаре придается вращательное движение, что позволяет выровнять характеристики продукта по всему объему резервуара. Для получения

однородности характеристик продукта в резервуарах больших объемов (5000 м³ и выше) направление вращения продукта в резервуаре может меняться на противоположное путем поворота выходного вала мешалки в шаровой опоре.



Рисунок 4 – Мешалка серии НХ 63.00.000

1.5.2 Размыв донных отложений в резервуарах с виброструйной магнитной активацией (ВСМА)

Исследователями из института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук разработана комплексная физико-химическая технология разжижения и утилизации нефтешламов и снижения вязкости парафинистых нефтей (рисунок 5).

Технология и оборудование виброструйной магнитной активации жидких сред предназначены для активации неньютоновских жидкостей и растворов (нефть, нефтепродукты, водонефтяные эмульсии и т. п.) с целью снижения эффективной вязкости, повышения текучести и однородности обрабатываемых растворов. Такая технология осуществляется электромагнитными резонансно-колебательными устройствами модульного типа.

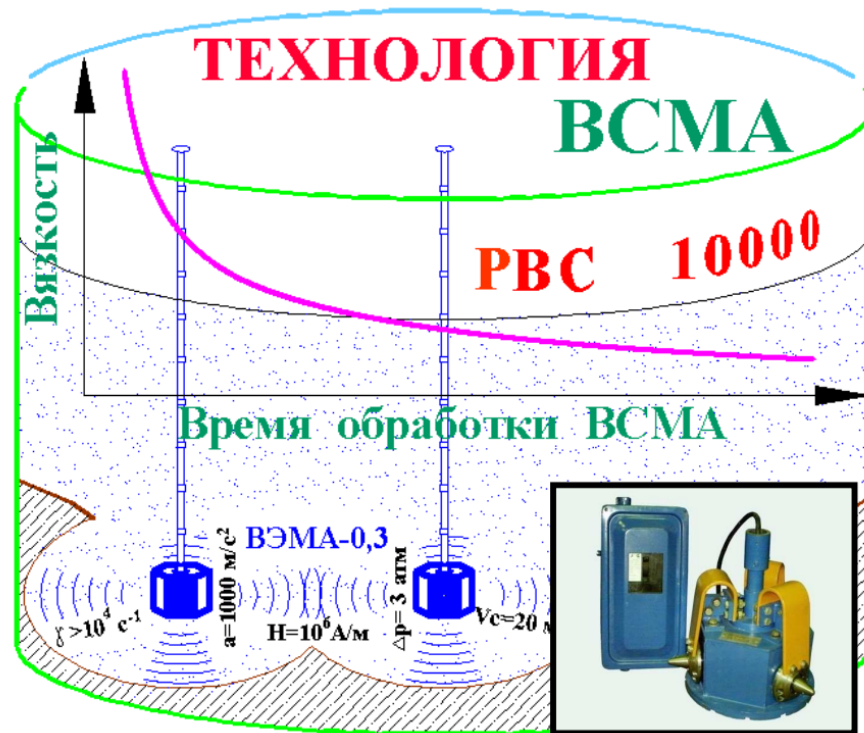


Рисунок 5 – Схема виброструйной магнитной активации

Разжижение высоковязких донных осадков происходит в результате комплексного воздействия на нефтепродукты мощного омагничивания, интенсивного перемешивания и акустического воздействия. Преимущество данного способа заключается в низкой энергоемкости; установка малогабаритна, мобильна, эффективна в работе. Технология ВСМА обеспечивает диспергацию дисперсных составов на микронном уровне, разрушение устойчивых надмолекулярных структур различных жидких систем, интенсификацию массообменных процессов. Она реализуется устройствами ВСМА модульного типа, распределяемыми по всему объему обрабатываемой жидкой среды. Регулирование параметров электрической сети питания устройства ВСМА позволяет изменять уровень физического воздействия в широких пределах. Технология ВСМА также обеспечивает существенное повышение эффективности применения различных химических добавок-реагентов. Многими экспериментами доказана высокая эффективность этой технологии для подготовки высоковязких парафинистых нефтей к транспортировке. Эффективность снижения вязкости после вибрационной обработки (ВО) зависит от типа нефти. Вязкость

парафинистых нефтей с содержанием твердых парафинов до 8 % мас. после ВО снижается в 6-7 раз, высокопарафинистых нефтей с содержанием парафинов выше 8 % мас. и малопарафинистых нефтей с содержанием смол выше 5 % мас. - в 3-4 раза.

Авторы [88] отдельно отмечают, что энергоемкость всего процесса в значительной степени определяется способом передачи энергии от источника энергии физических полей в среду.

1.5.3 Предупреждение и удаление донных отложений с применением ингибиторов

Ингибитор асфальтосмолистых отложений ЮКСОН-А представляет собой смесь поверхностно-активных веществ (ПАВ) на основе высших жирных кислот в органическом растворителе.

Эффективность реагента ЮКСОН-А была предварительно определена на лабораторной установке с использованием метода "холодного стержня" [4; 102]. После лабораторных испытаний ингибитор был рекомендован к опытно-промышленным испытаниям на запа-рафинирующихся скважинах и в нефтяных резервуарах. В результате закачки реагента в затрубное пространство скважин в течение полугода не отмечено ни одного случая значительного отложения парафина, послужившего причиной ремонта или снижения производительности скважин при ранее существующей периодичности тепловых обработок без применения ингибитора от 1 до 3 раз в месяц.

1.5.4 Удаление донных отложений с применением акустических излучений

Акустические способы борьбы с отложениями представлены вибрационными методами, используемыми на практике как для предотвращения, так и для удаления АСПО; они позволяют создавать высокочастотные (ультразвуковые) и низкочастотные колебания в области парафинообразования, которые, воздействуя на кристаллы парафина, вызывают их микроперемещение, что препятствует осаждению парафина на стенках труб [47]

1.5.5 Размыв донных отложений в резервуарах с помощью системы веерных сопел

В резервуарах типа РВС применяется система размыва донных отложений типа СПВК. Она предназначена для размыва уплотненного и предотвращения накопления рыхлого парафинистого осадка на днищах нефтяных резервуаров в процессе их эксплуатации.

Система СПВК — стационарное изделие, смонтированное в резервуаре, состоящее из группы гидромеханических размывающих устройств с автоматически меняющейся высотой щели пригруженных веерных кольцевых сопел типа СПВК-100М, определенным образом размещенных на днище резервуара, обвязывающих их трубопроводов, трубопроводной арматуры.

Система осуществляет размыв и предотвращение накопления парафинистого осадка за счет кинетической энергии нефти, подаваемой в резервуар через систему насосным агрегатом. Нефть, выходя из размывающих устройств — пригруженных веерных сопел в виде веерных затопленных струй, распространяется по днищу, смывает донный осадок и переводит его во взвешенное состояние в массе нефти. Взвесь осадка, вовлекаясь в товарную нефть, вместе с ней удаляется из резервуара.

Размыв донных отложений в резервуаре с использованием стационарной системы, состоящей из трубной разводки и размывающих сопел, производится двумя способами: отдельным или совмещенным.

Продолжительность размыва зависит от высоты донных отложений (объема). Параметры системы размыва приведены в таблице 4.

В 1960-х гг. НИИТранснефть начал проектирование системы предотвращения накопления осадка на днищах резервуаров, названной размывающей головкой с постоянной высотой щели. Веерная струя, выходящая из сопла, смывает парафиновый осадок с днища и распределяет его в нефти. Промышленные испытания система прошла в 1962 г. и с тех пор активно применялась до изобретения В.П. Свиридовым, Г.Э. Лерке и др. в 1970 г. пригруженных веерных сопел с автоматическим изменением высоты щели в

зависимости от расхода закачиваемой нефти. В целом веерные сопла представляли собой усовершенствованные размывающие головки (рисунок 6).

Таблица 4 - Параметры системы размыва

Основные показатели		Резервуары РВС, м ³			
		5000	10000	20000	50000
Расход (производительность закачки) нефти через систему, м ³ /ч		200... 500	500... 1250	1000... 2500	2000... 5000
Минимальная продолжительность размыва осадка (рекомендуемая), ч	Уровень осадка, м	Размыв парафинистого осадка, ч			
	0,1	5	3,5	4	4
	0,5	16	7	15	10
	1	54	25	48	33
	более 1	60	30	55	35
Минимальное значение уровня нефти перед началом заполнения резервуара через систему размыва, м	резервуары со стационарной крышей	2	2	2	2
	резервуары с понтоном или плавающей крышей	3	3	3	3



Рисунок 6 – Сопло веерное кольцевое

Из-за недостатков, таких как засорение и коррозия сопел, конструктивные недоработки системы (всплытие, боковое смещение с опорных стоек и разрушение трубопроводов), недостаточная эффективность размывающей струи, системы с размывающими головками начали заменять электромеханическими мешалками [78].

1.5.6 Размыв донных отложений в резервуарах электромеханическими мешалками

Самыми распространенными и широко применяемыми устройствами для предотвращения образования придонных отложений являются электромеханические винтовые мешалки различных конструкций. Наибольшее распространение получили следующие устройства: «Диоген» (рисунок 7, а), «Jensen 620VA 25/29» (США) (рисунок 7, б), «Plenty 28P–8TM25» (США) (рисунок 7, в), мешалки, разработанные ГРЦ «КБ им. академика В.П. Макеева» (рисунок 7, г) «Тайфун» (Россия) (рисунок 7, д).

В [101; 102] приводятся данные по работе систем размыва донных отложений, полученные по результатам по эксплуатации 153 резервуаров. В таблице 5 представлены характеристики застойных зон.

Из таблицы видно, что даже совместное использование систем размыва не решает проблему образования донных отложений. Также отмечается, что применение электромеханических мешалок на предприятиях топливно-энергетического комплекса России выявило следующие недостатки [42]:

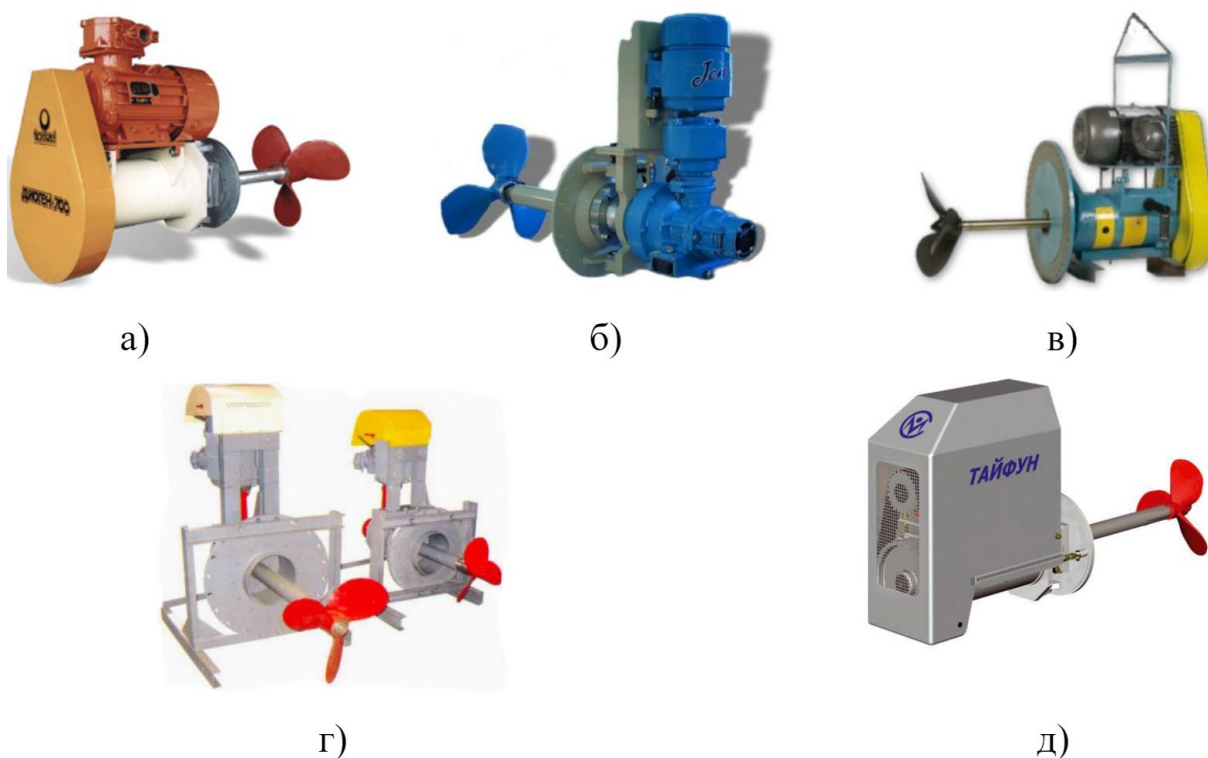


Рисунок 7 – Устройства для размыва донных отложений

Таблица 5 – Характеристика застойных зон

Наименование систем размыва	Уровень донных отложений в застойных зонах, мм	Доля застойных зон от общей площади днища резервуара, %	Расположение застойных зон
Система пригруженных веерных сопел типа СПВК	700...800	30...40	Возле стенки резервуара, трубопроводов СПВК
Устройство "Диоген"	600...700	20... 30	Возле стенки и в центре резервуара
Система типа СПВК и устройство "Диоген"	400...500	20...30	Возле стенки и в центре резервуара

- происходит расцентровка вала из-за касания донных отложений пропеллером, вследствие чего возникает вибрация стенки резервуара, которая может привести к его разрушению;
- эффективность размыва осадка мала из-за большого коэффициента турбулентности создаваемой струи, уменьшающего дальность струи.

1.6 Обзор современных методов очистки резервуаров

Требования технической документации, регламентирующей зачистку резервуаров при выполнении указанных работ, накладывают ряд ограничений на технологические процессы:

- при выполнении работ ПАВ не должны ухудшать показатели качества нефти, регламентируемые ГОСТ Р 51858 [24];
- отделение нефти от воды осуществляется с помощью сепаратора или емкости отстойника, с последующей закачкой нефти в действующий резервуар или технологический трубопровод и сбросом воды в систему промышленной канализации.

Очистка нефтяных резервуаров подразумевает под собой обширный комплекс работ, направленный на увеличение эффективности удаления АСПО, обеспечение безопасности проводимых работ и сохранение экологичности

эксплуатации резервуаров. Технологический процесс очистки включает в себя следующие этапы работ [57]:

- откачку нефти из резервуара до уровня, необходимого для работы размывающих головок, и размыва донных отложений с помощью стационарных размывающих головок при их наличии;
- предварительную дегазацию резервуара путем принудительной вентиляции до снижения концентрации паров нефти ниже ПДВК и монтаж моечного оборудования;
- мойку поверхностей стенки и дна резервуара струями нефти через моечные машинки при одновременном контроле степени насыщения газового пространства углеводородами и величины зарядов статического электричества;
- откачку насосом растворенных и диспергированных отложений вместе с промывочной нефтью в специальный резервуар (или в нефтепровод);
- мойку резервуара струей воды или водных растворов моющих веществ, подаваемых через моечные машинки;
- дегазацию резервуара путем сорбции и (или) принудительной вентиляции и (или) аэрации;
- контроль степени очистки внутренних поверхностей резервуара после очистки и дегазации [103].

На практике наиболее распространены электромеханические мешалки с применением гидравлического метода удаления и предотвращения образования донных отложений в резервуарах РВС.

В работе [56] описаны недостатки существующих наиболее распространенных электромеханических мешалок при использовании гидравлического метода удаления и предотвращения образования донных отложений в резервуарах с нефтью и нефтепродуктами. В данной работе авторы пришли к выводу, что проведение очистки с применением нефтепродукта, находящегося в резервуаре, без применения дополнительных устройств,

потребляющих дополнительную электроэнергию, позволяет снизить общую энергоемкость процесса размыва отложений.

В настоящее время существует большое количество способов очистки резервуаров от донных отложений нефти и нефтепродуктов. Рассмотрим наиболее распространенные из них [95]:

- ручной;
- биологический;
- акустический;
- тепловой;
- химический;
- с помощью специализированных комплексов.

1.6.1 Ручной метод

Ручной способ очистки резервуаров и емкостей представляет собой механическое удаление твердых остатков с помощью лопаток и скребков, изготовленных из цветных металлов или неметаллических материалов. С их помощью снимается слой осадка с внутренних поверхностей резервуара. Затем стенки и днище резервуара промывают горячей водой, непрерывно сливая образующуюся смесь воды и частичек нефтепродуктов.

По прошествии времени в резервуар добавляют чистую воду до тех пор, пока с поверхности воды не будет удален слой нефтепродуктов. После этого резервуар проветривается. Окончательным этапом ручного метода очистки является зачистка резервуара с использованием сухих деревянных опилок или мешковины, которые затем удаляются и утилизируются. Для зачистки резервуара при данном методе также применяют пар. В этом случае после удаления осадка на резервуаре полностью закрывают все люки и задвижки и непрерывно в течение двух-трех часов подают в него пар. Затем его также проветривают и протирают.

Данный метод очистки имеет ряд существенных недостатков. При использовании ручного метода очистки существует большой риск для здоровья и безопасности людей, выполняющих эту работу, поскольку воздействие

углеводородов отрицательно сказывается на здоровье человека и способно вызвать ряд тяжелых заболеваний, в том числе и онкологических. Также стоит отметить, что при ручном способе очистки происходит загрязнение почвы, воздушного и водного бассейнов.

1.6.2 Биологический метод

Биотехнологический метод очистки резервуаров для хранения нефти заключается во введении биомассы определенной структуры в очищаемую емкость [135]. Как правило, биомасса представляет собой раствор активного ила, имеющего анаэробное происхождение и соотношение между основными компонентами углерод/фосфор/азот равное 25/1/1. Этот раствор вводится в резервуар, в котором под действием его активных компонентов происходит разрушение структуры нефтяного осадка и его последующий дренаж в специальные емкости.

Данный метод позволяет провести полную очистку емкостей от остатков нефти или нефтепродуктов без образования взрывоопасных смесей газов.

Недостаток биологического метода состоит в необходимости специализированного производства бактериальных структур, что является очень дорогостоящим и сложным процессом.

1.6.3 Акустический метод

Акустический метод очистки нефтяных резервуаров предполагает воздействие на придонный осадок мощным акустическим полем, которое создается специальной аппаратурой. В качестве источника применяют электромагнитный активационный вибратор.

Данная установка применяется в химической, нефте- и газодобывающей, а также нефтехимической отраслях промышленности. Она обеспечивает эффективную обработку за счет диспергирования и снижения вязкости различных жидкостей и смесей.

1.6.4 Тепловой метод

Сущность теплового метода заключается в подогреве нефти до температуры, при которой происходит расплавление АСПО отложений. Это происходит благодаря циркуляции небольшого объема нефти или специального растворителя по системе «резервуар-теплообменник-резервуар».

Данный метод имеет некоторые недостатки, а именно:

- при увеличении температуры нефти в резервуаре происходит испарение легких фракций нефти;
- после охлаждения нагретой нефти в трубопроводе может наблюдаться отложение парафина внутри трубопровода;
- ввиду низкого коэффициента теплопроводности нагреваемой среды, процесс нагрева занимает длительное время.

1.6.5 Химический метод

Химический метод основывается на использовании химических реагентов, которые вводятся в нефть в небольших количествах. Данный способ получил широкое распространение за рубежом, однако, в России эта технология не применяется в чистом виде из-за дороговизны химических реагентов.

Как правило, химический метод совмещается с другими методами, например, тепловым или гидравлическим. Химико-гидравлический способ осуществляется с помощью химических реагентов, которые подаются в гидравлическое устройство, а оно, в свою очередь, подает их под высоким давлением в очищаемую емкость.

Химико-тепловой способ заключается в использовании химических реагентов совместно с подогревом парафинистых и асфальтовых отложений в резервуаре толщиной до 1 метра.

1.6.6 Очистка с применением специализированных комплексов

В настоящее время наиболее эффективным способом очистки резервуаров от нефтешламов является механизированный метод очистки с применением

специализированных мобильных комплексов как российского, так и зарубежного производства. Наиболее распространенными из них является.

- Мобильный комплекс МКО-1000
- Система Vlabo
- Комплекс МегаМАКС
- Комплекс Техноспас
- Комплекс КОР-1М

1.6.6.1 Мобильный комплекс МКО-1000

Мобильный комплекс очистки резервуаров от углеводородных соединений (УВС) (нефтепродуктов) МКО-1000 основан на технологии замкнутого цикла использования технического моющего средства (ТМС), образующего неустойчивую эмульсию с УВС.

Комплекс МКО-1000 предназначен для очистки резервуаров как от светлых нефтепродуктов, таких как керосин, бензин, дизельное топливо и т.д., так и от высоковязких темных нефтепродуктов – битумов, мазутов, гудронов, – имеющих большое содержание в своем составе парафинов, которые усложняют процессы очистки.

Сущность технологии заключается в регенерации моющего раствора путем фазового разделения эмульсии на УВС и водный раствор ТМС.

Мобильные комплексы МКО-1000 являются на сегодняшний день наиболее распространенными установками российского производства [83].

Откачка и фильтрация нефтепродуктов из резервуара производится непосредственно на месте проведения работ с использованием комплекса МКО-1000. Продукт перекачивается в ёмкости, предоставляемые заказчиком, или подлежат утилизации на полигоне.

Отличительной и принципиальной особенностью этого способа очистки (мойки) резервуаров хранения нефтепродуктов является использование водного раствора новых ТМС, которые отделяют УВС от поверхности и создают с ними неустойчивую эмульсию, не вступая в химическую реакцию.

Комплекс энергозависим: требует подключения электроэнергии, а при работе в холодное время или на тяжелых донных осадках нагрева моющего средства. Поставляется в комплекте с моющими головками, создающими моющую «сферу» диаметром до 24 метров.

Плюсы технологии:

- низкая стоимость комплекса;
- возможность установки контейнеров на шасси контейнеровоза;
- полностью российские комплектующие.

Минусы технологии:

- гидроциклоны и гравитация не в состоянии качественно разделить выбираемые донные остатки и обеспечить качественное отделение нефтепродуктов;
- установка энергозависима;
- перекачивающие насосы не в состоянии полностью «поднять» все остатки шлама со дна резервуара, поэтому очистка резервуаров
- требует дополнительного ручного труда.

1.6.6.2 Система Vlavo

Система Vlavo – полностью автоматизированная система зачистки нефтяных резервуаров и переработки нефтесодержащих отходов, при использовании которой не требуется присутствие персонала внутри самой емкости. Система является мобильной и модульной. Она разработана специально для зачистки большеобъемных наземных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Система Vlavo одинаково подходит для работы с резервуарами, оснащёнными плавающей или фиксированной крышей, объемом до 200 000 м³. Она может быть также использована в резервуарах, содержащих сырую нефть, тяжелую топливную нефть, остатки каталитического крекинга, дренажную нефть и т.п.

Зачистка резервуаров и переработка нефтесодержащих отходов производятся одновременно.

Система Vlabo представляет собой мобильную технологическую установку блочно-модульного типа, смонтированную в стандартных двадцатифутовых контейнерах, что обеспечивает удобство её транспортировки.

Применение данной системы приводит к сокращению времени очистки резервуара, а соответственно и времени его простоя на 60-80%. Высокая мобильность комплексной системы и возможность очистки резервуаров различных типов позволяет применять комплекс в различных условиях.

Отсутствие необходимости нахождения персонала внутри резервуара в процессе зачистки позволяет минимизировать риски для здоровья и безопасности персонала.

Комплекс разработан в соответствии с требованиями безопасности и защитой окружающей среды, что даёт возможность минимизировать отходы от очистки, а также выбросы газов в атмосферу.

Преимущества:

- высокое качество очистки резервуаров;
- высокое качество очистки углеводородов, воды и мехпримесей.

Недостатки:

- сложный монтаж с необходимостью прорезания отверстий в крыше резервуара;
- энергозависимость;
- очень высокая стоимость [2].

1.6.6.3 Комплекс МегаМАКС

Комплекс МегаМАКС является мобильной системой очистки резервуаров с одновременной утилизацией нефтепродуктов.

МегаМАКС предназначен для разжижения, извлечения, предварительного и полного фазоразделения донных отложений. МегаМАКС включает все необходимые для выполнения этой задачи технологические блоки и способен также обеспечить энергией различное вспомогательное оборудование, используемое в очистных работах.

Шлам на установках МегаМАКС разделяется в несколько этапов. Сначала откачиваемый шлам проходит через вибросепаратор, специально сконструированный для данной установки. Далее очистка резервуаров предполагает поступление шлама в специальную емкость, где тяжелые механические примеси оседают на дне и выводятся с помощью специальных шнеков, а углеводородная пленка собирается скиммером. Неразделенная эмульсия воды и шлама подается далее на 3-фазную декантерную центрифугу, где происходит отделение воды.

Для финишной сборки шламовой пленки установка обеспечена вакуумным агрегатом производительностью более 2000 м³ воздуха в час, позволяющей эффективно чистить дно резервуара. В комплект установки входит минитрактор для сбора особо тяжелых шламов со дна резервуара без применения ручного труда.

Преимущества:

- высокое качество очистки резервуаров;
- высокое качество очистки углеводородов, воды и мехпримесей;
- полная энергонезависимость;
- самые короткие сроки развертывания/свертывания и отмывки резервуара.

Недостатки: высокая стоимость.

1.6.6.4 Комплекс Техноспас

Данный комплекс является ближайшим российским аналогом комплекса МКО-1000 и имеет аналогичный принцип очистки резервуаров. Комплекс представляет собой контейнеры, внутри которых располагается всё необходимое оборудование. Основным отличием данного комплекса от его аналога является дополнительная комплектация приборами газового контроля, предназначенными для предотвращения возникновения воспламенения или взрыва в процессе очистки, связанных с поступлением паров нефти в резервуар, а также устройств принудительной вентиляции и дегазации.

В комплект к основному оборудованию комплекса входят дополнительные комплектующие: мембранные насосы, шанцевые инструменты, а также установки дополнительного нагрева моющей смеси.

Преимущества:

- низкая стоимость;
- мобильность комплекса, которая достигается за счет установки контейнеров на шасси как зарубежных, так и отечественных контейнеровозов;
- наиболее тщательная очистка по сравнению с комплексом МКО-1000, достигаемая за счет нагрева ТМС.

Недостатки:

- энергозависимость;
- необходимость дополнительной доочистки с использованием ручного труда.

1.6.6.5 Комплекс КОР-1М

Комплекс КОР-1М предназначен для проведения работ по очистке резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов от донного осадка и углеводородной пленки при подготовке резервуаров к ремонту или проведению текущего обслуживания.

Комплекс состоит из двух основных модулей: модуль, который включает насосное и вакуумное оборудование, технологические емкости, теплообменники, а также устройства для струйного воздействия на разжижаемую среду, и автоматизированная модульная котельная, предназначенная для нагревания моющего раствора перед подачей его в резервуар.

Преимущества:

- сокращение времени проведения очистки;
- отсутствие химического взаимодействия рабочего раствора с нефтепродуктами и материалами конструкций;
- минимизация ручного труда;

- отсутствие отходов;
- экологическая и пожаровзрывобезопасность;
- полное извлечение нефтепродуктов с сохранением их качества.

Недостатки:

- установка не может эффективно проводить очистку резервуаров от высоковязких нефтей и темных нефтепродуктов;
- несмотря на сокращение применения ручного труда, данный комплекс не исключает проведение ручной доочистки.

1.7 Влияние СВЧ на нефтяные дисперсные системы

Развивающаяся теория нефтяной дисперсной системы, понимаемой на молекулярном и надмолекулярном уровнях, как многокомпонентная среда, в ряде случаев позволяет прогнозировать такие макроскопические свойства как вязкость и температура застывания. В частности в [110] в качестве наиболее эффективного воздействия выбрано СВЧ ЭМ поле, а в [7] ультразвуковая обработка. Оба типа воздействия относятся к волновому типу. В [12] отмечено, что, в целом, волновые колебания имеют явные преимущества и наибольшую целесообразность перед другими методами, направленными на улучшение реологии нефтяных флюидов.

Понимание физических процессов взаимодействия электромагнитных полей с многофазными системами значительно продвинулось благодаря работам, например, [92–94; 106]. Физические основы взаимодействия ВЧ ЭМ полей с нефтегазовыми системами подробно описаны в [114]. В зависимости от расположения зарядов молекулы диэлектрической среды могут быть полярными и неполярными [26]. В некоторых молекулах расположение зарядов столь симметрично, что в отсутствии внешнего электрического поля их электрический дипольный момент равен нулю. Полярные молекулы обладают некоторым электрическим дипольным моментом и в отсутствии внешнего поля [8]. При наложении внешнего электрического поля неполярные молекулы поляризуются, то есть возникает дипольный момент.

Использование микроволнового излучения для запуска химических реакций стало применимым практически во всех областях химии [123]. Это обосновывается главным образом возможностью быстрого и удобного нагрева, что приводит к значительно более высоким скоростям реакции, а также имеет другие преимущества, например селективный нагрев компонентов продукта и контроль свойств материалов.

Микроволновый нагрев продолжает развиваться как передовая технология, однако фундаментальные исследования его природы микроволнового нагрева не успевают за развитием технологий [123]. В случае химических реакций, протекающих в гомогенном растворе, особенно синтетических органических реакциях, существует значительное противоречие относительно причин повышения скорости, при этом основной вопрос заключается в том, существуют ли специфические для микроволнового излучения эффекты, отличные от тех, что могут быть достигнуты при обычном конвективном нагреве.

При изучении феномена влияния электромагнитного поля на химические реакции возникает вопрос: является ли результатом воздействия ЭМ волн на среду только её нагрев (реакции протекают по термокинетическим законам) или имеют место «не тепловые процессы»?

Микроволновое излучение - это ЭМ излучение в диапазоне частот от 0,3 до 300 ГГц. Все бытовые «кухонные» микроволновые печи и все микроволновые реакторы для химического синтеза работают на частоте 2,45 ГГц (что соответствует длине волны 12,24 см), чтобы избежать помех на частотах телекоммуникаций и сотовых телефонов. Энергия микроволнового фотона в этой области частот (0,0016 эВ) слишком мала, чтобы разорвать химические связи, а также меньше энергии броуновского движения. Отсюда следует, что микроволны, как таковые, не должны вызывать химические реакции [130].

Однако в большом количестве публикаций, например [119; 120; 122; 125; 130; 132] показано, что микроволновое поле имеет значительное влияние на протекание химических реакций.

В [131] обосновывается, что «не тепловой эффект», как таковой, не существует, а является результатом одного или нескольких факторов процесса специфического нагрева, а именно:

- влияние эффекта перегрева растворителей при атмосферном давлении;
- избирательное нагревание, например, сильно поглощающих микроволновое излучение гетерогенных катализаторов или реагентов в менее полярной реакционной среде (и эффекты, возникающие в результате дифференциального / селективного нагрева двух- или многофазных систем жидкость / жидкость);
- формирование «молекулярных излучателей» путем прямой связи микроволновой энергии со специфическими реагентами в гомогенном растворе (микроскопические горячие точки);
- устранение стеночных эффектов, вызванных обратными градиентами температуры.

Парадигма селективного нагрева является распространенной и неоспоримой в гетерогенных системах, таких как гетерогенный катализатор, поглощающий микроволны, где катализатор можно избирательно нагревать до температур, намного превышающих температуру окружающей среды [123].

Микроволновое облучение, способствующее одновременной фрагментации и рекомбинации молекул, представляет собой потенциальную альтернативу дорогостоящему процессу десульфурации, который в настоящее время используется в промышленности [132]. В сочетании с соответствующим катализатором, сенсibilизатором и другими компонентами микроволновое облучение можно использовать для десульфурации и обогащения тяжелой кислой сырой нефти.

В [119] установлено, что эффективность экстракции *n*-алканов и ациклических изопреноидных углеводородов из нефтяной породы с помощью микроволновой экстракции ионной жидкостью зависит только от концентрации и от времени. Это делает метод очень надежным в отношении контроля этих параметров. Ионная жидкость также оказывает некоторое влияние на эффективность экстракции этих соединений. Сравнение результатов экстракции

ионной жидкости с помощью микроволнового излучения с результатами экстракции Сокслета и ускоренной экстракции растворителем показало, что эффективность экстракции ионной жидкости с помощью микроволн (MAILE) выше, чем существующие традиционные методы экстракции.

Среди альтернативных источников энергии микроволновое излучение занимает видное место, поскольку оно не только сокращает время реакции и увеличивает её эффективность, но также может позволить заменить многие органические растворители водой или создаст условия, при которых реакции могут протекать при отсутствии растворителей с максимальной эффективностью [120].

На основании вышесказанного можно заключить, что при определенных условиях уникальные нагревательные свойства микроволнового излучения создают динамику фазы раствора, которая не может быть описана исключительно с точки зрения современной физической органической теории, основанной на измеряемой температуре объемного раствора. Для химического синтеза эти отклонения от традиционного нагрева дают возможности повышения полезности микроволнового нагрева по сравнению с существующей практикой, что приведёт к снижению затрат энергии на реакции и процессы, и даже к идентификации новых режимов реакционной способности, уникальных для микроволнового нагрева.

1.8 Области применения ЭМ полей в нефтяном деле

ЭМ поля имеют широкую область применения в нефтяной промышленности. Существующие запатентованные способы и технологии использования ЭМ полей охватывают практически все этапы нефтяного производства [66–74].

В [38; 39; 99; 100] рассматривается проблема утилизации нефтешламов. Приведено физическое обоснование возможности применения ЭМ полей высокой частоты для утилизации нефтешламов. Определена эффективность стратификации нефтешлама в ЭМ поле относительно традиционных методов утилизации. Описана ЭМ технология утилизации нефтешламов.

Отдельный интерес представляет изучение изменения теплоёмкости нефтяных сред после процесса нагрева СВЧ полем, так как СВЧ нагрев способствует дегазации легких фракций, что фактически означает изменение химического состава нагреваемой среды, а, следовательно, и её реологических и термодинамических характеристик [127].

СВЧ технологии в нефтегазовом деле можно отнести к так называемым «зеленым технологиям». Экологичность таких процессов основывается на возможности разделения водонефтяных эмульсий без использования реагентов, а также без сжигания топлива для работы теплообменников.

В [59; 80] экспериментально исследовалось разрушение глобул водонефтяной эмульсии при воздействии СВЧ и ВЧ ЭМ полей. Эффективность применения СВЧ зависит от толщины бронирующей оболочки глобул. Наилучший положительный эффект достигнут в динамическом режиме, причем большая скорость потока приводит к большей коагуляции капель воды.

Совместное использование деэмульгаторов и непродолжительного воздействия СВЧ ЭМ поля даёт существенное увеличение отделения воды от эмульсии [16]. Эффективность различных деэмульгаторов варьируется для различных типов эмульсий и мощности СВЧ. Кроме того, концентрация воды существенно влияет на тангенс угла диэлектрических потерь водонефтяных эмульсий. Таким образом, подбор деэмульгатора должен быть сопряжен с анализом диэлектрических и реологических характеристик эмульсий [35].

В [133] показано, каким образом влияет СВЧ излучение на скорость движения взвешенной капли воды в нефти в зависимости от мощности воздействия. Под воздействием высокочастотного ЭМ поля в структуре водонефтяной эмульсии образуются агрегаты капель в виде цепочек, вытянутых вдоль направления силовых линий электрического поля [107].

В [37] определено время расслоения водонефтяной эмульсии в ЭМ поле.

В [52] представлена блок-схема комплексного термоэлектродинамического процесса с учетом динамики физико-химического состава водонефтяных эмульсий.

Там же показано, что эффективность деэмульсации снижается с увеличением рН среды.

Важнейшей областью применения СВЧ ЭМ поля является трубопроводный транспорт. В данной области ЭМ поля исследуются для изменения вязкости и расплавления асфальтопарафинистых отложений на стенках трубопроводов.

В [1] проведено моделирование процесса расплавления твердой пробки в трубопроводе. Показано, что благодаря неравномерности температуры в поперечном сечении разрушение пробки ЭМ полем может произойти до её полного растворения. Обоснован концепт «СВЧ скребка», способного иметь большую скорость прохождения по трубопроводу.

В ряде случаев невозможно или нецелесообразно использовать непрерывный режим работы генератора ЭМ поля. В [54] определено максимально допустимое время простоя генератора, позволяющее достигнуть полного проплавления пробки.

В [15] показано, что проплавление твердой пробки длиной 12 м в нефтепроводе диаметром 0,72 м может быть эффективно при использовании источника мощностью более 10 кВт.

В [136] исследовано изменение вязкости парафинистой нефти в СВЧ поле. Авторы полагают, что снижение вязкости вызвано разрушением возбужденных структурных образований в неньютоновской нефти.

Для районов Крайнего Севера авторами [53] предложена СВЧ-технология защиты трубопровода от закупорок при транспортировке вязких жидкостей. В основу положено введение в трубопровод компактного волновода в виде полосковой линии передач. Кроме того, такой подход может позволить контролировать температуру перекачиваемой жидкости.

Эффективность электротермического, также как и чисто термического, способа снижения вязкости в значительной степени зависит от температуры обработки [36] нефти. При повышении температуры до определенного значения асфальтены уже не в полной мере сольватируются смолами и адсорбируются на других коллоидных частицах, в том числе на микрокристаллах парафинов, образуя

прочные пространственные структуры. Однако, при более высокой температуре происходит расплавление парафинов, что делает невозможным вышеописанный процесс. Для образца нефти с содержанием асфальтенов 7,7% и парафинов 4,32% снижение критической температуры обработки при термонагреве и СВЧ-нагреве снижается с 60 °С до 50 °С [36].

В [14] описан эксперимент по СВЧ воздействию на нефть Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна. После 1 минуты СВЧ-обработки динамическая вязкость уменьшилась в 2,5 раза с 7258 мПа·с до 2936 мПа·с. При продолжительности воздействия 2 минуты вязкость уменьшилась на порядок: с 3623 мПа·с до 316 мПа·с.

Изменения микроструктуры нефти практически необратимы, и новые параметры остаются стабильными по меньшей мере около двух месяцев [85]. СВЧ воздействие приводит к разрыву молекулярных связей длинных алкановых цепей или ароматических фрагментов в надмолекулярных структурах, обусловленными пи-взаимодействиями [85]. Это ведет к увеличению содержания ароматических и алкановых молекул меньшей молекулярной массы в дисперсионной среде.

В железнодорожном транспорте углеводородов СВЧ энергетика нашла применение при разжижении для слива тяжелых нефтей. В [81] показано, что в зимнее время потери тепловой энергии, обусловленные теплообменом оболочки цистерны с окружающей средой, сокращаются с 30% до 10%.

Для решения задачи непрерывного контроля параметров объекта обработки может быть предложено применение СВЧ резонансных датчиков на основе направляющих структур с введенными периодическими неоднородностями, которые позволяют контролировать диэлектрическую проницаемость твердых и жидких сред [50].

В [115] описано применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке, а в [9] предложена согласованная краевая задача электродинамики, теплопроводности и гидравлики, позволяющая провести расчет рабочей камеры лучевого типа методической СВЧ электротермической установки, работающей в ламинарном режиме. Показан порядок расчета транспортного канала с учетом

изменения вязкости и скорости потока, определен порядок проектирования установки.

Проведены исследования, показывающие большую эффективность высокочастотного ЭМ метода нагрева нефти в трубопроводе по сравнению с резистивным методом в динамическом режиме [44]. На основе проведенных исследований разработан промышленный ВЧ ЭМ способ нагрева высоковязкой нефти в трубопроводах. Приведены результаты расчетов мощности промышленного генератора на основе материалов лабораторных исследований.

Известны результаты использования экологически чистого метода нагрева высоковязких нефтепродуктов в речных нефтеналивных судах [48]. Авторы утверждают, что при СВЧ нагреве (рабочая частота генератора, 915 ± 10 МГц) по отношению к разогреву паром время разогрева сокращается в 3-5 раз. Снижаются и энергетические затраты: при СВЧ нагреве битумов и гудронов - в десятки раз, а при нагреве мазутов и моторных масел - до пяти раз. Преимуществом предложенного метода является его экологическая чистота, позволяющая практически ликвидировать нефтяные остатки, которые появляются при использовании стандартных систем подогрева нефтегруза, и сократить выбросы паров в атмосферу.

Волновые методы интенсификации процессов в нефтехимии играют важнейшую роль. В [31] СВЧ ЭМ поле описывается как катализатор радиационно-волнового крекинга, позволяющий деструктурировать нефть с получением светлых фракций бензина и керосина.

В [79] экспериментально установлено, что ЭМ поля способствуют разрыву связей $-C-C-$ и $-C-H-$, и дано обоснование протекания реакций крекинга под таким видом воздействия. Кроме того, автор полагает, что в будущем технологии волновой обработки нефтематеринских отложений могут ускорить процесс нефтегенерации.

Важной областью исследования является ЭМ воздействие на нефтяные пласты. В настоящее время известен только один комплекс бездефектных методов воздействия на пласт – это воздействие физическими полями. К данному

воздействию можно отнести: ЭМ, плазменноимпульсное, электрогидравлическое и другие [11]. О перспективности этого направления свидетельствуют результаты лабораторных и промысловых испытаний (Россия) и десятилетний опыт практического использования такой технологии в промышленных масштабах (США, Канада) [34].

Результаты применения ЭМ воздействия на нефтяные среды представляются вполне приемлемыми с практической точки зрения, а метод ЭМ прогрева - технически осуществимым и конкурентоспособным по сравнению с традиционными методами: нагревом горячей жидкостью, паром, электронагревателем и т.п. [34].

В [91] расчетным путём оценена оптимальная продолжительность обработки скважин – 30 суток, а в [46] описан опыт реализации ВЧ ЭМ воздействия на промысле. В качестве излучателя использовалось продолжение насосно-компрессорной трубы (НКТ). Наземный генератор выдавал полезную мощность 63 кВт на частоте 13,56 МГц и передавал энергию к излучателю по передающему тракту, представляющему собой коаксиальную систему «НКТ – обсадная колонна», изолированную диэлектрическими шайбами. В этой работе показано, что технология ЭМ воздействия эффективна на месторождениях высоковязких тяжелых нефтей, залегающих на глубинах до 1000 м.

В статье [90] рассматривается технология совместного воздействия ЭМП и нагнетания растворителя в пласт для вытеснения флюида. Такой подход позволяет выбирать оптимальные параметры воздействия с учётом реальных пластовых условий. Подтверждена необходимость учитывать согласованность режима работы системы «скважина – пласт», однако расчет таких систем фильтрационных течений представляется отдельной областью исследований.

Позже в [25] была показана возможность регулирования процессов, происходящих в пласте, которые задаются мощностью генератора ЭМ волн и давлением на забое скважины.

В работе [134] проведено исследование численной модели ЭМ воздействия на пласт после проведения ГРП, образующего две перпендикулярные трещины.

Показана эффективность подхода при прерывистом включении генератора ЭМ поля, исключающем перегрев ближней зоны.

Техническая реализация подведения энергии в пласт затруднена тем обстоятельством, что необходимо иметь ещё одну (или несколько) рядом расположенную скважину для спуска излучателя, либо использовать одну скважину одновременно для добычи и погружения кабеля с излучателем, что уменьшает проходное поперечное сечение колонны. В [128] предложен оригинальный концепт, излучателя применимого для прогрева офшорных месторождений. Для неглубоких залежей может быть использован излучатель, который скользит по поверхности дна, воздействуя на большую площадь пласта.

В работе [117] авторами был определен диапазон оптимальных частот воздействия на пласт $10\div 20$ МГц. Однако в продолжении исследования [116], основанном на проведении модельного эксперимента прогрева пласта ЭМ полем, была выбрана частота 2450 МГц. Принятие такого допущения вызвано сложностью проведения экспериментов на частотах $10\div 20$ МГц, так как в этом случае пришлось бы использовать макет резервуара объёмом в несколько сот кубических метров

Существуют также и работы, оценивающие энергоэффективность ЭМ прогрева резервуаров для повышения нефтеотдачи. В частности, в [121] разработана блок-схема экономической эффективности ЭМ полей, которая показывает неоднозначную эффективность такого подхода. Авторы полагают, что внедрение СВЧ ЭМ является наиболее целесообразным в технологических процессах обезвоживания нефтяных шламов.

1.9 Выводы по главе

1. Проблема очистки резервуаров от донных отложений не имеет одновременно технологически, экологически и экономически эффективного способа решения. Перспективным направлением является разработка технологий разогрева донных отложений без использования воды и водных моющих средств в качестве теплоносителей. Для решения этой проблемы целесообразно

исследование бесконтактных средств передачи теплоты в донные отложения внутри резервуаров.

2. 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, обеспечили широкое распространение применения ЭМ воздействия в следующих областях нефтяной отрасли: утилизация нефтешламов; обезвоживание нефти; устранение асфальто-парафинистых пробок в трубопроводе; снижение вязкости; повышение нефтеотдачи. Однако применение СВЧ ЭМ поля для разжижения АСПО внутри резервуаров не описано в литературе.
3. Аппараты и системы СВЧ воздействия на нефтяные среды на основе погружных 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;

ГЛАВА 2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ СВЧ ЭМ ПОЛЯ В НЕФТЯНЫЕ СРЕДЫ

Взаимосвязь научных исследований, направленных на создание технологии получения нефтяной дисперсной системы с необходимыми свойствами посредством воздействия волнового поля, представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Схема связанных исследований волнового воздействия на НС

Однако, прежде чем создавать эффективную технологию и установку, реализующую её волновое воздействие, необходимо оценить эффективность процесса передачи энергии ЭМ поля в нефтяную среду [6].

В статье [40] обоснована возможность применения электромагнитного поля высокой частоты для переработки нефтешламов, представляющих собой сверхустойчивые водонефтяные эмульсии. По отношению к ЭМ полю данная среда является слабопроводящим диэлектриком, который будет нагреваться в ЭМ поле за счёт слабой проводимости [114].

В [137] сравниваются тепловые и ЭМ способы нагрева нефтяных сред.

В [5] описана установка СВЧ-подогрева проточной жидкости.

Для моделирования процесса ЭМ нагрева необходимо знать диэлектрические характеристики среды, подводимую мощность и частоту излучения.

Диэлектрические характеристики среды (диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$) являются функциями температуры. Вследствие непрерывного воздействия ЭМ поля на нефтешлам его диэлектрические характеристики будут изменяться с ростом температуры.

Согласно формулам Дебая, диэлектрическая проницаемость нефтяной среды зависит, кроме того, от частоты электрического поля. В целом нефть относится к неполярным веществам, так как её диэлектрическая проницаемость находится в пределах 2,0–2,5 [10]. Наличие в нефти механических примесей, полярных и неполярных компонентов придает ей свойства слабополярных диэлектриков, для которых диэлектрическая проницаемость составляет порядка $\varepsilon = 3 \div 5$.

Одной из актуальных практических задач является термическое разжижение нефтяных шламов внутри резервуаров в процессе очистки.

Процесс подогрева нефтяного шлама ЭМ полем обеспечивает объёмное выделение в нём тепла, что способствует равномерному распределению температуры в среде. Такая особенность термодинамического процесса может значительно расширить области применения технологий с использованием биологически активных компонентов [135].

2.1 Излучающие системы электромагнитных полей для нефтяных сред

Большое количество публикаций, патентов, защищенных диссертаций, подтверждающих применимость технологий ЭМ для воздействия на нефтяные среды, говорит, если не о революционном изменении технологических процессов нефтегазового сектора, то, по крайней мере, о скорейшем внедрении таких технологий в индустрию.

Можно ожидать, что в ближайшем будущем это вызовет дополнительный спрос на создание новых технологических аппаратов, позволяющих реализовывать ЭМ интенсификацию технологических процессов. Основными частями такого аппарата будут являться

- генератор излучения;
- канал передачи энергии;
- излучатель.

Существующие генераторы излучения ЭМ поля в промышленных масштабах могут обеспечивать мощностью до 1 МВт на частотах до 6700 МГц. Такие генераторы могут быть использованы без существенных изменений.

Нетривиальной становится задача создания излучателей ЭМ полей и передача большого потока энергии к ним [113]. Анализ литературы не обнаруживает рекомендаций по выбору типов излучателей для нефтяных сред. Существующие методы разработки антенн и каналов передачи энергии не являются исчерпывающими как для создания промышленных комплексов, так и для исследовательских лабораторных стендов.

Несомненно, что к таким устройствам для использования во всех областях нефтегазового дела предъявляются следующие ключевые требования:

- энергоэффективность;
- отсутствие возможности короткого замыкания;
- отсутствие вредного электромагнитного фона;

В частности, для большого числа районов нашей страны необходима работа в условиях низких отрицательных температур, а для создания экспериментальных стендов излучающих волны низких частот, большое значение приобретает компактность излучателя.

Для уже эксплуатирующихся систем трубопроводного транспорта, имеющих большую протяженность, технологии подведения ЭМ поля должны иметь возможность внедрения без нарушения существующих технологических процессов.

Ещё одной особенностью СВЧ технологий для нефтегазового сектора является невозможность приближения к требуемым показателям с заданной точностью [52]. Причины этого явления имеют принципиальный характер и определяются как фундаментальными ограничениями теории ЭМ процессов, неизбежными разбросами параметров обрабатываемых сред, так и априорной недостаточностью исходной информации, в частности, относительно точных значений электрофизических параметров материалов.

2.2 Исследование типов излучателей электромагнитных полей для нефтяных сред

Многообразие геометрических размеров и форм обрабатываемых диэлектриков, различие их электрофизических свойств затрудняет создание универсальных СВЧ камер для тепловой обработки диэлектриков, универсальных систем многоэлементного возбуждения ЭМ поля с неизменной структурой и параметрами. В каждом конкретном случае приходится определять конструкцию камеры СВЧ нагрева и наиболее подходящий вариант многоэлементного возбуждения электромагнитного поля [8].

Все излучатели ЭМ полей либо по своей сути являются элементарными излучателями ЭМ волн, либо могут быть представлены как их совокупность. Для определения оптимальных типов излучателей, пригодных для воздействия на нефтяные среды, рассмотрим их основные виды и особенности эксплуатации промышленных устройств.

Существующие элементарные излучатели делятся на три типа [45]:

- диполь Герца;
- магнитный диполь;
- излучатель Гюйгенса.

Диполь типа Герца (рисунок 9 а) представляет собой прямолинейный, бесконечно тонкий идеальный проводник длиной меньше длины излучаемой волны, у которого амплитуда и фаза переменного тока в каждой точке совпадают. Такой теоретический излучатель не представляется возможным изготовить, так как

трудно обеспечить отсутствие тока на конце провода. Поэтому используются видоизмененные излучатели с металлическими шарами или дисками на конце провода (рисунок 9б).

Главной особенностью эксплуатации такого класса антенн является то, что они генерируют электрическое переменное поле.

В силу симметрии уравнений Максвелла относительно электрического и магнитного векторов поля в технической электродинамике оперируют понятием магнитного диполя [109] хотя физически и не существует вещества магнитных зарядов и магнитных токов. Однако, ещё в начале XIX, было замечено что кольцевой электрический ток создаёт магнитное поле, схожее по форме с полем, создаваемым равными по величине и противоположными по знаку двумя электрическими зарядами. Таким образом, под понятием элементарный магнитный диполь (рисунок 10) подразумевается кольцевой проводник, по которому протекает ток высокой частоты.

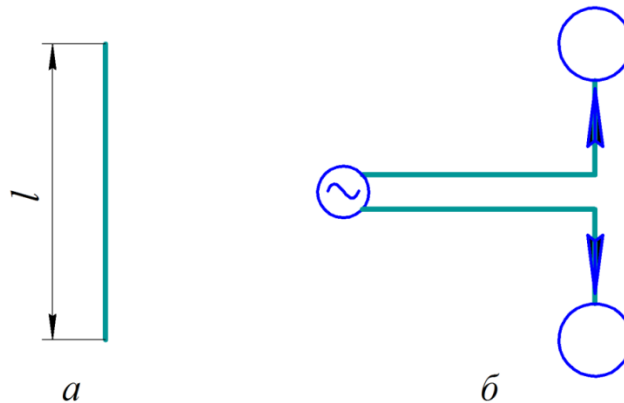


Рисунок 9 – Диполь Герца

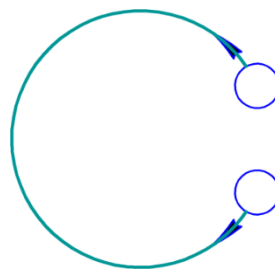


Рисунок 10 – Элементарный магнитный диполь

Такой тип излучателей генерирует переменное магнитное поле.

Излучатель Гюйгенса представляет собой площадку, по которой протекают переменные электрические и магнитные поля. Так же, как и предыдущие два типа элементарных излучателей, излучатель Гюйгенса является в большей степени теоретическим представлением. На практике такой тип излучателя представляет собой щелевидное отверстие волновода линии передачи (рисунок 11).

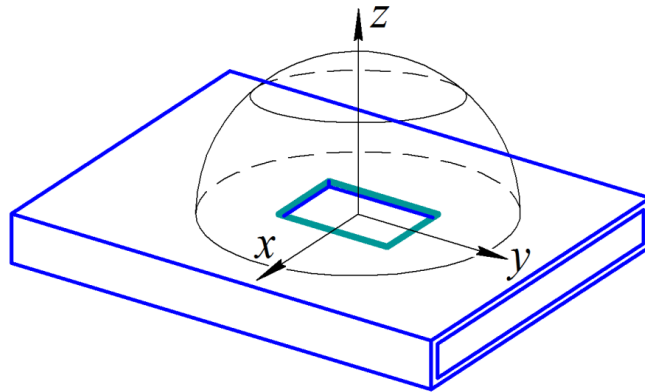


Рисунок 11 – Элементарный излучатель Гюйгенса

Энергоэффективность любого излучателя оценивается коэффициентом стоячей волны (КСВ). Он определяет количество энергии, отраженной от объекта излучения и направленной обратно в направлении источника [43]. Большой поток энергии в источник может привести к его нагреву и поломке. В частности, эксплуатация серийных магнетронов мощностью 1 кВт без нагрузки приводит к нагреву ферритовых колец с дальнейшей потерей материалом ферромагнитных свойств. Для предотвращения этих процессов часто используется циркулятор, который отводит часть мощности на нагрев балластовой нагрузки.

Поскольку излученная энергия совершает полезную работу, а именно, нагревает нефтяную среду, то в таком случае КПД η численно равен коэффициенту передачи (КП)

$$\eta = КП \cdot 100\% . \quad (1)$$

Коэффициент передачи, коэффициент отражения (КО), коэффициент бегущей волны (КБВ) и КСВ определяются по известным из теории антенн соотношениям [33]

$$КП = (1 - КО^2) \quad (2)$$

$$КО = (1 - КБВ) / (КБВ + 1) \quad (3)$$

$$КБВ = \frac{1}{КСВ} \quad (4)$$

Таким образом, используя (2)-(4), получаем зависимость КПД (1) от КСВ:

$$\eta = \left(1 - \left(\frac{\frac{1}{КСВ} - 1}{\frac{1}{КСВ} + 1} \right)^2 \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

На рисунке 12 показана зависимость потерь мощности от КСВ. На графике видно, что переданная во внешнюю среду мощность резко убывает в области сравнительно малых значений КСВ.

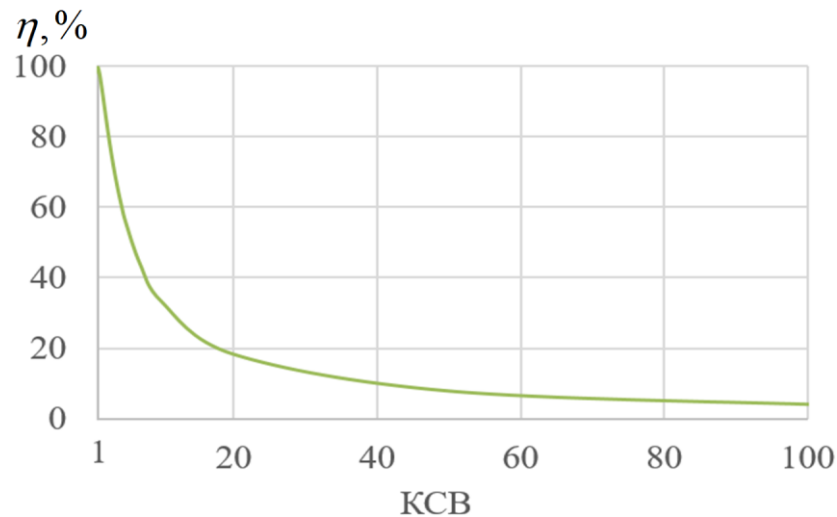


Рисунок 12 – Зависимость излучаемой мощности от КСВ

Кроме того, КСВ излучающей системы в целом зависит и от диэлектрических свойств среды, а, следовательно, для энергоэффективной работы необходимо учитывать и этот фактор. Однако на сегодняшний день решение такой проблемы не представляется возможным. Электрофизические свойства среды в значительной степени зависят от следующих параметров:

- химический состав;
- структура;
- температура.

Ситуация осложняется изменением всех трёх параметров в процессе воздействия ЭМ поля. Недавнее исследование [110] показало, как сильно может меняться структура нефтяной дисперсной системы от действия ЭМ поля.

На сегодняшней день не существует полной модели развития среды под действием ЭМ поля, объединяющей все три фактора. Вероятнее всего, в ближайшее время не будет предложена полнофакторная модель описания такого процесса.

Однако при выборе типа излучателя для подведения ЭМ поля в среду стоит учесть следующее обстоятельство. Нефтяные среды в большей степени являются диэлектрическими, в связи с чем электрическое поле в них быстро затухает. В тоже время, магнитная проницаемость всех видов нефтяных сред во всем диапазоне температур близка к магнитной проницаемости вакуума. Таким образом, электрические излучатели в сравнении с магнитными излучателями в большей степени подвержены шунтированию среды, а, следовательно, согласованность режима работы магнитных излучателей в меньшей степени, в сравнении с электрическими, зависит от её электрофизических параметров среды.

Кроме того, электрические излучатели, имея форму в виде линейного проводника, могут вызвать трудности внедрения в технологические процессы. Так, например, в системах с движущейся средой они, будучи погружены в поток, непременно увеличат гидравлическое сопротивление. В частности, в трубопроводном транспорте трудно представить эффективную работоспособную конструкцию штыревой антенны, воздействующей на поток и не мешающей прохождению технологических снарядов.

Исполнение магнитных излучателей разнообразно, и это позволяет проектировать технологические ёмкости со встроенными излучателями, выполненными заподлицо с корпусными деталями изделий.

Ещё одной особенностью электрических излучателей является наличие в них близко расположенных разноименных зарядов. Вследствие чего требуется несколько большая по отношению к магнитным излучателям степень изоляции от внешней среды для обеспечения работоспособности.

2.3 Центральный композиционный план экспериментальных измерений КСВ биконического рупорного излучателя

Как отмечалось выше, КСВ излучателя, окруженного нефтяной средой во всем диапазоне частот зависит от химического состава нефти. Однако проводить исследование, в котором влияющими факторами являются всевозможные химические соединения, входящие в состав нефтяной дисперсной системы, не представляется возможным ввиду чрезмерно большого количества разновидностей компонентов нефти. В этой связи для получения новых научных знаний необходимо выбрать более «грубое» деление нефтяных компонентов. В частности, на первом этапе следует принять во внимание, что сложность транспортировки углеводородов, связана с высокой вязкостью, которая, в первом приближении, зависит от процентного содержания легких углеводородов, являющихся растворителями в нефтяной смеси. Другими словами, актуальным является исследование КСВ излучателя в зависимости от частоты и содержания легкой фракции углеводородов в нефтяной среде. Такое многофакторное исследование целесообразно проводить с использованием методов планирования эксперимента.

Согласно литературе [3; 49; 97] данное исследование требует составления центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов. В таком случае, величина «звездного» плеча $\alpha = 1$, а коэффициент преобразования плана второго порядка к ортогональному виду $\beta = 2/3$. Ортогональность матрицы центрального композиционного плана является достаточным критерием оптимальности плана эксперимента.

Ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов представлен в таблице 7. В эксперименте используются два основных влияющих фактора, имеющих три уровня (таблица 6):

1. X_1 – процентное содержание (0 %; 50 %; 100 %) легких фракций УВ
2. X_2 – частота (2,4; 2,45; 2,5) ЭМ поля, ГГц;

Таблица 6 – Кодирование факторов

x_1	$X_1, \%$	x_2	$X_2, ГГц$
-------	-----------	-------	------------

–	0	–	2,4
0	50	0	2,45
+	100	+	2,5

Таблица 7 – 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

Функцию отклика можно аппроксимировать полиномом второй степени вида [97]

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} \left(x_1^2 - \frac{2}{3} \right) + b_{22} \left(x_2^2 - \frac{2}{3} \right), \quad (6)$$

где b_i – коэффициенты регрессии.

Все коэффициенты регрессии определяются по общей формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} \quad (7)$$

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

Для проведения эксперимента был взят образец товарной нефти, подвергнутый перегонке до температуры 300 °С [24], что соответствовало испарению 50 % массы нефти. Далее измерялся КСВ в исследуемом диапазоне частот для нефтяных сред различного состава.

Измерение проводилось векторным анализатором СВЧ цепей SABAN R54 с обработкой результатов в программе RVNA. Программа RVNA получала от рефлектометра измеренное значение S параметра многополюсника, а именно коэффициент S_{11} , и в интерактивном режиме вычисляла КСВ по формуле (8)

$$КСВ = \frac{1 + 10^{\frac{S_{11}}{20}}}{1 - 10^{\frac{S_{11}}{20}}} \quad (8)$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения устройства SABAN R54 согласно документации:

$$\Delta_{S_{11}} = \pm \left(0,008 + 0,018 \cdot |S_{11}| + 0,018 \cdot |S_{11}|^2 \right) \quad (9)$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности КСВ определяется как

$$\begin{aligned} \Delta_{КСВ} &= \left| \frac{\partial КСВ}{\partial S_{11}} \cdot \Delta_{S_{11}} \right| = \left| \frac{\partial \left(\frac{1 + 10^{\frac{S_{11}}{20}}}{1 - 10^{\frac{S_{11}}{20}}} \right)}{\partial S_{11}} \cdot \left(0,008 + 0,018 \cdot |S_{11}| + 0,018 \cdot |S_{11}|^2 \right) \right| = \\ &= \left| \frac{10^{\frac{S_{11}-1}{20}} \cdot \ln(10)}{\left(1 - 10^{\frac{S_{11}}{20}} \right)^2} \cdot \left(0,008 + 0,018 \cdot |S_{11}| + 0,018 \cdot |S_{11}|^2 \right) \right| \end{aligned} \quad (10)$$

Обработка экспериментальных данных, полученных согласно композиционному плану, представлена в таблице 8.

Дисперсия абсолютной погрешности измеряемой величины определялась как

$$S_i^2 = \left(\frac{\Delta_{КСВ}}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (11)$$

Усреднённая дисперсия экспериментов

$$S_{\text{всн}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \quad (12)$$

Таблица 8 – Обработка экспериментальных данных

Номер опыта	$KCB^{\text{эксп}}$	$KCB^{\text{теор}}$	S_{11}	Δ_{KCB}	S_i^2	$S_{\text{всн}}^2$	$S_{\text{ад}}^2$	F_p	F_T
1	4,96	4,38	-3,55	0,41	0,05	0,0534	1,14	21,3	100
2	5,92	5,42	-2,96	0,43	0,06				
3	3,18	3,66	-5,65	0,36	0,04				
4	5,82	6,39	-3,01	0,43	0,06				
5	4,25	4,34	-4,17	0,39	0,05				
6	6,3	6,23	-2,78	0,44	0,06				
7	2,74	3,81	-6,65	0,35	0,04				
8	4,99	3,94	-3,53	0,41	0,06				
9	4,22	4,20	-4,20	0,39	0,05				

Согласно формуле (7) и экспериментальным значениям (таблица 8), значения коэффициентов регрессии определяются как $b_0 = 4,71$; $b_1 = -0,94$; $b_2 = -0,06$; $b_{12} = 0,42$; $b_{11} = 1,09$; $b_{22} = -0,32$. Каждый из полученных коэффициентов необходимо проверить согласно t -статистики Стьюдента для исключения статистически незначимых величин. Для этого определяется дисперсия для каждого коэффициента

$$S_{b_0} = \sqrt{\frac{S_{\text{всн}}^2}{m(2^n + 2n + 1)}}; \quad (13)$$

$$S_{b_1} = S_{b_2} = \sqrt{\frac{S_{\text{всн}}^2}{m(2^n + 2\alpha^2)}}; \quad (14)$$

$$S_{b_{12}} = \sqrt{\frac{S_{\text{всн}}^2}{m \cdot 2^n}}; \quad (15)$$

$$S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = \sqrt{\frac{S_{\text{всн}}^2}{2^n (1-\beta)^2 + 2(\alpha^2 - \beta)^2 + (2n-1)\beta^2}}, \quad (16)$$

где $m = 1$ – число параллельных опытов;

$n = 2$ – количество влияющих факторов.

Далее определяется коэффициент Стьюдента для коэффициентов регрессии

$$t_{b_i} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}} \quad (17)$$

Значение t_{b_i} сравнивается с теоретически допустимым значением t -статистики Стьюдента t_T для вероятности 0,95. Табличное значение определяется по количеству степеней свободы $f = m(N-1) = 1 \cdot (9-1) = 8$, где N – количество экспериментов. Результаты расчетов по формулам (13) - (17) представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Проверка значимости коэффициентов регрессии по t -статистике Стьюдента

Коэффициент регрессии	$S_{b_{ii}}$	t_{b_i}	t_T	b_i
b_0	0,077	61,159	1,86	4,71
b_1	0,094	9,986		-0,94
b_2	0,094	0,654		0,00
b_{12}	0,115	3,637		0,42
b_{11}	0,131	8,318		1,09
b_{22}	0,131	2,458		-0,32

Если $t_{b_i} < t_T$, то соответствующее значение коэффициента регрессии равно нулю, в противном случае значение коэффициента b_i принимается.

Для проведения анализа экспериментальных данных использован статистический критерий Фишера, основное неравенство которого имеет следующий вид

$$F_p < F_T, \quad (18)$$

где F_p – расчетное значение критерия Фишера по экспериментальным данным;

F_T – теоретическое значение критерия Фишера.

Расчетное значение критерия Фишера есть отношение квадратов дисперсий адекватности и повторяемости

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_6^2}, \quad (19)$$

Дисперсия адекватности теоретической модели определяется как

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (KCB_i^{эксн} - KCB_i^{теор})^2}{N-1}. \quad (20)$$

Функцию (6) можно представить в естественных переменных, для этого необходимо воспользоваться формулой перехода от кодированных переменных

$$x = 1 - \frac{2(X_{\max} - X)}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (21)$$

где X_{\max} , X_{\min} – соответственно верхнее и нижнее значение исследуемого диапазона влияющего фактора.

Подставляя полученные значения коэффициента b_i из таблицы 9 в выражение (6) и раскрывая скобки, получаем:

$$KCB = 4,2 - 0,94x_1 + 0,42x_1x_2 + 1,09x_1^2 - 0,32x_2^2 \quad (22)$$

Поверхность отклика, описываемая уравнением (22), представлена на рисунке 13.

В целях определения эффективности существующих или разрабатываемых СВЧ излучателей для нагрева нефтяных сред необходимо проводить предварительный эксперимент, чтобы оценить влияние компонентного состава нефти на КПД передачи энергии.

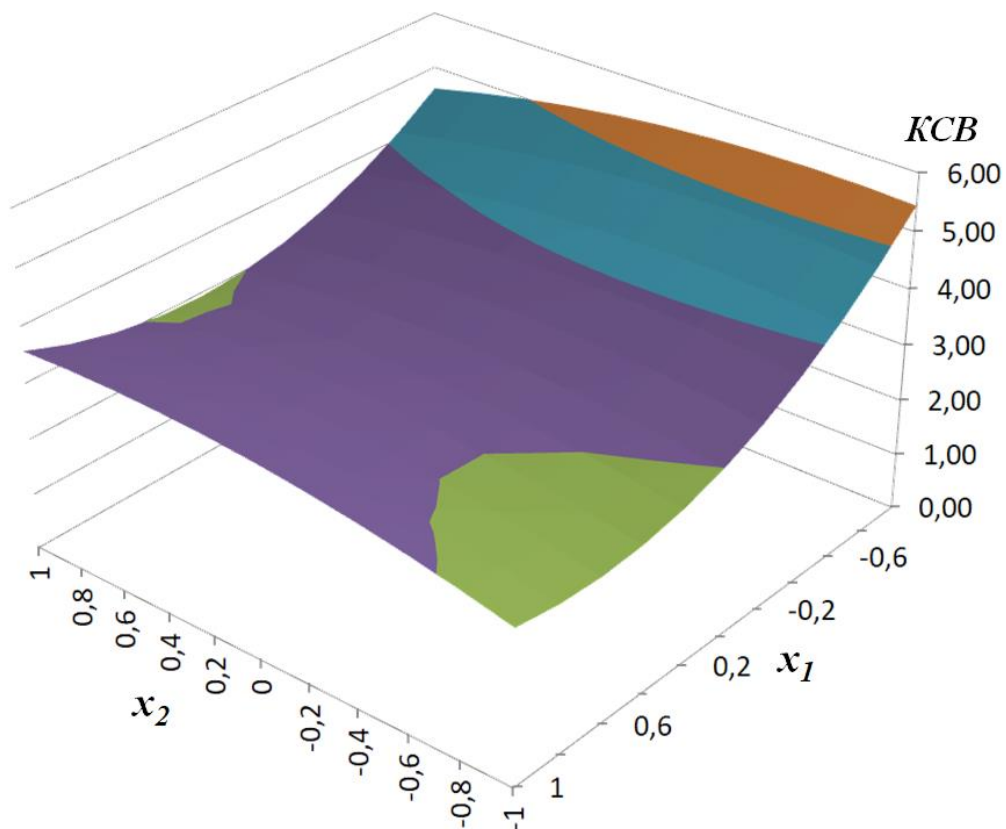


Рисунок 13 – Поверхность отклика КСВ биконического рупорного излучателя

2.4 Исследование применимости биконического рупорного излучателя для воздействия на нефтяные среды

Основным характеристикой любого излучателя является диаграмма направленности. Она показывает направление потока энергии от излучателя. Выбор типа излучателя определяет градиент плотности потока электромагнитного поля в окружающем его пространстве.

В случае использования цилиндрической ёмкости равномерность распределения ЭМП может быть обеспечена использованием рупорной антенны с круговой характеристикой. Основным типом таких устройств являются биконические рупорные излучатели (рисунок 14).

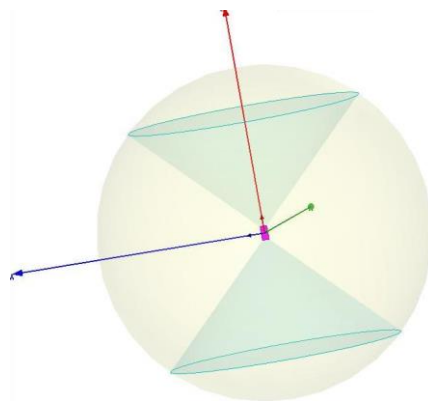


Рисунок 14 – Биконический рупорный излучатель

На рисунке 15 представлена визуализация диаграммы направленности биконического рупора, полученная методом конечных элементов (МКЭ).

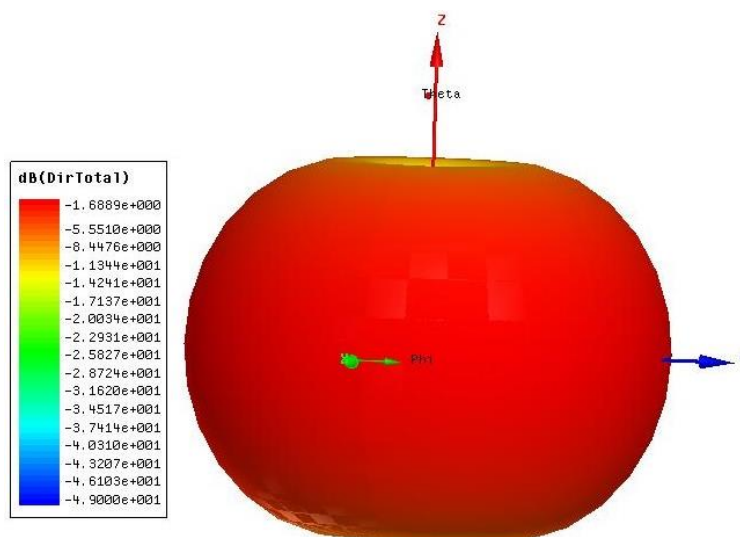


Рисунок 15 – Диаграмма направленности, полученная МКЭ

Из рисунка видно, что поток энергии от такого излучателя имеет круговую направленность.

2.5 Особенности излучателей электромагнитного поля для нефтяных шламов и оценка масштабируемости технологии

Наглядный результат СВЧ воздействия на нефтешлам демонстрирует простой опыт (рисунок 16). Образец сформированной массы нефтешлама, собранного в процессе очистки резервуара, был размещен на куске краски, взятой с внутренней поверхности резервуара. Уклон плоскости к горизонту составлял примерно 1° . Шероховатость поверхности идентична и полностью моделирует

шероховатость поверхности стенок резервуара. Под действием СВЧ излучения, спустя несколько минут, образец расплавился, и масса стекла вниз по уклону.



Рисунок 16 – Стеkanie нефтяного шлама

Возможность освобождения контактирующих с нефтешламом поверхностей в результате действия ЭМП совместно с ультразвуковым воздействием [124; 126], химическим [139] или биохимическим воздействием [129] представляет собой перспективное направление исследований.

В [84] описан способ разжижения асфальтопарафинистых отложений внутри резервуаров, основанный на конструкции биконического рупора. Основным элементом предлагаемой технологии является нагревательный модуль сверхвысоких частот (НМСВЧ) (рисунок 17).

НМСВЧ представляет собой плоский цилиндр, с диаметром периферии порядка 0,5 м. В сечении шайбы находятся два рупора, которые служат волноводами. Полость волновода заполнена твердым диэлектриком, в котором

быстрее проходят волновые процессы и который служит каркасом для верхней и нижней частей шайбы. К верхней части шайбы прикреплены высоковольтный источник ЭМ поля (магнетрон на 915 МГц), трансформатор и преобразователь.

Основным достоинством такого модуля является возможность его использования в любых типах ёмкостей

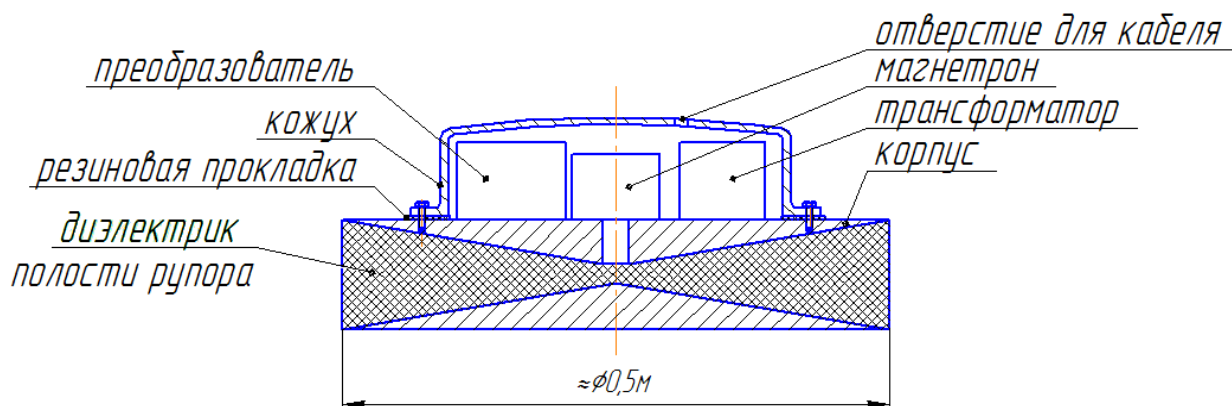


Рисунок 17 – НМСВЧ

Процесс удаления шлама нефтепродуктов в хранилищах представляется трудоёмким и небезопасным. Для снижения трудоёмкости предлагается разжижать шлам путём его нагрева электромагнитным полем СВЧ частот. В этом случае передача теплоты идёт не с поверхности путём конвекционного прогрева, а в объеме на глубину проникновения поля СВЧ. С этой целью предлагается рассмотреть возможность нагрева с помощью ряда распределенных по площади резервуара излучателей СВЧ энергии, спускаемых сверху на поверхность шлама, либо установленных вручную через люк-лазы проектируемого резервуара.

Такой подход предполагает размещение устройств по поверхности дна, преимущественно в областях наименьшего уровня отложений

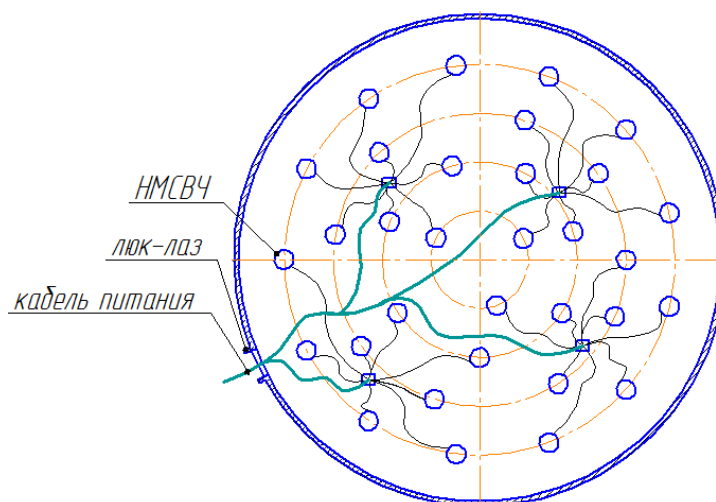


Рисунок 18 – Схема размещения НМСВЧ в РВС

Зная удельную поглощаемую мощность, можно оценить, сколько потребуется времени, чтобы нагреть определенный объем нефтешлама до требуемой температуры, располагая каким-либо количеством излучателей, и наоборот. Для этого свяжем уравнение количества теплоты с формулой определения мощности излучения:

$$P \cdot t = C \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (23)$$

где t – время нагрева, c ;

$C = 1500$ – удельная теплоёмкость нефтешлама, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

$\rho = 1000$ – плотность нефтешлама, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V – объём нефтешлама, м^3 ;

ΔT – температурный перепад, $^\circ\text{C}$;

P – мощность, Вт .

Предположим, что нефтешлам равномерно распределен по донной поверхности резервуара $R_{РВС} = 15$ м, уровень донных составляет $h = 0,5$ м, тогда его объём составит $V = 157 \text{ м}^3$.

Согласно формуле (23) для повышения температуры заданного объёма нефтешлама на 30 $^\circ\text{C}$ при условии наличия 30 нагревательных модулей потребуется количество времени, равное

$$t = \frac{c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T}{n_{\text{излуч}} \cdot P_0} = \frac{1500 \cdot 1000 \cdot 157 \cdot 30}{30 \cdot 2000 \cdot 3600} = 32,5 \text{ ч.}$$

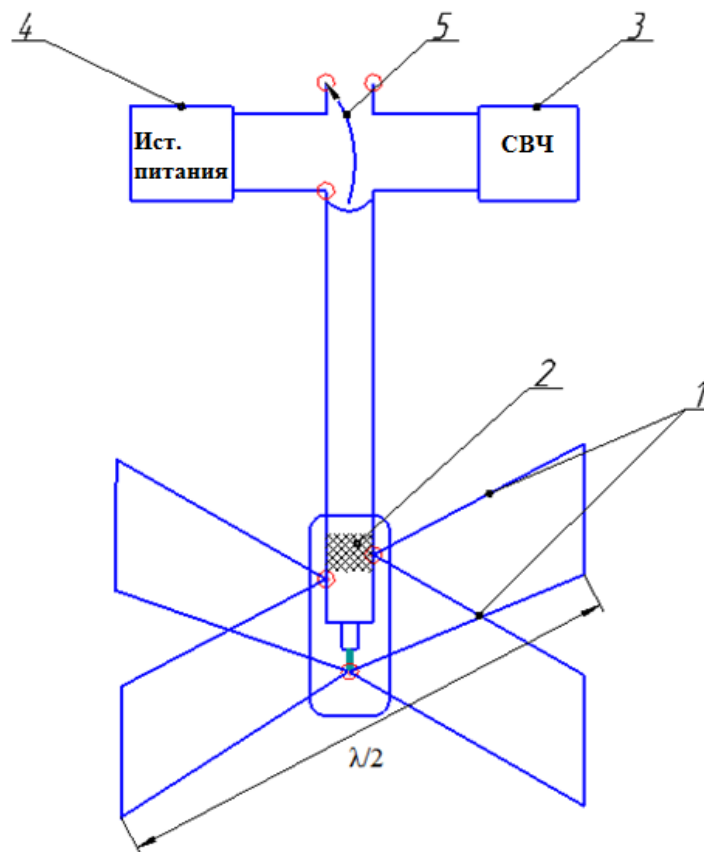


Рисунок 19 – Устройство, являющееся одновременно СВЧ излучателем и электронагревателем

Дополнительной особенностью использования антенн для воздействия на нефтяные среды является необходимость обеспечения условий погружения излучателя в среду. Для нефтяных шламов твердой консистенции, например, в условиях отрицательных температур, может быть использован предварительный нагрев области погружения. В рамках работы над диссертацией автором подана заявка и получен патент на изобретение «Устройство для разжижения нефтяных шламов внутри резервуаров и закрытых емкостях СВЧ полем» [75]. Благодаря тому, что рамки изготовлены из проволоки с высоким удельным сопротивлением, СВЧ-излучатель одновременно выполняет роль и излучателя, и нагревательного элемента и предназначен для предварительного разжижения нефтешламов (углеводородсодержащих (УВС) отходов) с целью ускоренного погружения излучателя в шлам. Устройство представляет собой скрещивающиеся рамки 1, с коаксиальным кабелем 2, подключенным к СВЧ генератору 3 и источнику подогрева 4 (рисунок 19). Переключение осуществляется ключом 5.

Радиальный размер скрещивающихся рамок должен быть не менее четверти длины волны СВЧ поля, а высота рамок порядка 0,125 длины волны для эффективного излучения энергии.

2.6 Контейнер для транспортировки битума с СВЧ излучателем.

Процесс объемного тепловыделения значительно сокращает время нагрева особенно для сред с низким коэффициентом теплопередачи. Кроме того, для веществ, находящихся в твердой фазе, невозможно реализовать перемешивание для выравнивая теплового поля. Разогрев застывшего битума является одной из таких проблем, для решения которой имеется ряд предложений [63–65; 76].

Автором диссертации предложено устройство для транспортировки и разогрева битума [62]. Полезная модель (рисунок 20) представляет собой устройство, состоящее из емкости 1, выполненной в форме цилиндра, и содержащую крышку 2, боковые стенки 3, приспособления, необходимые для эксплуатации контейнера 4, биконический рупорный СВЧ-излучатель 5, связанный коаксиальным кабелем 6 с СВЧ разъёмом 7, коническое днище 8, заливное 9 и сливное 10 отверстия. Полезная модель предназначена для транспортировки и нагрева битума, может быть использована при погрузочно-разгрузочных работах, строительстве и промышленности.

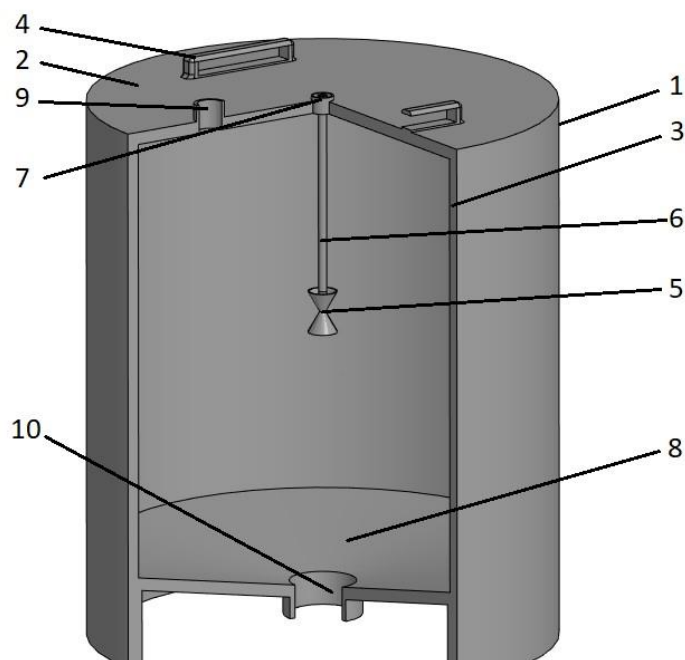


Рисунок 20 – Контейнер для транспортировки битума с СВЧ излучателем

Блок-схема подключения устройства представлена на рисунке 21. Контейнер при помощи коаксиального кабеля подключается к генератору СВЧ. Генератор СВЧ подключается к сети 220 В.



Рисунок 21 – Схема подключения

Технология эксплуатации контейнера следующая. В месте погрузки в контейнер заливается горячий битум. Заливная горловина 9 закрывается, контейнер транспортируется до места разгрузки, подключается к источнику СВЧ, после разогрева содержимое контейнера сливается через отверстие 10.

Радиус контейнера r выбран так, чтобы распространение потока ЭМ волны обеспечивало равномерную плотность поглощаемой мощности. Известно [27], что значительное выравнивание плотности поглощаемой мощности реализуется при условии двукратного затухания проходящей мощности по радиусу r . Тогда для битума с характеристиками $\varepsilon_1 = 2,5$, $\operatorname{tg}\delta_1 = 0,015$ условие равномерности имеет следующий вид $\exp(-2\alpha r) = 1/2$ и выполняется при радиусе контейнера $r = -\ln(1/2)/(2\alpha) \approx 0,55\text{ м}$.

Для обеспечения равномерности теплового поля высота контейнера h принимается равной его диаметру. Таким образом, объем контейнера составляет

$$V = \pi r^2 h \approx 1,05 \text{ м}^3 \quad (24)$$

Плотность поглощаемой мощности P_D определяется согласно выражению [27]

$$-\frac{dP_D}{dz} \frac{1}{(1-R)P_0} \cong 2\alpha \exp(-2\alpha z) [1 + \exp(-4\alpha(r-z))] \quad (25)$$

Неравномерность плотности поглощаемой мощности определяется с использованием выражения (25) как отношение

$$\left. \frac{dP_D}{dz} \right|_{z=0} / \frac{dP_D(z)}{dz} \quad (26)$$

При заданных параметрах контейнера неравномерность по (26) составляет 20%.

2.7 Выводы по главе

1. Эффективность передачи энергии электромагнитного поля во всём диапазоне содержания легких фракций углеводородов, изменятся от 52 % до 80 %, что означает достаточную эффективность процесса теплопередачи.
2. В исследуемых диапазонах частоты и содержания легких фракций углеводородов КСВ излучателя хорошо описывается полиномиальной зависимостью второго порядка, что позволяет использовать центральные композиционные планы при экспериментальном определении коэффициентов аппроксимации полиномиальной модели КСВ излучателя.
3. Предложены три технологии передачи энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяные среды жидкой и твердой фазы.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА НЕФТЯНОЙ СРЕДЫ СВЧ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

3.1 Математическая модель распределения энергии ЭМ поля в нефтяной среде

Основой установки для СВЧ разогрева нефтяных жидкостных сред является биконический рупорный излучатель. Рассмотрим порядок приближенного теплового расчёта нагрева нефтяной среды таким электромагнитным рупором.

Принятые допущения математической модели:

1. Электромагнитное поле формируется на поверхности шарового слоя, ограничивающего биконический рупор (рисунок 22).

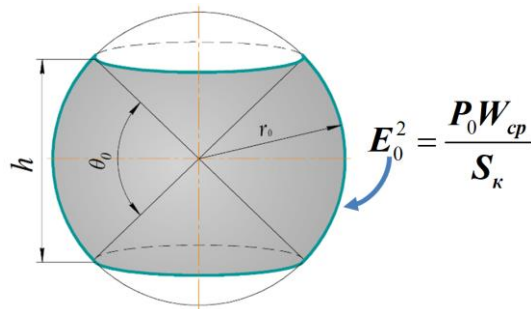


Рисунок 22 – Определение начальной напряженности электрического поля E_0 на поверхности шарового слоя

2. Внутри шарового слоя энергия ЭМ волны не поглощается.
3. Амплитуда ЭМ волны убывает по экспоненциальному закону.

$$E = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} e^{-\alpha(r-r_0)}$$

4. Электрофизические параметры облучаемой среды не зависят от мощности ЭМ излучения в процессе облучения:

$$\operatorname{tg} \delta(P_0) = \operatorname{const};$$

$$\varepsilon_0(P_0) = \operatorname{const}.$$

Представим модель излучателя, изображенного на рисунке 23, помещенного в слабопроводящую сплошную диэлектрическую среду с известными электрофизическими параметрами.

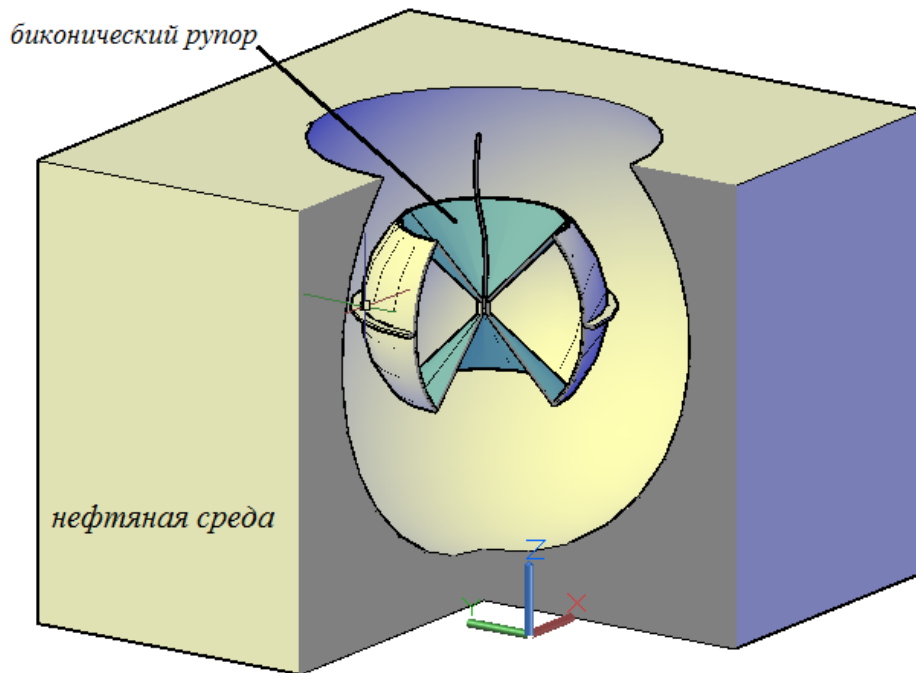


Рисунок 23 – Биконический рупор в диэлектрической среде

В горизонтальной плоскости диаграмма направленности $F(\varphi)$ рассматриваемого излучателя – круговая, а в вертикальной плоскости она характеризуется углом места θ (рисунок 24):

$$F(\theta) = A \cdot \cos \theta.$$

Полагаем, что вся подводимая мощность P_0 равномерно излучается во все стороны т.е. $\varphi = 360^\circ$. Поэтому на поверхности сферического пояса (рисунок 25) радиусом r_0 имеет место напряженность электрического поля, амплитуда которого равна [27]:

$$E_0^2 = \frac{P_0 W_{cp}}{S_\kappa}, \quad (27)$$

где P_0 – подведённая мощность, Вт;

W_{cp} – волновое сопротивление среды, Ом;

S_κ – площадь сферического пояса радиуса r_0 , m^2 .

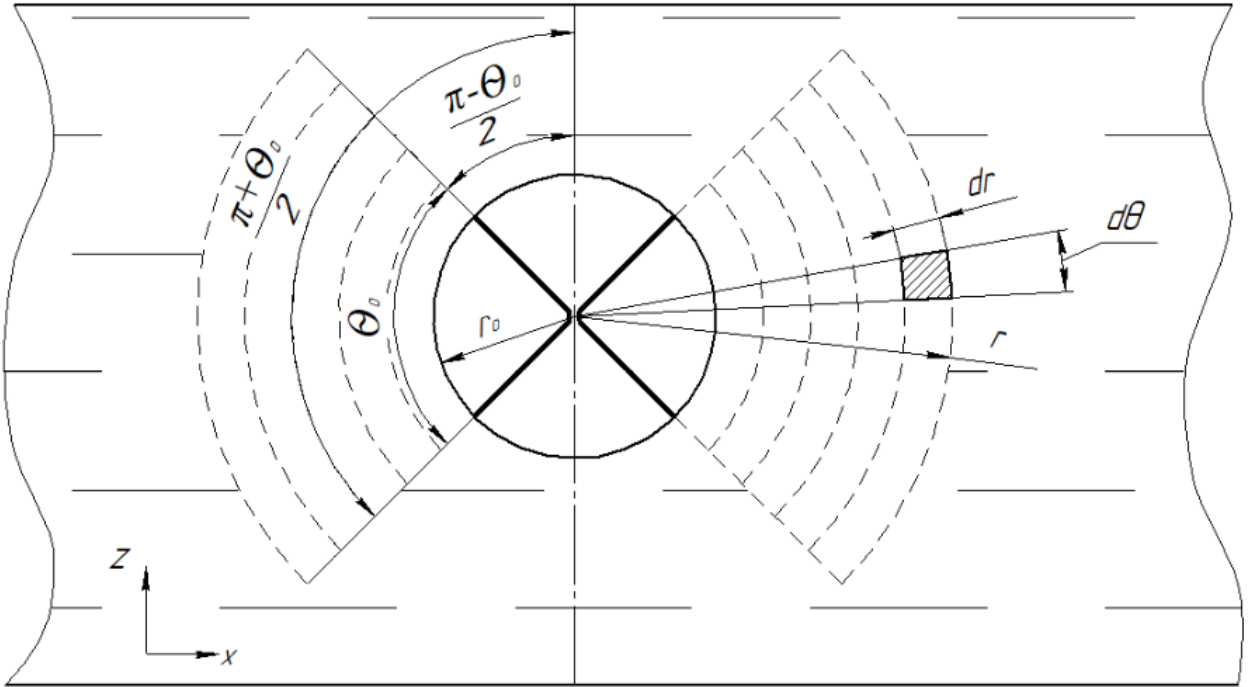


Рисунок 24 – Параметры излучателя в сферической системе координат

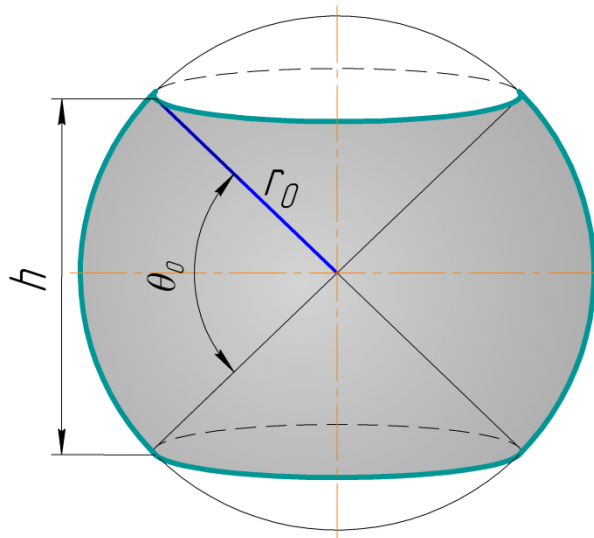


Рисунок 25 – Поверхность сферического пояса

Площадь поверхности сферического кольца определяется по формуле:

$$S_k = 2\pi r_0 h = 4\pi r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \quad (28)$$

где $h = 2r_0 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)$ – высота излучателя.

Волновое сопротивление среды определяется по формуле:

$$W_{cp} = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (29)$$

Таким образом:

$$E_0^2 = \frac{P_0 \cdot 120\pi}{4\pi r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \sqrt{\varepsilon}} = \frac{30P_0}{r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \sqrt{\varepsilon}}, \quad (30)$$

Амплитуда напряженности ЭМ поля убывает по экспоненциальному закону с коэффициентом затухания волны в среде α от поверхности r_0 , и по гиперболе в увеличивающемся по радиусу объёму окружающего излучатель пространства:

$$E = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} e^{-\alpha(r-r_0)}, \quad (31)$$

где r – расстояние от излучателя до рассматриваемой поверхности сферического пояса.

Коэффициент затухания волны в среде α найдем по формуле:

$$\alpha = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{c} \quad (32)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме.
 f – частота электромагнитного поля, Гц.

Выделяемая мощность в диэлектрике вычисляется следующим образом [27]:

$$P_0 = \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \int_V E^2 dV = \pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \int_V E^2 dV \quad (33)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота излучения;

Таким образом, используя формулы (27 - 33), можно представить математическую модель процесса тепловыделения биконического рупорного СВЧ излучателя для разжижения нефтяных сред следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\delta} = 2\pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \int_V E^2 dV \\ E_0^2 = \frac{30P_0}{r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \sqrt{\varepsilon}} \\ E = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} e^{-\alpha(r-r_0)} \\ \alpha = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{c} \end{array} \right. \quad (34)$$

Используя (34), получим выражение для определения удельной поглощаемой мощности:

$$\begin{aligned} P_{\delta} &= 2\pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \int_V \frac{30P_0}{r_0^2 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \sqrt{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot e^{-2\alpha(r-r_0)} dV = \\ &= \frac{60\pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon}}{\sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} P_0 \int_V \frac{1}{r^2} \cdot e^{-2\alpha(r-r_0)} dV \end{aligned} \quad (35)$$

Учитывая, что в элементарный объём в сферической системе координат выражается как $dV = r^2 \sin \theta dr \cdot d\varphi \cdot d\theta$ [58], преобразуем (35):

$$P_{\delta} = \frac{60\pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon}}{\sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} P_0 \iiint_V e^{-2\alpha(r-r_0)} \sin \theta dr d\varphi d\theta. \quad (36)$$

Пределы интегрирования согласно принятой расчетной схемы определяются как:

$$\begin{aligned} r &= r_0 \div r; \\ \varphi &= 0 \div 2\pi; \\ \theta &= \frac{\pi - \theta_0}{2} \div \frac{\pi + \theta_0}{2}. \end{aligned} \quad (37)$$

Подставляя пределы интегрирования (37) в (36), получим интегральное выражение:

$$P_{\delta} = \frac{60\pi f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon}}{\sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} P_0 \int_{r_0}^r e^{-2\alpha(r-r_0)} dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\frac{\pi-\theta_0}{2}}^{\frac{\pi+\theta_0}{2}} \sin \theta d\theta. \quad (38)$$

Проинтегрировав (38), получим:

$$P_{\partial} = 120\pi^2 f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} \frac{(1 - e^{-2\alpha(r-r_0)})}{\alpha} P_0 \quad (39)$$

С учетом (32) имеем:

$$P_{\partial} = 120\pi \varepsilon_0 c \cdot (1 - e^{-2\alpha(r-r_0)}) P_0 \quad (40)$$

Волновое сопротивление вакуума определяется как:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \text{ (Ом)}, \quad (41)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

Скорость света в вакууме

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (42)$$

Подставив (41), (42) в (40), получим:

$$P_{\partial} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} \cdot (1 - e^{-2\alpha(r-r_0)}) P_0 \quad (43)$$

Следовательно, выражения для поглощаемой мощности имеет вид:

$$P_{\partial} = (1 - e^{-2\alpha(r-r_0)}) P_0 \quad (44)$$

Согласно полученному выражению можно определить, что объём сферического пояса радиусом 1 метр вокруг источника поглощает 99% выделяемой энергии. Для среды с параметрами $\varepsilon_1 = 2,3$, $\operatorname{tg} \delta_1 = 0,048$ коэффициент затухания равен $\alpha = 1,87 \text{ м}^{-1}$.

Радиус поверхности сферического пояса, поток мощности через который падает в $e=2,71$ раз, составляет 0,15 м.

3.2 Удельная поглощаемая мощность

Для составления уравнения теплопроводности, описывающего рассматриваемый процесс, необходимо получить выражение для удельной поглощаемой мощности. Рассмотрим сферическую оболочку, расположенную между поверхностями радиусов r и $r + \Delta r$. Толщина оболочки Δr (рисунок 26).

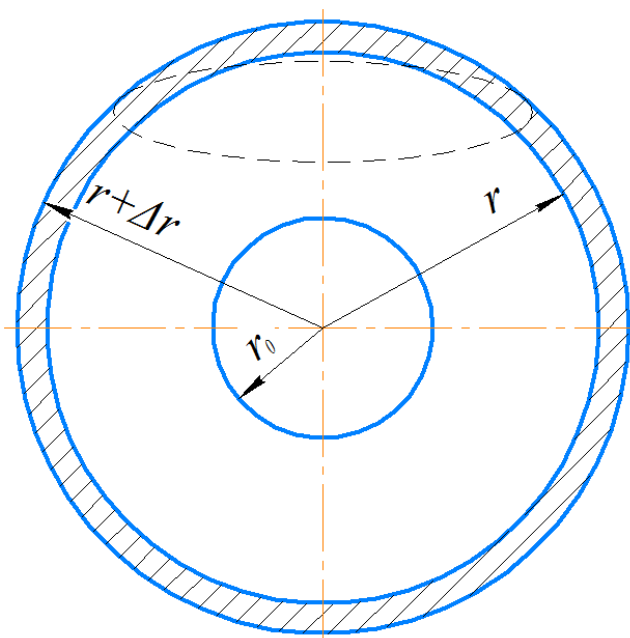


Рисунок 26 – К расчету падающей волны

Объем такой элементарной оболочки определяется по известной формуле:

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi \left((r + \Delta r)^3 - r^3 \right) = 4\pi \left(r^2 \Delta r + r \Delta r^2 + 3\Delta r^3 \right). \quad (45)$$

Опуская величины второго и третьего порядка малости, получим

$$\Delta V = 4\pi r^2 \Delta r \quad (46)$$

Мощность, выделяемую в тонкостенной оболочке, можно найти как

$$\Delta P_o = P_o(r + \Delta r) - P_o(r) \quad (47)$$

Учитывая (44), получим:

$$\Delta P_o = (1 - e^{-2\alpha(r + \Delta r - r_0)}) P_o - (1 - e^{-2\alpha(r - r_0)}) P_o = P_o e^{-2\alpha(r - r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha \Delta r}) \quad (48)$$

Удельная мощность $q(\Delta r, r)$, выделяемая в тонкостенной оболочке, будет определяться как

$$q(r) = \frac{\Delta P_o}{\Delta V} = \frac{P_o e^{-2\alpha(r - r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha \Delta r})}{4\pi r^2 \Delta r} \quad (49)$$

Выражение $\frac{(1 - e^{-2\alpha \Delta r})}{\Delta r}$ можно разложить в ряд Тейлора по степеням Δr в

окрестности нуля:

$$\frac{(1 - e^{-2\alpha \Delta r})}{\Delta r} = \frac{1}{\Delta r} - \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n (-\alpha \Delta r)^n}{n!}}{\Delta r} \quad (50)$$

Пренебрегая величинами большего порядка малости, получим

$$\frac{1 - e^{-2\alpha\Delta r}}{\Delta r} \approx 2\alpha \quad (51)$$

Таким образом, выражение для поглощаемой мощности падающей волны имеет вид:

$$q(r) = \frac{P_0 e^{-2\alpha(r-r_0)} 2\alpha\Delta r}{4\pi r^2 \Delta r} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} \quad (52)$$

Анализируя выражение (52), можно определить значение максимальной удельной поглощаемой мощности при $r \rightarrow r_0$

$$q_{\max} = \lim_{r \rightarrow r_0} (q(r)) = \frac{P_0 \alpha}{2\pi r_0^2} \quad (53)$$

Для определения удельной поглощаемой мощности от отраженной волны воспользуемся расчётной схемой (рисунок 27).

Рассмотрим две сферические оболочки радиусов r и r^* , равноудаленных от стенки радиуса r_c , т о есть

$$r_c - r^* = r - r_c \quad (54)$$

Тогда имеем

$$r^* = 2r_c - r \quad (55)$$

Поскольку в рассматриваемых объёмах поглощается равное количество энергии, то с учётом (47)

$$\Delta P_\partial = P_\partial(r^* + \Delta r) - P_\partial(r^*) = P_\partial(r + \Delta r) - P_\partial(r) \quad (56)$$

Подставляя (55), получим выражение для мощности, поглощённой в сферической оболочке толщиной Δr от отраженной волны

$$\Delta P_\partial = P_\partial(r^* + \Delta r) - P_\partial(r^*) = P_\partial(2r_c - r + \Delta r) - P_\partial(2r_c - r) \quad (57)$$

С учетом (44) имеем:

$$\Delta P_\partial = (1 - e^{-2\alpha(2r_c - r + \Delta r - r_0)})P_0 - (1 - e^{-2\alpha(2r_c - r - r_0)})P_0 = P_0 e^{-2\alpha(2r_c - r - r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha\Delta r}) \quad (58)$$

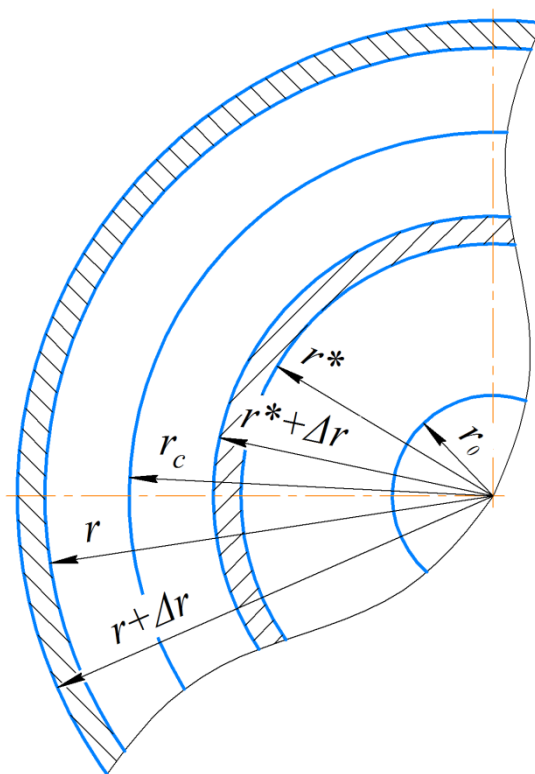


Рисунок 27 – К расчету отраженной волны

Далее, аналогично выражению (49) для падающей волны и с учётом соотношения (51) получим выражение удельной поглощаемой мощности от отраженной волны:

$$q(r) = \frac{\Delta P_\partial}{\Delta V} = \frac{P_0 e^{-2\alpha(2r_c - r - r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha\Delta r})}{4\pi r^2 \Delta r} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c - r - r_0)}}{2\pi r^2} \quad (59)$$

Для волны, отраженной от диаметрально противоположной части поверхности стенки, пройденный путь r^{**} равен

$$r^{**} = r + 2r_c - r_0 \quad (60)$$

Равенство (56) в этом случае примет вид:

$$\Delta P_\partial = P_\partial(r^{**} + \Delta r) - P_\partial(r^{**}) = P_\partial(r + \Delta r) - P_\partial(r) \quad (61)$$

Поглощенная мощность будет равна

$$\begin{aligned} \Delta P_\partial &= P_\partial(r^{**} + \Delta r) - P_\partial(r^{**}) = P_\partial(r + 2r_c - r_0 + \Delta r) - P_\partial(r + 2r_c - r_0) = \\ &= (1 - e^{-2\alpha(r + 2r_c - r_0 + \Delta r - r_0)})P_0 - (1 - e^{-2\alpha(r + 2r_c - r_0 - r_0)})P_0 = P_0 e^{-2\alpha(r + 2r_c - 2r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha\Delta r}) \end{aligned} \quad (62)$$

Удельная поглощаемая мощность волны, отраженной от противоположной поверхности

$$q(r) = \frac{\Delta P_\partial}{\Delta V} = \frac{P_0 e^{-2\alpha(r + 2r_c - 2r_0)} \cdot (1 - e^{-2\alpha\Delta r})}{4\pi r^2 \Delta r} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r + 2r_c - 2r_0)}}{2\pi r^2} \quad (63)$$

3.3 Термодинамический расчёт

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{D} = \varepsilon(T) \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu(T) \vec{E} \\ \vec{j} = \sigma(T) \vec{E} \\ \frac{\partial}{\partial t} (c(T) \cdot \rho(T) \cdot T) + (\vec{V} \cdot \nabla T) = \operatorname{div} (\lambda(T) \cdot \nabla T + q(T, \vec{E})) \end{array} \right. \quad (64)$$

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; ∇ – оператор Гамильтона; c_n – теплоёмкость нефтяной среды; ρ_n – плотность нефтяной среды; λ – теплопроводность нефтяной среды; t – время.

В случае нагрева покоящихся сред плотность, теплоёмкость и теплопроводность которых не зависит от температуры, уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид:

$$c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \operatorname{div} (\nabla T) + q(r) \quad (65)$$

При этом начальные условия для этого уравнения соответствуют распределению температуры в среде в начальный момент времени, а на границе задаются либо условия Неймана (тепловой поток через границу раздела сред), либо условия Дирихле (поддерживаемая температура).

В зависимости от ёмкости, содержащей в себе нагреваемое вещество, граничные условия и уравнения в частных производных удобно задавать в различных системах координат.

В сферических координатах:

$$\operatorname{div}(\nabla T) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2} \quad (66)$$

Температура не меняется по θ и по ϕ , поэтому вторые производные по этим координат равны нулю, следовательно

$$\operatorname{div}(\nabla T) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (67)$$

С учетом (52) и (67) получим уравнение теплопроводности (65) в сферических координатах:

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} \quad (68)$$

Отдельно стоит рассмотреть тепловое поле, создаваемое отраженной волной, тогда с учетом (59)

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)}}{2\pi r^2} \quad (69)$$

3.4 Численное моделирование

Аналитическое решение начально-краевой задачи для неоднородного уравнения теплопроводности не просто трудоёмко - зачастую, когда правая часть достаточно сложна, такое решение невозможно. Поэтому при исследовании подобных задач применяют численные методы, в частности, МКЭ. Они позволяют решать задачи для уравнений с частными производными с любой заданной точностью.

В диссертации задача нестационарной теплопроводности при наличии источников тепла, мощности которых определяются функциями (44), (52), (59), решалась с использованием программного комплекса MatLab R2019a с

приложением PDE modeler. Это приложение, в частности, является инструментом решения задач для уравнений параболического типа вида

$$d \cdot u_t'(t, x, y, z) - \operatorname{div}(c \cdot \operatorname{grad}(u(t, x, y, z))) + a \cdot u = f. \quad (70)$$

где d, c, a, f – функции координат.

Приложение PDE modeler позволяет решать двумерные задачи для уравнений в частных производных второго порядка в декартовых координатах методом конечных элементов. Обязательное требование к модели – описание в декартовых координатах – ограничивает возможности программы для решения уравнений (68) и (69), поскольку после прямого перехода от сферических координат к цилиндрическим, выражения (68) и (69), невозможно привести к виду выражения (70). Однако, как было указано выше, температура не меняется по θ и по ϕ , следовательно, выражения (68) и (69) могут быть переписаны в цилиндрической системе координат. Далее, вследствие того, что задача является осесимметричной, возможен формальный переход к декартовым координатам. Приведение выражений (68) и (69) к виду (70) представлено в приложении А.

Для решения задачи теплопроводности методом конечных элементов была построена конечно-элементная сетка (рисунок 28).

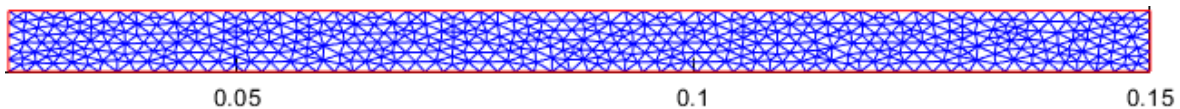


Рисунок 28 – Конечно-элементная сетка

Решение уравнения (68) для случая теплоизолированного тела представлено на рисунке 29.

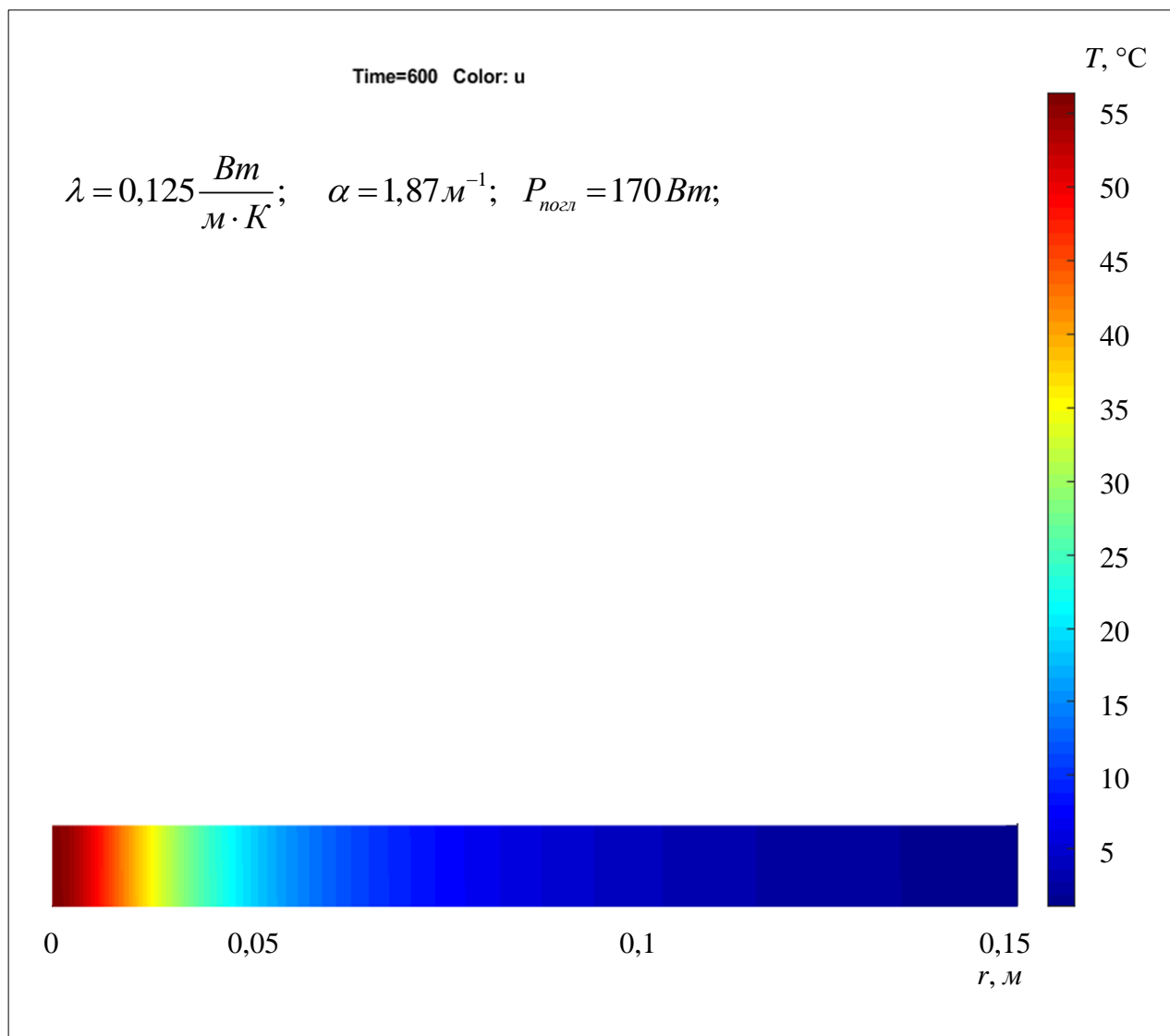


Рисунок 29 – Распределение температурного поля по радиусу при СВЧ
воздействии

Среднее значение температурного поля в случае теплоизолированного тела численно можно получить, неограниченно увеличивая коэффициент теплопроводности. В данном случае при $\lambda = \infty$ средняя температура составила 3,41 °С.

Для анализа эффективности процесса объёмного тепловыделения в сравнении с теплопередачей от источника аналогичного размера рассмотрим два варианта нагрева тела с начальной температурой $T_0 = 0$ °С:

1. Тепловой поток через сферическую поверхность радиусом r_0 равен

$$q_2 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{4\pi r_0^2}, \text{ то есть величина } q_2 \text{ при принятых значениях составляет}$$

порядка $3 \cdot 10^5$ Вт/м². Численное решение такой задачи показывает, что в этом случае происходит практически мгновенный перегрев пограничной области и многократное превышение температурных режимов нагрева любых нефтяных сред.

2. Сферическая поверхность радиусом r_0 в течение времени $t = 600$ с имеет постоянную температуру $T = 55$ °С, равную температуре пограничного слоя в конце периода СВЧ воздействия (рисунок 29). Численное решение даёт распределение температурного поля показанного на рисунке 30. Среднее значение температурного поля в момент времени t_1 в случае неизолированного тела численно можно получить в два этапа. На первом шаге поддерживается постоянная температура в течение времени t_1 . На втором задаются условия отсутствия теплообмена с внешней средой в течение времени t_2 . Причем при $t_2 \rightarrow \infty$ температура во всем объёме примет среднее значение. В данном примере средняя температура составила 0,23 °С. При сопоставлении температурных полей (рисунки 29 и 30) видно большую глубину прогрева СВЧ воздействием. Сравнивая средние значения температур, можно сделать вывод, что за тот же промежуток времени количество энергии, переданной в среду при СВЧ воздействии, в 14,8 раз больше, чем при теплопередаче.

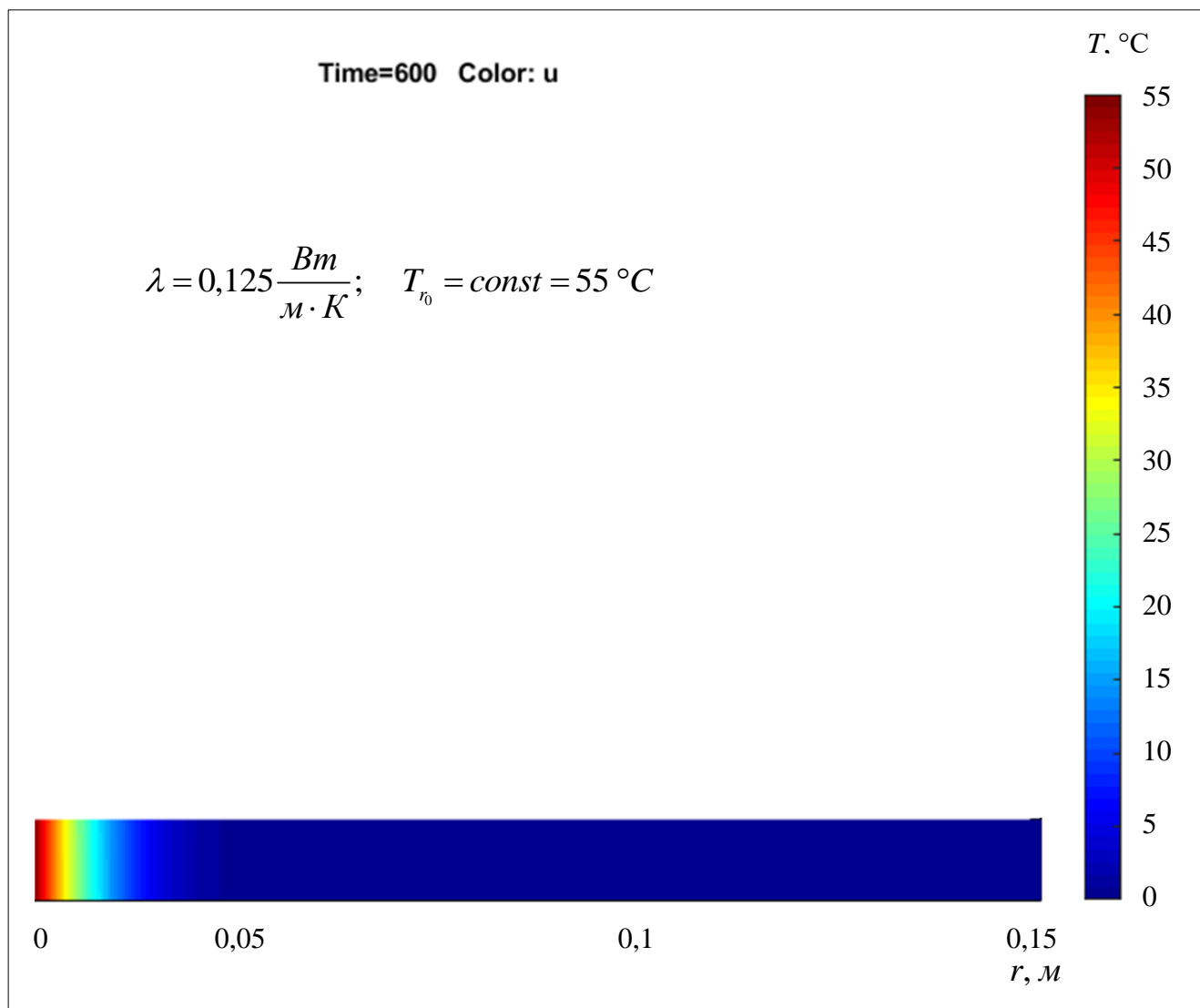


Рисунок 30 – Распределение температурного поля по радиусу при $T_{r_0} = 55 \text{ } ^\circ C$

3.5 Выводы по главе

1. Разработана математическая модель термодинамического процесса в нефтяной среде, облучаемой СВЧ ЭМ полем, создаваемым биконическим рупорным излучателем.
2. Построена математическая модель объёмного тепловыделения энергии СВЧ ЭМ поля, учитывающая направленное воздействие СВЧ ЭМ волн и волн, отраженных от стенок резервуара, создаваемого погружным излучателем.
3. Определены математические зависимости для удельной поглощаемой мощности от падающей и отраженных волн.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА НЕФТЯНОЙ СРЕДЫ БИКОНИЧЕСКИМ РУПОРНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

4.1 Критерии подобия аппаратов реструктуризации нефтяных дисперсных систем антенными излучателями СВЧ поля

Разработка методов проектирования аппаратов реструктуризации нефтяных дисперсных систем антенными излучателями СВЧ ЭМ поля нуждается в создании макетных моделей, позволяющих исследовать параметры протекающих в этих системах процессов. Возможность распространения результатов таких исследований на масштабы реальных производств и технологических процессов может быть установлена с помощью оценочных величин – критериев подобия.

Критерием подобия является одинаковое сочетание параметров подобных (физических или математических) явлений [13].

Критерии подобия аппаратов реструктуризации нефтяных дисперсных систем антенными излучателями ЭМ поля могут связывать довольно большой перечень параметров, таких как:

- количество НДС (масса, объём);
- длина ЭМ волны;
- температура;
- химический состав;
- продолжительность воздействия (время экспозиции);
- подобие распределения ЭМ поля;
- подобие распределения теплового поля;
- подобие распределения областей фазового перехода.

Согласно уравнениям распространения ЭМ волн классической электродинамики размер области распространения обратно пропорционален длине волны. В таком случае подобие распределения напряженностей ЭМ поля с длиной волны λ на расстоянии r для двух различных источников выражается как:

$$\frac{r_1}{\lambda_1} = \frac{r_2}{\lambda_2}$$

Однако, такое соотношение не является достаточным. Одной из причин перспективности использования ЭМ воздействия на нефтяные дисперсные системы является зависимость электрофизических параметров среды от частоты ЭМ поля. Таким образом, подобное равенство не является условием подобия физических процессов внутри среды (тепловыделение, компонентная реструктуризация, снижение вязкости).

С другой стороны, натурные испытания для малых частот порядка 10 МГц сопряжены с трудностью создания экспериментальных стендов, в пределах которых ЭМ волна передаст свою энергию в среду. Для реализации такого процесса необходимо иметь дело с характерными размерами объекта порядка 10 метров.

Таким образом, можно заключить, что существующие методы подобия ограничивают проведение макетных экспериментов на других частотах ввиду отсутствия физического обоснования существования подобной частоты воздействия. Натурные эксперименты имеют большие трудности при практической реализации. Однако, ряд исследователей, например [116], всё же прибегает проведению модельного эксперимента на частоте, существенно выше оптимальной для данной среды.

СВЧ излучение существенно влияет на такую физическую характеристику нефтяной дисперсной среды, как вязкость, и практически не влияет на теплоёмкость, теплопроводность. Это позволяет при построении математической модели процесса решать ЭМ задачу независимо от тепловой модели. При этом, действие СВЧ излучения, следует учитывать в виде распределенного источника тепла, получаемого от поглощения СВЧ излучения, функция распределения которого определяется из решения ЭМ постановки задачи.

4.2 Проблемы методов исследования процессов, протекающих в нефти под воздействием ЭМП

Большинство исследований влияния ЭМП на нефтяную среду содержит следующие этапы:

1. Исследование параметров необлученной среды.
2. Воздействие ЭМ поля на среду.
3. Исследование параметров облученной среды.

Перспективным направлением является исследование параметров среды непосредственно во время воздействия ЭМП. В [112] описан экспериментальный стенд, который позволяет проводить оптическое наблюдение микроструктуры водонефтяной эмульсии. Однако разработка способов и устройств, которые могут осуществлять измерение параметров среды, имеет ряд трудностей. Например, для измерения температуры невозможно использовать терморезисторы, имеющие металлические элементы, ввиду перераспределения ими ЭМП. Для измерения вязкости невозможно использовать совершенные, технологически целостные ротационные вискозиметры, обладающие высокой точностью измерений, так как не представляется возможным подведения ЭМП в их рабочую полость.

Для оптического наблюдения тепловых процессов создание экспериментального стенда сопряжено с проблемой обеспечения безопасности наблюдателя.

Для оценки допустимого уровня ЭМ излучения используется критерий допустимой энергетической экспозиции (ЭЭ) [89]. В частности, для диапазона частот 300 МГц – 300ГГц ЭЭ не должна превышать $200 \text{ мкВт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$. При продолжительности воздействия 8 часов и более допустимый уровень плотности потока энергии составляет $25 \text{ мкВт}/\text{см}^2$.

4.3 Ёмкость безопасного экспериментального стенда для исследования воздействия ЭМП на нефтяную среду

Анализ тепловых процессов следует проводить по графическому представлению изотерм в цвете, содержащих информацию о температурном поле на поверхности объекта. Такие изображения могут быть получены тепловизорами, которые обрабатывают данные о потоке ЭМП инфракрасного диапазона.

Таким образом, для наблюдения тепловизором температуры в процессе нагрева необходимо, чтобы стенка ёмкости была одновременно прозрачна инфракрасному излучению и отражала сверхвысокочастотное ЭМП.

Для экранирования в области высоких частот используются клетки Фарадея [105], представляющие собой металлическую решетку, размер проёма ячейки которой на порядок меньше длины волны.

Рабочей частоте магнетрона 2450 МГц соответствует длина волны 122 мм. Поэтому для обеспечения экранирующего эффекта необходимо использовать решетку с размером проёма ячейки не более 12 мм. Данный размер значительно превосходит длину волны инфракрасного излучения, находящейся в диапазоне от 0,74 мкм до 2 мм. Следовательно, решетка с размером ячейки не более 12 мм позволяет проводить измерения тепловизором.

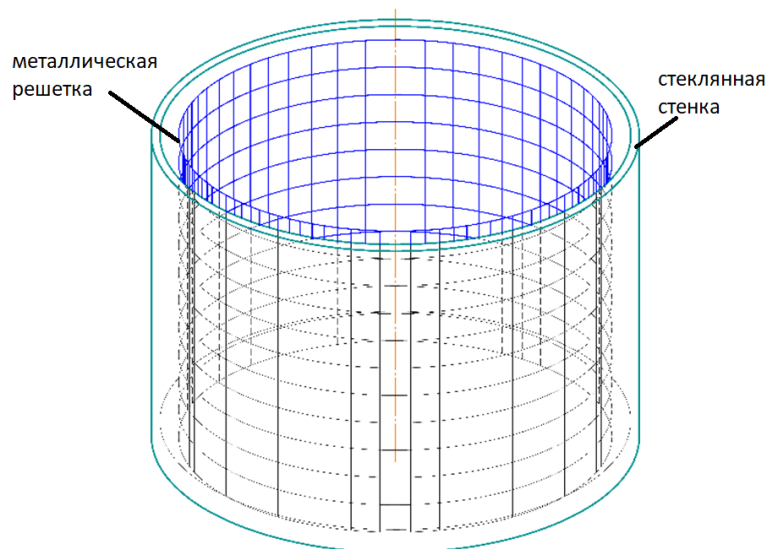


Рисунок 31 – Схема оптически прозрачной и радио непрозрачной ёмкости.

Ёмкость экспериментального стенда, позволяющая безопасно для наблюдателя осуществлять измерение тепловизором, может быть выполнена в виде двухстеночной конструкции, состоящей из металлической сетки для удержания электромагнитного поля и стеклянной стенки для хранения жидкости (рисунок 31).

4.4 Описание экспериментальной установки

Изучение применимости технологии СВЧ ЭМ воздействия на нефть и нефтешламы проводилось на сконструированном экспериментальном макете, состоящем из излучателя, источника СВЧ энергии, коаксиального кабеля и ёмкости.

Биконическая антенна, являющаяся излучателем (рисунок 32), имеет высоту 5 см. Она помещалась в диэлектрик из Ф-4 для исключения непосредственного контакта между поверхностью излучателя и нефтяной средой.



Рисунок 32 – Биконическая антенна

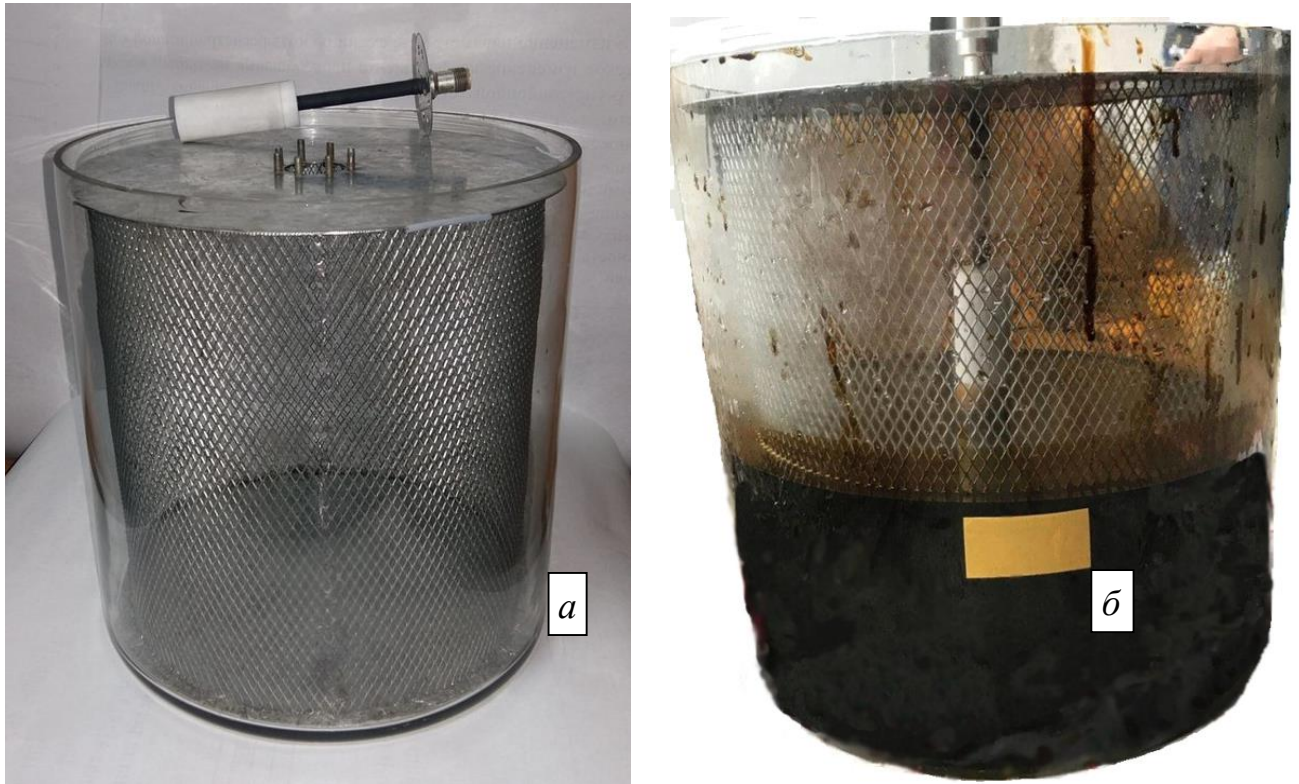
Ёмкость состояла из стеклянного бака диаметром 30 см, высотой 30 см и помещенного в него сетчатого экрана с характерным размером ячейки 6 мм. Описанная система заполнялась исследуемой средой (рисунок 33) в количестве $V=7$ л.

СВЧ установка, питающая излучатель (рисунке 34), состоит из генератора СВЧ излучения – магнетрона на 2450 МГц с максимальной мощностью 700 Вт, короткозамыкателя, преобразующего поток ЭМП из волновода в коаксиальный кабель, систем питания и охлаждения.

Установка не имела дополнительных устройств поглощения энергии (развязка Фарадея и т.п.). Нагрев короткозамыкателя не наблюдался. Были

зафиксированы незначительные потери тепловой энергии в разъёмах, измерение которых не проводилась. В установке использовался кабель марки РК-50-13-17 длиной 3 метра с коэффициентом затухания $\alpha_{каб} = 0,5 \text{ дБ/м}$.

КСВ биконического рупорного излучателя, измеренный векторным анализатором СВЧ цепей, составил 1,5, что соответствует потере мощности 4%. Мощность, подводимая в среду, равнялась $N=400 \text{ Вт}$.



а – пустой; б – наполненный нефтью и нефтешламом.
Рисунок 33 – Радионепроницаемый цилиндр в ёмкости

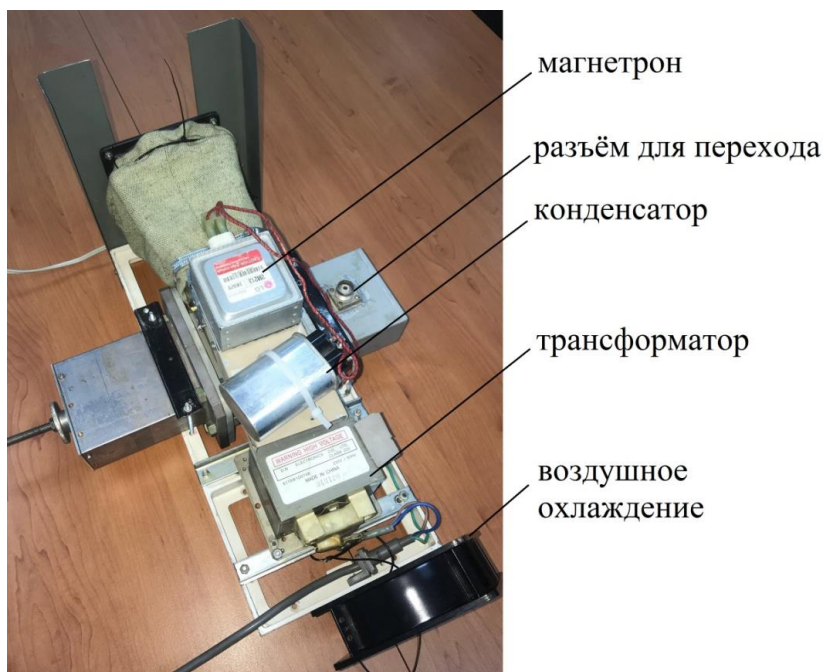


Рисунок 34 – СВЧ установка и её составляющие

4.5 Экспериментальное измерение температурного поля нефтяной среды, нагреваемой СВЧ ЭМ полем

С помощью описанного выше макета был проведен эксперимент по нагреву нефти. Результаты были зафиксированы тепловизором FLIR E50 (рисунки 35, 36). 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.

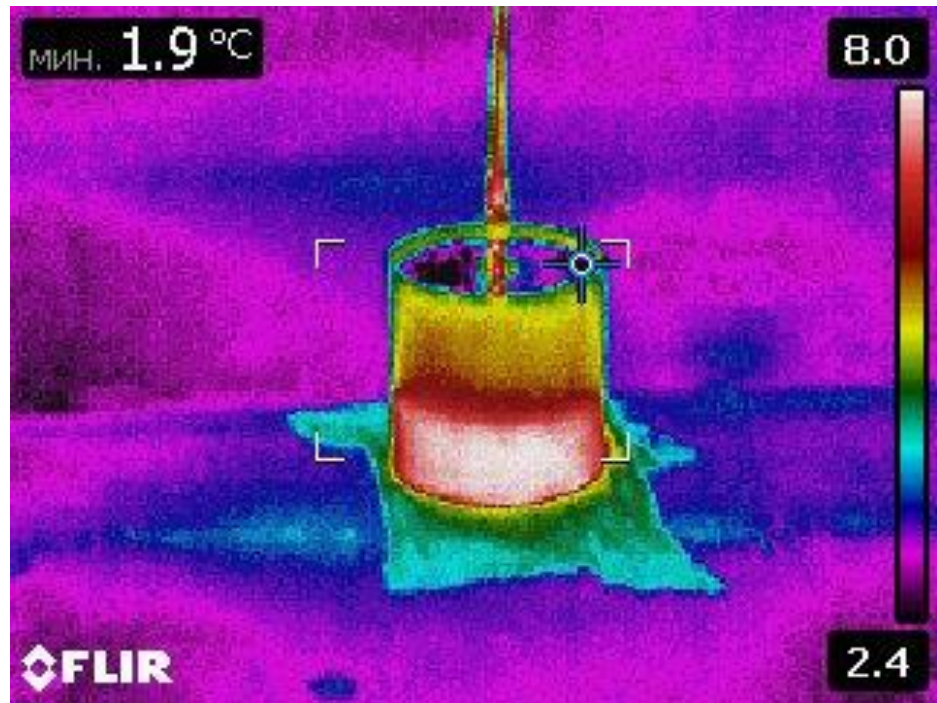


Рисунок 35 – Распределение температуры в среде до включения установки

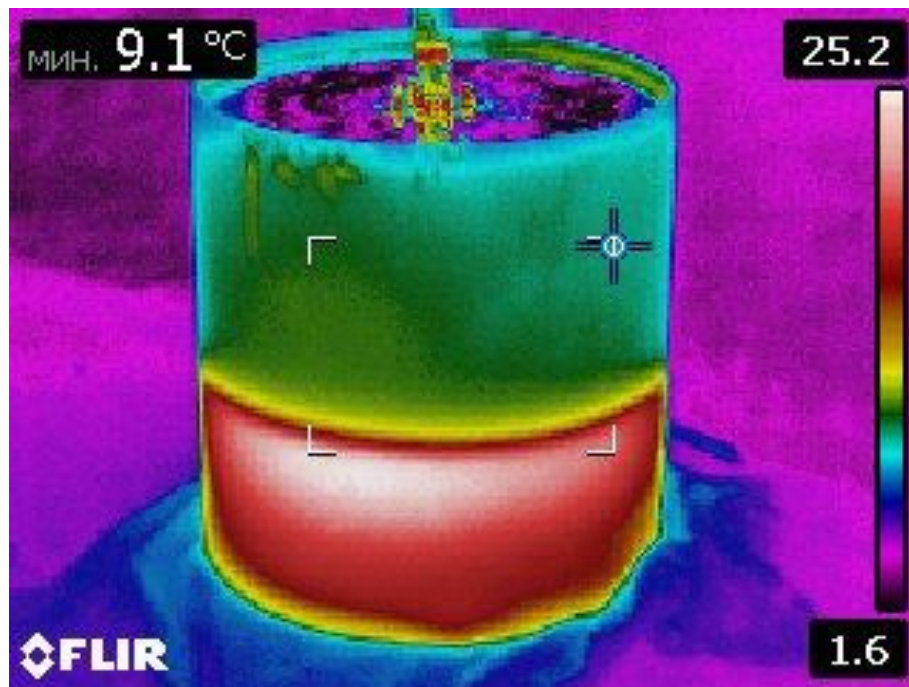


Рисунок 36 – Распределение температуры в среде спустя 12 минут работы установки.

4.6 Моделирование эксперимента по нагреву нефтяной среды, нагреваемой СВЧ ЭМ полем

4.6.1 Расчётные параметры

Для проверки адекватности математической модели проведено численное моделирование описанного выше эксперимента.

Для определения значений параметров, входящих в уравнение (68) воспользуемся расчетной схемой (рисунок 37). На рисунке обозначены температура нефти, стекла и воздуха T_n , T_c , T_v соответственно.

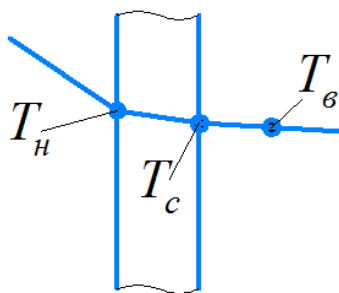


Рисунок 37 – Схема к определению коэффициента теплоотдачи

Плотность теплового потока

$$q = k(T_n - T_c) \quad (71)$$

Коэффициент теплопередачи многослойной стенки определяется как [30]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}}, \quad (72)$$

где δ – толщина стеклянной стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности стеклянной стенки $Вт/(м \cdot К)$;

α_n – коэффициент теплоотдачи нефти, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

α_v – коэффициент теплоотдачи воздуха, $Вт/(м^2 \cdot К)$.

Число Нуссельта определяется как соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности

$$Nu_l = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{q_c}{q_\lambda} \quad (73)$$

где l – характерный размер, м;

$\lambda = 1,38 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коэффициент теплопроводности среды;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;

q_c – плотность теплового потока за счёт конвекции $\text{Вт}/\text{м}^2$;

q_λ – плотность теплового потока за счёт теплопроводности $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Выражая из (73) коэффициент теплоотдачи, получим

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_l \lambda}{l} \quad (74)$$

Число Нуссельта является функцией числа Рэлея Ra и числа Прандтля Pr :

$$\text{Nu}_l = 0,68 + \frac{0,67 \text{Ra}_l^{1/4}}{[1 + (0,492 / \text{Pr})^{9/16}]^{4/9}}, \quad \text{Ra}_l \leq 10^9 \quad (75)$$

Число Рэлея определяется как

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \chi}, \quad (76)$$

где $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения;

β – коэффициент теплового расширения жидкости, К^{-1} .

ΔT – разность температур между стенками и жидкостью, К ;

L – характеристический размер области жидкости, м ;

ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\chi = \lambda / (\rho c)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Число Прандтля

$$Pr = \nu / \chi \quad (77)$$

где $\nu = \eta / \rho$ – кинематическая вязкость;

η – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

Значения указанных выше теплофизических величин и параметров приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Расчетные параметры

Параметр	Нефтешлам	Воздух
$L, м$	0,15	0,155
$\Delta T, ^\circ C$	20	12
$\nu, м^2/с$	22	$14,16 \cdot 10^6$
β, K^{-1}	$8,31 \cdot 10^{-4}$	$3,665 \cdot 10^{-3}$
$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	0,125	0,0251
$\rho, кг/м^3$	900	1,247
$c, Дж/(кг \cdot K)$	1500	1005

По данным таблицы 10 и формулам (74) - (77) определены $\alpha_n = 2,83 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$ и $\alpha_g = 4,72 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$. Далее по (71) - (72) находим коэффициент теплопередачи $k = 1,755 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$ и плотность теплового потока $q = 31,6 \text{ Вт}/м^2$.

4.6.2 Численное моделирование эксперимента

При моделировании учитывалась энергия, передаваемая от падающей, отраженной, и отраженной от противоположной стенки волн. Таким образом, уравнение нестационарной теплопроводности (65) с учётом (52), (59), (63) имеет вид:

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)}}{2\pi r^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r+2r_c-2r_0)}}{2\pi r^2} \quad (78)$$

Преобразовывая (78), получим

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \frac{P_0 \alpha}{2\pi r^2} \left(e^{-2\alpha r} \left(e^{2\alpha r_0} + e^{-2\alpha(2r_c-2r_0)} \right) + e^{-2\alpha(2r_c-r-r_0)} \right) \quad (79)$$

Для решения задачи для уравнения (79) МКЭ использовалась конечно-элементная сетка содержащая 4280 узлов и 8356 конечных элементов треугольного типа (рисунок 38).

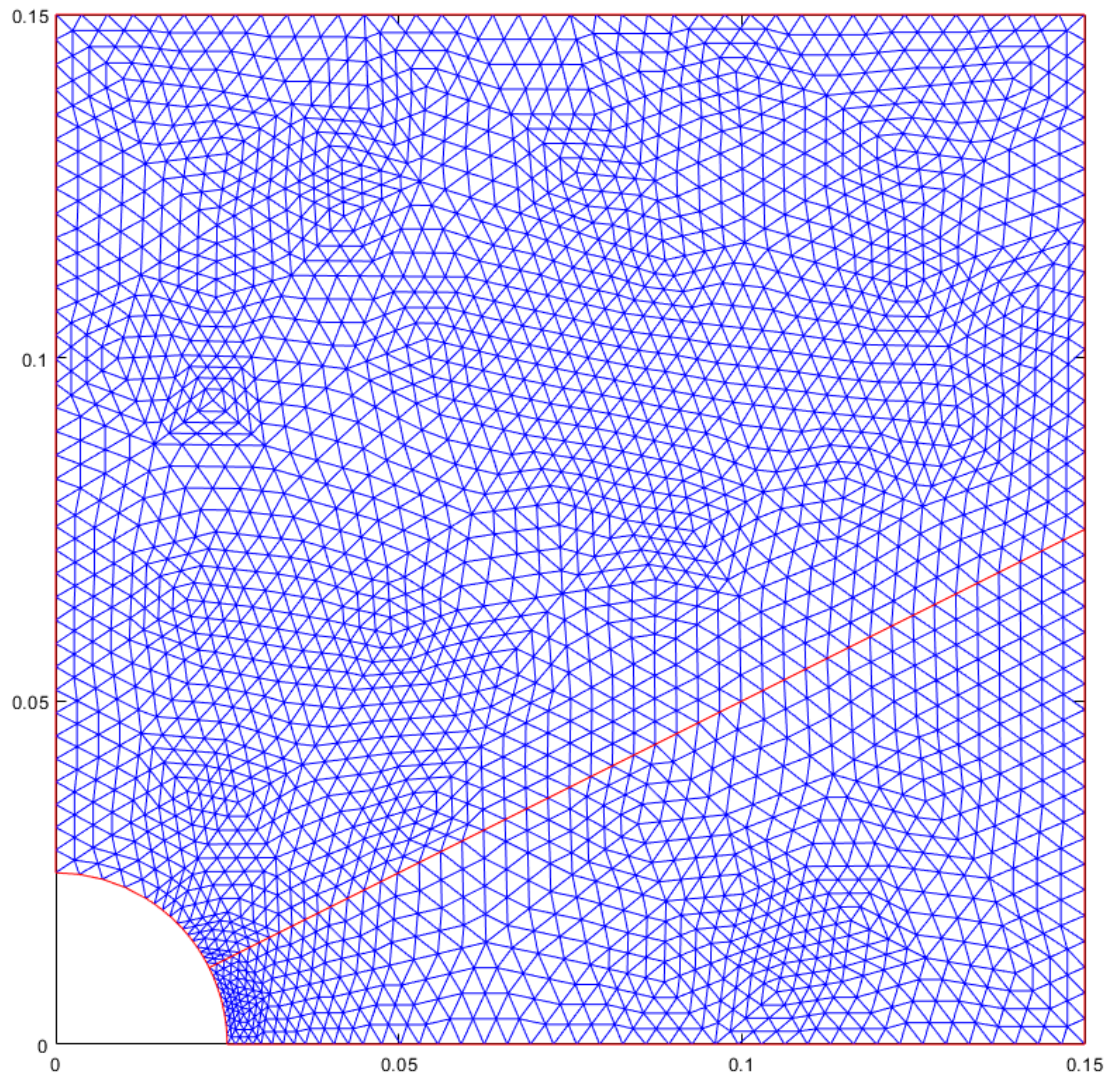


Рисунок 38 – Конечно-элементная сетка

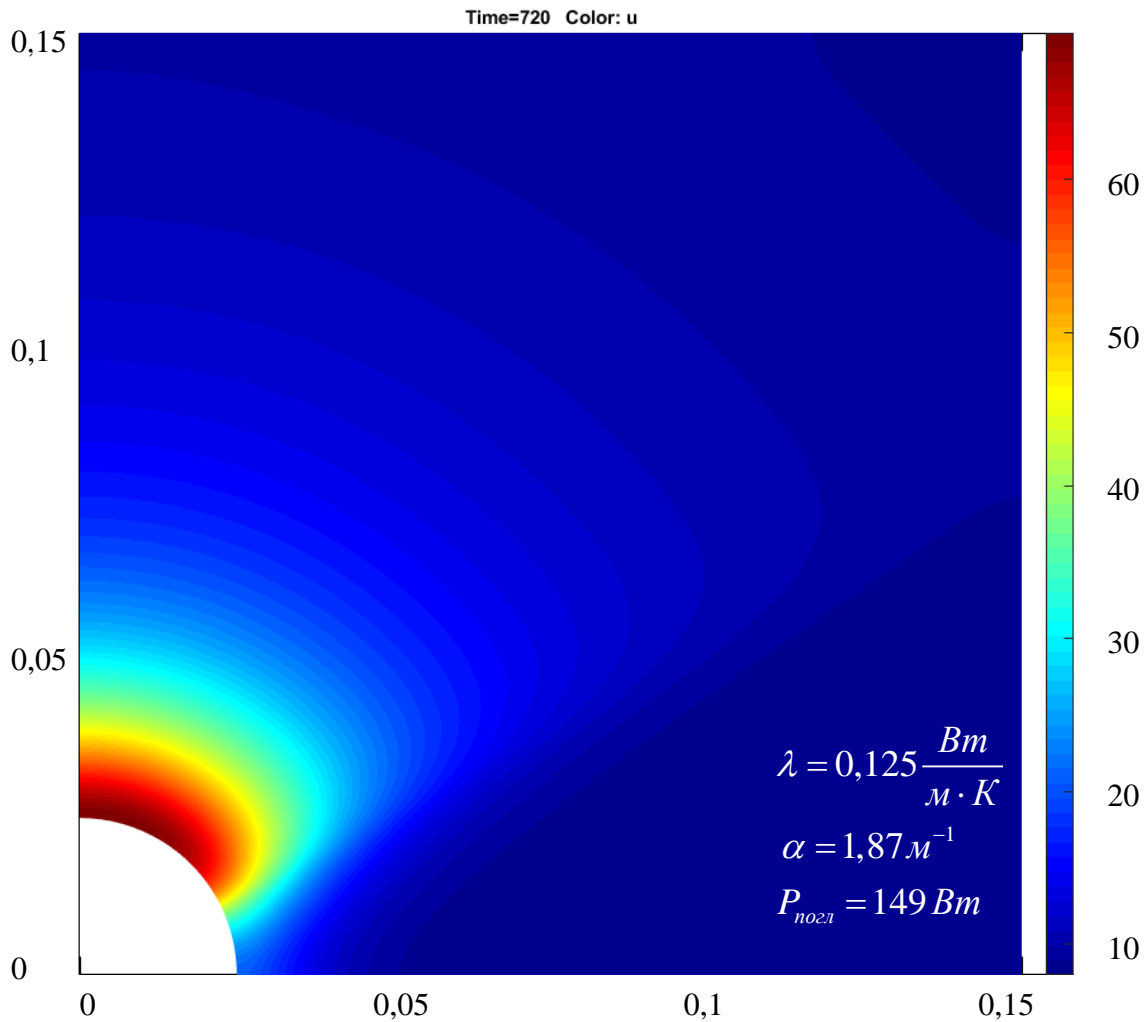


Рисунок 39 – Тепловое поле от падающей волны

На рисунке 39 показано тепловое поле от падающей волны для теплоизолированного тела. Рисунок 40 показывает распределение температуры от падающей, отраженной и отраженной от противоположной стенки волн с учетом граничных условий. Среднее значение температуры через 720 с. определено при $\lambda \rightarrow \infty$ (рисунок 41) и составило 22,5 °С.

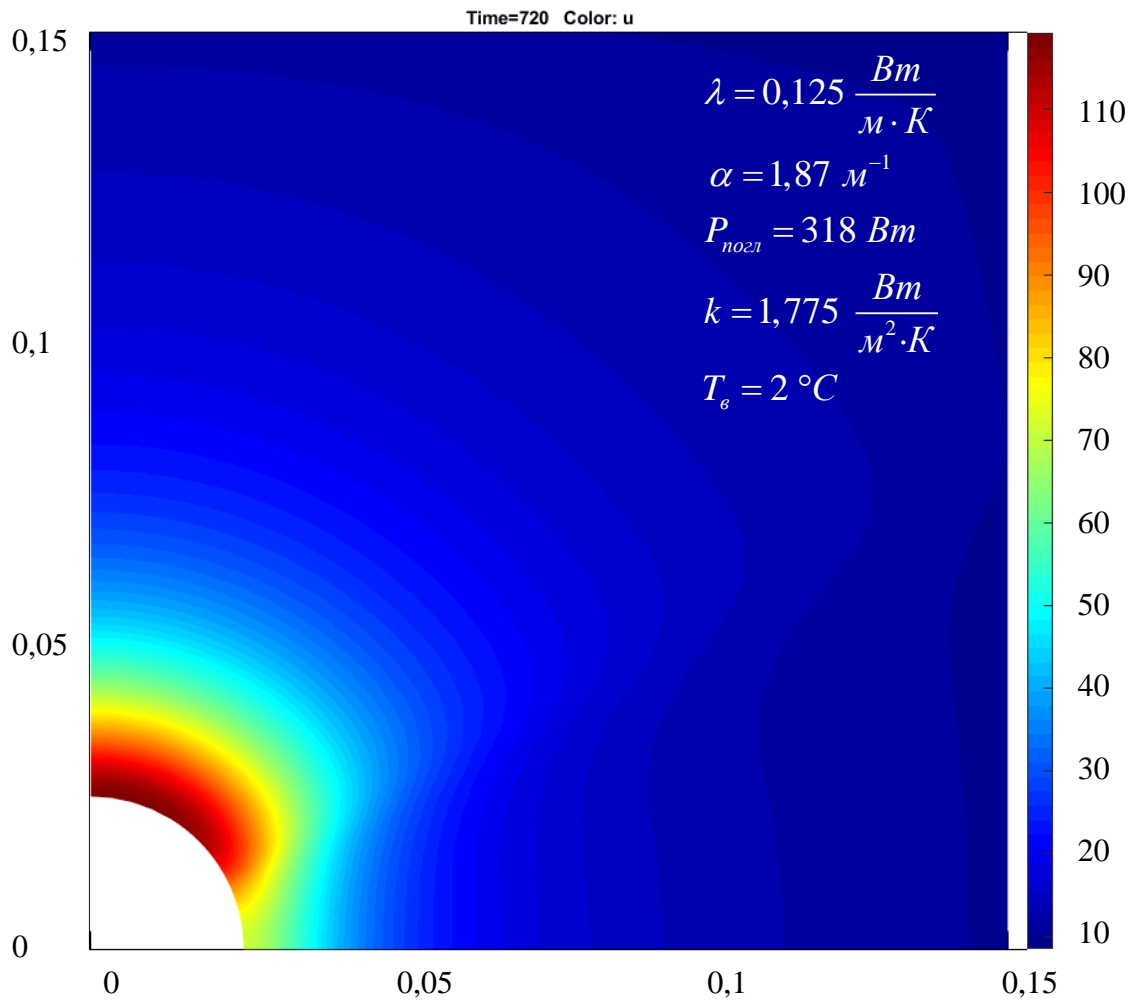


Рисунок 40 – Тепловое поле от падающей, отраженной и отраженной от противоположной стенки волн

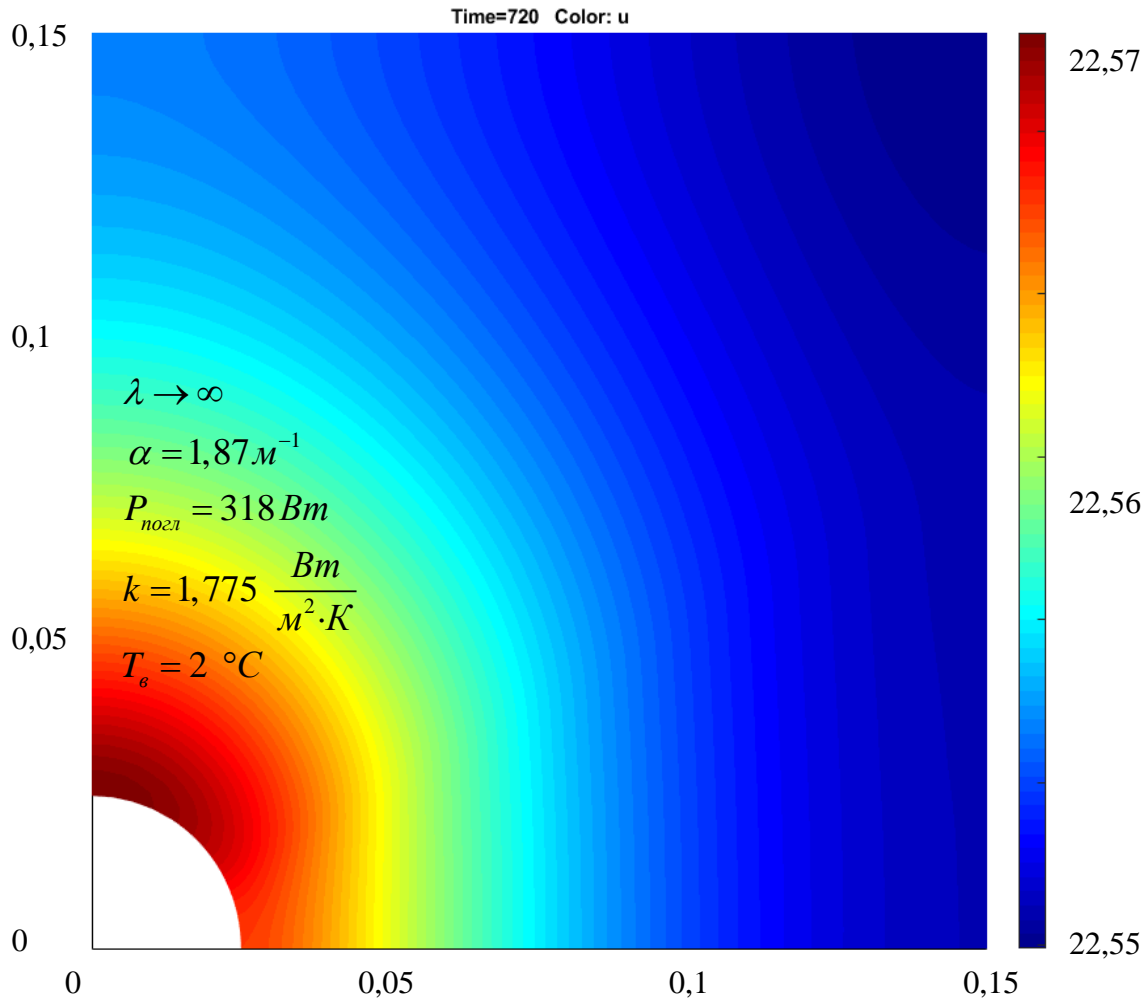


Рисунок 41 – Средняя температура

4.7 Проверка адекватности соответствия математической модели экспериментальным данным

В таблице 11 и на рисунке 42 представлены средние значения температур $T_{cp}^{теор}$ по (79) и по результатам экспериментов в зависимости от времени. Дисперсия параллельных опытов S_i определялась выражением:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (T_i - T_{cp})^2}{m - 1}, \quad (80)$$

где T_i – температура нефтяной среды в i -ом опыте;

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{m} \text{ – среднее значение температуры нефтяной среды в } i\text{-ом опыте;}$$

$m = 3$ – количество параллельных опытов.

Относительная погрешность определения температуры ΔT определялась как

$$\Delta T = \frac{T_{cp}^{эксп} - T_{cp}^{теор}}{T_{cp}^{теор}} \cdot 100\% \quad (81)$$

Таблица 11 – Средняя температура нефтяной среды

$t, \text{сек}$	$T_{cp}^{теор}$	$T^{эксп}$					$\Delta T, \%$
		$T_1^{эксп}$	$T_2^{эксп}$	$T_3^{эксп}$	$T_{cp}^{эксп}$	S_i^2	
60	8,2	7,6	8,3	8,7	8,2	0,30	6,52
120	9,5	9,2	9,8	9,8	9,6	0,11	2,86
180	10,8	10,2	11,6	11,5	11,1	0,63	3,42
240	12,1	11,8	13,2	14,0	13,0	1,32	1,55
300	13,4	14,5	15,1	14,8	14,8	0,09	4,96
360	14,7	14,7	16,5	16,5	15,9	1,15	3,92
420	16,0	15,8	16,9	18,0	16,9	1,21	2,42
480	17,3	17,0	19,3	20,4	18,9	3,00	6,78
540	18,6	18,0	19,8	21,6	19,8	3,18	4,76
600	19,9	21,5	23,1	24,0	22,9	1,63	13,13
660	21,2	22,5	24,9	25,2	24,2	2,17	13,10
720	22,5	22,9	26,2	26,5	25,2	3,87	12,00

Так как на результат такого эксперимента влияет большое количество факторов, то принято допущение, что выходная величина, т.е. температура нефтяной среды, имеет нормальный закон распределения. Кроме того, математическое ожидание теоретических значений также имеет нормальное распределение. Таким образом, для оценки адекватности модели необходимо проверить соизмеримость дисперсий двух случайных величин, распределенных по нормальному закону распределения с одинаковым математическим ожиданием. Для проведения такого анализа экспериментальных данных используется модель статистического критерия Фишера, основное неравенство которого имеет следующий вид

$$F_p < F_T, \quad (82)$$

где F_p – расчетное значение критерия Фишера;

F_T – теоретическое значение критерия Фишера.

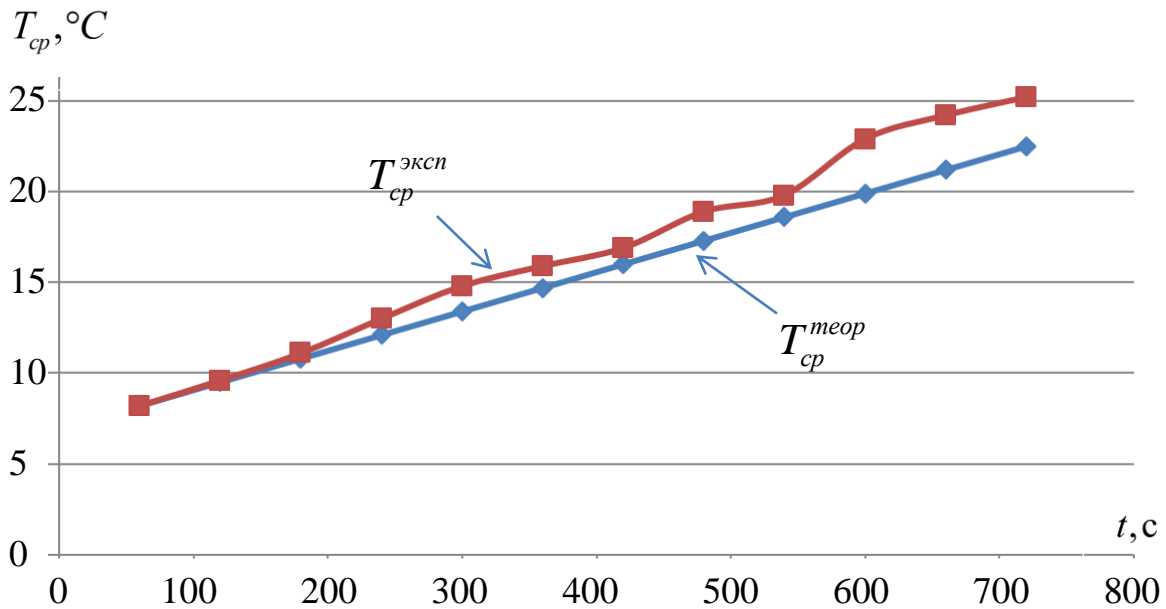


Рисунок 42 – Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Расчетное значение критерия Фишера есть отношение дисперсий адекватности и повторяемости

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\epsilon}^2}, \quad (83)$$

где S_{ad}^2 – дисперсия адекватности;

S_{ϵ}^2 – дисперсия повторяемости.

Дисперсия повторяемости определяется как

$$S_{\epsilon}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m S_i^2 \{T_{cp}\}}{N}, \quad (84)$$

где S_i – дисперсия параллельных опытов;

$N=12$ – количество измерений в опыте.

Проверка гипотезы об однородности дисперсии осуществляется в соответствии с критерием Кохрена

$$G_p < G_T, \quad (85)$$

где G_T – теоретическое значение критерия Кохрена;

G_p – расчетное значение критерия Кохрена, определяемое по формуле

$$G_p = \frac{\max(S_i^2 \{T_{cp}\})}{\sum_{i=1}^N (S_i^2 \{T_{cp}\})}. \quad (86)$$

Теоретическое значение критерия Кохрена G_T , согласно [23], определяется по таблице с учетом двух параметров:

$$f_1^G = m, \quad (87)$$

$$f_2^G = N \cdot (m - 1), \quad (88)$$

где f_1^G – первое число степеней свободы;

f_2^G – второе число степеней свободы.

По формулам (86), (87) и (90) находим: $G_p = 0,208$, $f_1^G = 3$ и $f_2^G = 24$. По таблице [23] теоретическое значение критерия Кохрена составляет $G_T = 0,235$.

Таким образом, условие $G_p < G_T$ выполняется, значит, отсутствуют грубые промахи при проведении эксперимента, а, следовательно, гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Дисперсия адекватности теоретической модели определяется как

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (T_i^{эксн} - T_i^{теор})^2}{N - 1}. \quad (89)$$

Теоретическое значение критерия Фишера F_T , согласно [20], определяется по таблице по двум параметрам:

$$f_1 = N - 1, \quad (90)$$

$$f_2 = N \cdot (m - 1), \quad (91)$$

где f_1 – число степеней свободы распределения с большей дисперсией;

f_2 – число степеней свободы распределения с меньшей дисперсией.

В соответствии с (90) и (91) находим: $f_1 = 11$, $f_2 = 24$. По таблице [23] теоретическое значение критерия Фишера составляет $F_T = 2,3$.

По формуле (89) и таблице 11 имеем: $S_{ad}^2 = 3,14$. Тогда из (84), (83) получаем $S_e^2 = 1,55$ и $F_p = 2,02$. Следовательно, условие (82) выполняется. Таким образом, можно сделать вывод об адекватном соответствии математической модели экспериментальным данным.

4.8 Методика расчёта теплового режима нефтяной среды, облучаемой биконическим рупорным излучателем

На основании проделанного теоретического исследования и практического подтверждения адекватности математической модели составлена методика расчета теплового режима нефтяной среды, облучаемой биконическим рупорным излучателем. Расчетные формулы методики учитывают электрофизические и термодинамические свойства нефтяной среды и главным образом позволяют решать следующие задачи:

1. При заданном максимально технологически допустимом времени нагрева и количестве излучателей определить температурное поле после (а также в процессе) нагрева.
2. Итерационным способом определить количество излучателей, необходимых для создания заданных параметров температурного поля за установленное время.
3. Рассчитать необходимое время воздействия имеющимися излучателями для создания заданного температурного поля.

Исходные данные:

C – теплоёмкость НДС, $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$;

ρ – плотность НДС, $кг/м^3$.

f – частота электромагнитного поля НДС, $Гц$;

ε – диэлектрическая проницаемость НДС на частоте f ;

$tg \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь НДС на частоте f ;

V – объём НДС, $м^3$;

ΔT – требуемый перепад температур, $^\circ C$;

t^{\max} – максимально технологически допустимое время нагрева, $с$.

L – характерный размер ёмкости для хранения НДС, $м$.

r_0 – радиус сферического пояса биконического рупорного излучателя;

P_0 – мощность излучателя.

Коэффициент α затухания волны в среде найдем по формуле:

$$\alpha = \frac{\pi f \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{c}, \quad (92)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Характерный радиус зоны облучения биконическим рупорным излучателем из условия двукратного затухания проходящей мощности:

$$R = -\ln(1/2)/(2\alpha). \quad (93)$$

Выражение для определения поглощаемой мощности, излучаемой одним устройством

$$P_{\partial} = (1 - e^{-2\alpha(R-r_0)})P_0$$

Выражение для удельной поглощаемой мощности от падающей волны

$$q_n = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r-r_0)}}{2\pi r^2} \quad (94)$$

Данное выражение (94) достаточно для дальнейшего расчёта в случае использования устройства в амбарах, пластмассовых контейнерах, ёмкостях со свободной поверхностью, а также внутри прочих конструкциях резервуаров и ёмкостях с радиопрозрачным материалом стенок. Для прочих конструкций, в том числе для ёмкостей для которых выполняется условие $\frac{0,5L}{R} \approx 1$, необходимо дополнительно использовать выражение удельной поглощаемой мощности отраженной волны

$$q^* = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(L-r-r_0)}}{2\pi r^2}.$$

Для металлических ёмкостей, у которых выполняется условие $\frac{0,5L}{R} < 1$, также стоит учитывать удельную поглощаемую мощность волны, отраженной от противоположной поверхности

$$q^{**} = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(r+L-2r_0)}}{2\pi r^2}.$$

Температурное поле, возникающее в нефтяной среде через максимально технологически допустимое время нагрева, определяется из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q + q^* + q^{**} \quad (95)$$

Как было описано выше, выражения q^* и q^{**} могут принимать нулевые значения в зависимости от конструкции ёмкости. Решение задачи для уравнения (95) можно получить численно, например методом конечных элементов в MatLab.

Для ёмкостей, в которых высота столба жидкости не превосходит величину $2R$ и выполняется условие $\frac{0,5L}{R} \gg 1$, целесообразно использование нескольких устройств на расстоянии $2R$. В таком случае количество биконических рупорных излучателей определяется как

$$n = 0,5L / R .$$

В случае, если высота столба жидкости значительно превосходит величину $2R$, то количество излучателей определяется по соотношению

$$n = 4V / (3\pi R^3) .$$

Если при решении уравнения (95) за время t^{\max} перепад температур не достиг значения ΔT , то необходимо увеличить число устройств n , расположив их на расстоянии l ($l < R$). Тогда передаваемая мощность от рядом расположенного устройства

$$q^* = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(l-r-r_0)}}{2\pi r^2} . \quad (96)$$

Далее используя (96), вновь решается задача нестационарной теплопроводности (95). Величина l в данном случае является варьируемым параметром.

Типовая технологическая карта удаления донных отложений, не пригодных для трубопроводного транспорта, представлена в таблице 12.

Таблица 12 – Типовая технологическая карта

Операция	Регламент	Оборудование
Измерение уровня донных отложений	ОР-23.020.00-КТН-111-13	Рулетка с измерительным лотом
Размыв донных отложений	ОР-23.020.00-КТН-111-13	Устройства типа «Диоген»
Дегазация резервуара	ОР-23.020.00-КТН-0230-21	Оборудование для определения концентрации веществ, вентиляционное оборудование, газоотводные трубы
Определение площади застойных зон	–	Акустическое профилирование компании Tradebe Refinery Services
Определение количества погружных излучателей	Предлагаемая методика расчёта	Программный комплекс MatLab R2019a
Установка оборудования для СВЧ нагрева и откачки разжиженных нефтяных шламов	–	Погружные СВЧ нагреватели, мобильный контейнер для транспортировки, временный полевой трубопровод, насос
Разжижение донных отложений	–	Погружные СВЧ нагреватели
Откачка разжиженных донных отложений	ОР-23.020.00-КТН-0230-21	Временный полевой трубопровод, насос
Транспортировка донных отложений к месту переработки	–	Мобильный контейнер

4.9 Выводы по главе

1. Проведена апробация работы аппарата СВЧ нагрева нефтяной дисперсной системы на основе биконического рупорного излучателя; показана его работоспособность и эффективность.
2. Экспериментально подтверждено, что математическая модель адекватно описывает термодинамический процесс в нефтяной среде, облучаемой сверхвысокочастотным ЭМП, создаваемым биконическим рупорным излучателем.
3. Разработана методика расчета теплового режима нефтяной среды, облучаемой биконическим рупорным излучателем.

4. Предлагаемый метод применим как в РВС так и в земляных амбарах (удобен для утилизации пастообразных закоксовавшихся нефтепродуктов на месте «старых» порывов промысловых нефтепроводов).

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АСПО – асфальтосмолопарафиновые отложения;
- ВНЭ – водонефтяная эмульсия;
- ВСМА – виброструйная магнитная активация;
- ВЧ – высокочастотное;
- КСВ – коэффициент стоячей волны;
- КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- НКТ – насосно-компрессорная труба;
- НМСВЧ – нагревательный модуль сверхвысоких частот;
- НС – нефтяная среда;
- НДС – нефтяная дисперсная система;
- ПАВ – поверхностно-активные вещества;
- ПДВК – предельно допустимая взрывобезопасная концентрация;
- ПРП – приемо-раздаточные патрубки;
- РВС – резервуар вертикальный стальной;
- РВСП – резервуар вертикальный стальной с понтоном;
- РВСПК – резервуар вертикальный стальной с плавающей крышей;
- СВЧ – сверхвысокочастотное;
- СПВК – сопло погружное веерное кольцевое;
- ТМС – техническое моющее средство;
- УВС – углеводородсодержащие;
- УФ – ультрафиолетовое (излучение);
- ЭМ – электромагнитное;
- ЭМП – электромагнитное поле;
- ЭЭ – энергетическая экспозиция.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллина, В. А. Расплавление твердых отложений в трубопроводах движущимся источником электромагнитного поля / В. А. Абдуллина, М. А. Фатыхов // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело.” – 2012. – № 6. – Р. 60–68.
2. Автоматизированная очистка нефтяного резервуара. VLABO от ORECO. Режим доступа: [http:// www.oreco.com](http://www.oreco.com). закрытый. – Загл. с экрана.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
4. Алиев, Р. А. Влияние углеводородных разбавителей на вязкость высокозастывающих нефтей / Р. А. Алиев, Э. М. Блейхер, В. Н. Дегтярев // НТС. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1968. – № 4.
5. Анализ возможности применения электромагнитного излучения в трубопроводном транспорте высоковязкой нефти / В. А. Иванов, О. В. Прямоносков, В. П. Кисмерешкин, А. Ф. Секачев // Трубопроводный транспорт углеводородов : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с . – (Омск, 30-31 октября 2018). С. 7–12, .
6. Анализ эффективности передачи в нефтяные среды энергии / А. Ф. Секачев, В. В. Шалай, Р. Н. Иванов [et al.] // Территория Нефтегаз. – 2021. – № 9-10. – Р. 74–79.
7. Ануфриев, Р. В. Влияние ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства и состав нефтяных дисперсных систем : специальность 02.00.13 «Нефтехимия» : дис. ... канд. хим. наук / Р. В. Ануфриев. – Томск, 2017. – 170 с.
8. Анфиногентов, В. И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 05.12.07 «Антенны, СВЧ - устройства и их технологии» : дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Анфиногенов ; Казан. гос. техн. ун-

т им. А. Н. Туполева. – Казань, 2006. – 340 с.

9. Архангельский, Ю. С. Проектирование методической СВЧ электротермической установки для нагрева жидкости в потоке при ламинарном течении / Ю. С. Архангельский, В. О. Юдина // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 2 (23). – Р. 5–12.

10. Бабалян, Г. А. Физико-химические процессы в добыче нефти / Г. А. Бабалян. – Москва : Недра, 1974. – 199 р.

11. Барышников, А. А. Электромагнитное воздействие как средство повышения нефтеотдачи / А. А. Барышников, А. В. Стрекалов, А. М. Ведменский ; Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Тюмень : Изд-во ТюмГНУ, 2014. – 127 с. – ISBN 978-5-9961-0846-6.

12. Верховых, А. А. Обзор работ по воздействию ультразвука на нефтяные системы / А. А. Верховых, А. К. Вахитова, А. А. Елпидинский // Вестник технологического университета. – 2016. – Vol. 19. – № 8. – Р. 37–42.

13. Вилков, А. Н. Методология проведения научного эксперимента : курс лекций / А. Н. Вилков ; Московский гос. техн. ун-т. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 33 с. – URL: https://iu4.ru/edu/211001/sem10/mpni/0_mpni_lec.pdf (дата обращения: 29.01.2019).

14. Влияние СВЧ-воздействия на изменение вязкости тяжелых нефтей / Э. Р. Бабаев, А. Ю. Леонтьев, П. Ш. Мамедова, О. Ю. Пантелеева // Нефтегазохимия. – 2018. – № 2. – С. 25–27.

15. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтепроводах / В. А. Балакирев, Г. В. Сотников, Ю. В. Ткач, Т. Ю. Яценко // Электромагнитные явления. – 1998. – Vol. 1. – № 4. – Р. 552–561.

16. Гимазова, Г. К. Изучение влияния микроволнового воздействия на деэмульгирующую эффективность реагентов / Г. К. Гимазова, А. А. Елпидинский // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Vol. 17. – № 20. – Р. 283–285.

17. Гиршфельдер, Д. Молекулярная теория газов и жидкостей / Д. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд ; под ред. Е. В. Ступоченко. – Москва : Изд-во

иностр. лит., 1961. – 929 с.

18. ГОСТ 1510-84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение: межгос. стандарт: утв. и введ. в действие Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 7 авг. 1984 г. № 2776: дата введ. 1986-01-01 / разработ. Министерством нефтяной пром-сти. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711462> (дата обращения: 13.02.2022).

19. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия: межгос. стандарт: утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 31 авг. 2016 г. № 982-ст: дата введ. 2017-03-01 / разработ. ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», ООО «ГТИ», ООО «НИИ Транснефть». – Москва: Стандартинформ, 2016. – 96 с.

20. ГОСТ 33701-2015. Определение и применение показателей точности методов испытаний нефтепродуктов: утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 27 сент. 2016 г. № 1218-ст: дата введ. 2017-07-01 / подгот. Федер. гос. унитарным предприятием «Всерос. науч.-исслед. ин-т расходометрии». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139506> (дата обращения: 13.02.2022).

21. ГОСТ Р 57512-2017. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Термины и определения: нац. стандарт: утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 29 июня 2017 г. № 600-ст: дата введ. 2018-04-01 / разработ. ООО «Науч.-исслед. ин-т транспорта нефти и нефтепродуктов Транснефть». – Москва: Стандартинформ, 2018. – 24 с.

22. ГОСТ Р 58623-2019. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные. Правила технической эксплуатации: утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 1 нояб. 2019 г. № 1082-ст: дата введ. 2020-08-01 / разработ. ООО «Науч.-исслед. ин-т трубопроводного транспорта». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169168> (дата обращения: 13.02.2022).

23. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 авг. 2017 г. № 865-ст : дата введ. 2018-12-01 / подгот. Открытым акционерным обществом «Науч.-исслед. центр контроля и диагностики техн. систем». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146680> (дата обращения: 13.02.2022).

24. ГОСТ Р 51858-2020. Нефть. Общие технические условия : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 1 окт. 2020 г. № 726-ст : дата введ. 2021-07-01 / разработ. Федер. гос. унитарным предприятием «Рос. науч.-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/566325164> (дата обращения: 13.02.2022).

25. Давлетбаев, А. Я. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагнетании смешивающегося агента с одновременным электромагнитным воздействием / А. Я. Давлетбаев, Л. А. Ковалева, Н. М. Насыров // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Vol. 47. – № 4. – P. 605–610.

26. Дебай, П. Полярные молекулы / П. Дебай ; пер. с нем. Н. К. Щодро. – Москва ; Ленинград : Гос. науч.-техн. изд-во, 1931. – 247 с.

27. Диденко, Л. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / Л. Н. Диденко. – Москва : Наука, 2003. – 445 с. – ISBN 5-02-002869-X. – ISBN 5-02-002869-X.

28. Дунаева, Т. Ю. Система электрообогрева резервуаров в ТЭК / Т. Ю. Дунаева, А. С. Шалыгин // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. материалов III Поволжской науч.-практ. конф. (Казань, 7–8 дек. 2017 г.). – Казань : Казанский гос. энергетический ун-т, 2017. – Т. 2. – С. 105–111.

29. Иванова, Л. В. Исследование состава асфальтосмолопарафиновых отложений различной природы и пути их использования / Л. В. Иванова, В. Н. Кошелев, О. А. Стоколос // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 2. – С. 250–256.

30. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А.

С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 417 с.

31. Использование СВЧ-излучения в процессе глубокой переработки нефти и нефтепродуктов на основе технологии радиационно-волнового крекинга / Ф. С. Джандосова, В. Г. Забиняк, М. Ф. Шаехов [et al.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Vol. 16. – № 23. – P. 179–182.

32. Исследование состояния днища вертикального стального резервуара, анализ методик диагностики его состояния и выявления причин его деформации / П. В. Бурков, С. П. Буркова, В. Ю. Тимофеев [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (98). – С. 79–81.

33. Катушки // Справочник радиолюбителя-конструктора. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1983. – С. 18–20.

34. Кислицин, А. А. Тепломассоперенос в многофазных системах под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения : специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. А. Кислицин ; Тюменский ун-т. – Тюмень, 1997. – 44 с.

35. Ковалева, Л. А. Исследование диэлектрических и реологических характеристик водонефтяных эмульсий / Л. А. Ковалева, Р. Р. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин // Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46, № 5. – С. 792–794.

36. Ковалева, Л. А. К исследованию влияния температуры обработки на конечную вязкость нефтяных сред / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, Р. Р. Шайхисламов // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, № 5. – С. 796–798.

37. Ковалева, Л. А. Определение времени расслоения водонефтяной эмульсии в электромагнитном поле / Л. А. Ковалева, Р. З. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин // Технологии нефти и газа. – 2010. – № 2. – P. 20–21.

38. Ковалева, Л. А. Развитие электромагнитной технологии для утилизации нефтешлама / Л. А. Ковалева, Р. З. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 9. – P. 48 – 51.

39. Ковалева, Л. А. Разрушение водонефтяных и нефтешламовых эмульсий электромагнитными полями / Л. А. Ковалева, Р. З. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин / Башкирский гос. ун-т. – Уфа : Изд-во БашГУ, 2013. – 164 р. – ISBN 978-5-7477-3167-7.
40. Ковалева, Л. А. Об эффективности утилизации нефтяных шламов высокочастотным электромагнитным полем / Л. А. Ковалева, Р. Р. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2008. – № 1. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kovaleva/Kovaleva_1.pdf (date accessed: 19.09.2018).
41. Колесник, И. С. Влияние температуры на процесс парафинизации / И. С. Колесник, И. П. Лукашевич, О. Г. Сусанина // Нефть и газ. – 1971. – № 2. – Р. 85–88.
42. Кононов, О. В. Развитие технологий и технических средств для борьбы с отложениями в нефтяных емкостях : специальность 07.00.10 «История науки и техники», 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. В. Кононов ; Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т. – Уфа, 2010. – 24 с.
43. Кюн, Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн / пер. с нем. В. И. Тарабрина, Э. В. Лабецкого ; под ред. М. П. Долуханова. – Ленинград : Судостроение, 1967. – 517 р.
44. Лабораторные исследования нагрева высоковязких нефтей в трубопроводах высокочастотным электромагнитным полем / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, М. Д. Валеев [et al.] // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 2. – Р. 82–85.
45. Лавров, А. С. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие для вузов / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – Москва : Сов. радио, 1974. – 368 р.
46. Маганов, Р. У. Высокочастотное электромагнитное воздействие для извлечения высоковязких тяжелых нефтей / Р. У. Маганов, Ф. Л. Саяхов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2000. – № 6 (24). – Р. 45–51.
47. Магнитогидромеханические поля: воздействие на вязкостно-температурные свойства / Ю. В. Лоскутова, И. В. Прозорова, Г. И. Волкова [et al.]

// Oil&Gas Journal Russia. – 2014. – № 3 (80). – P. 28–31.

48. Мазунин, А. Е. Использование экологически чистого метода нагрева высоковязких нефтепродуктов в речных нефтеналивных судах / А. Е. Мазунин, М. Х. Садеков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2006. – № 20. – P. 134–138.

49. Методологические основы научных исследований: учебное пособие для студентов нефтегазового профиля / Тюм. гос. нефтегазовый ун-т / под ред. Ю. Д. Земенкова. – Тюмень : Вектор Бук, 2011. – 289 p.

50. Методы и средства управления и контроля процессами СВЧ нагрева в нефтяной отрасли / Г. А. Морозов, В. И. Анфиногентов, О. Г. Морозов [et al.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 26 Междунар. конф. (Севастополь, 4–10 сент. 2016 г.). – Севастополь : Севастопольский гос. ун-т, 2016. – Т. 1. – С. 59–69.

51. Модель диспергатора вязкой нефти / А. Ф. Секачѳв, В. С. Тетерин, В. С. Деева [et al.] // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 6 Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 25–30 апр. 2016 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. Нефтехим. ин-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – P. 81.

52. Морозов, Г. А. Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, Я. Н. Шангараева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Vol. 15. – № 4. – P. 59–66. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19001853> (date accessed: 03.12.2018).

53. Морозов, Н. Н. Разработка СВЧ-технологии защиты трубопровода от закупорок при транспортировке вязких жидкостей / Н. Н. Морозов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Vol. 16. – № 1. – P. 135–136.

54. Нагрев и плавление асфальтопарафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин при периодическом режиме работы высокочастотного источника электромагнитного излучения / В. А. Балакирев, Г. В. Сотников, Ю. В. Ткач, Т. Ю. Яценко // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Vol. 42.

– № 4. – Р. 136–144.

55. Нежевенко, В. Ф. Состав твердых парафинов нефтей Куйбышевской области / В. Ф. Нежевенко, Р. И. Кедрова / Борьба с отложениями парафина : сб. ст. – Москва : Недра, 1965. – 115–121 р.

56. Некрасов, В. О. Перспективные методы повышения эксплуатационных свойств нефтяных резервуаров / В. О. Некрасов, Ю. Д. Земенков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 6 (34). – Р. 24–26.

57. Некрасов, В. О. Новое устройство для повышения эксплуатационных свойств вертикальных стальных резервуаров / В. О. Некрасов, Р. Е. Левитин // Фундаментальные и прикладные исследования. – 2014. – № 13. – Р. 223–228.

58. Николаева, Н. И. Интегральное исчисление: конспект лекций / Н. И. Николаева / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. – Ч. 4. – 120 р. – ISBN 9785814909343.

59. О разрушении углеводородных эмульсий под действием электромагнитных полей / М. Ю. Доломатов, Р. С. Сабитов, Р. М. Сафуанова, А. Г. Телин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 2 (108). – Р. 39–51.

60. ОР-23.020.00-КТН-0230-21. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Зачистка резервуаров от отложений. Порядок организации и выполнения работ: дата введ. 2021-12-14. – Москва : ПАО «Транснефть», 2021. – 145 с.

61. 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. Секачëв, К. В. Щербань, В. И. Крупников ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

62. Патент № 203589 Российская Федерация, МПК B65D 88/74. Контейнер для транспортировки битума с СВЧ-излучателем: № 2020143548 : заявл. 29.12.2020 : опубл. 13.04.2021 / А. Ф. Секачëв, А. В. Сеченова, В. В. Шалай, А. Р. Осипов ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

63. Патент № 2103211 Российская Федерация, МПК В65D 88/74. Способ разогрева в емкости загустевших продуктов и устройство для его осуществления : № 96110813/13 : заявл. 29.12.1996 : опубл. 10.01.1998 / Д. А. Бочкарев, Э. Г. Васильев, А. Г. Еремеев, В. Н. Кулемин, З. М. Славинский, С. В. Степанов, В. Г. Цыбко, О. Х. Шарадзе.

64. Патент № 2172286 Российская Федерация, МПК В65D 88/74. Способ разогрева загустевших и застывших вязких нефтепродуктов в железнодорожных цистернах и устройство для его осуществления : № 2000103367/13 : заявл. 10.02.2000 : опубл. 20.08.2001 / В. М. Афанасьев, Ю. И. Бакман, С. Д. Хлыстун, В. И. Шишмаков.

65. Патент № 2337870 Российская Федерация, МПК В65D 88/74. Устройство для разогрева загустевших и застывших высоковязких нефтепродуктов в железнодорожных цистернах : № 2006141980/12 : заявл. 27.11.2006 : опубл. 10.11.2008 / В. М. Афанасьев.

66. Патент № 2338775 Российская Федерация, МПК С10G 33/02. Модульная СВЧ-установка для обезвоживания и обессоливания нефти : № 2007117813/15 : заявл. 15.05.2007 : опубл. 20.11.2008 / С. Н. Ильин, Н. П. Бекишов, О. Л. Сироткин, А. П. Захаров ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «БИГ-96».

67. Патент № 2361901 Российская Федерация, МПК С10G 33/02, С10G 35/16. Повышение качества нефти в результате комбинированной ультразвуковой и сверхвысокочастотной обработки : № 2007134398/04 : заявл. 06.01.2006 : опубл. 20.07.2009 / Р. В. Ганнерман.

68. Патент № 2400523 Российская Федерация, МПК С10G 33/02. Способ обезвоживания водонефтяных эмульсий воздействием электромагнитного поля : № 2008113926/15 : заявл. 09.04.2008 : опубл. 27.09.2010 / Л. А. Ковалева, Р. З. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин ; заявитель Башкирский гос. ун-т.

69. Патент № 2433575 Российская Федерация, МПК Н05В 6/64. Автоматизированный способ микроволновой обработки жидкой водонефтяной смеси и устройство для его осуществления : № 2010130501/07 : заявл. 20.07.2010 :

опубл. 10.11.20 / Т. К. Гараев, Г. А. Морозов, А. С. Шакиров, О. Г. Морозов ; заявитель Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева.

70. Патент № 2439128 Российская Федерация, МПК С10G 33/02, В82В 1/00. СВЧ-установка для обработки нефтеводных эмульсий : № 2010126753/04 : заявл. 01.07.2010 : опубл. 10.01.2012 / А. В. Ляшенко, В. С. Бакшуттов, О. Л. Сироткин, Э. В. Перовский, Б. Н. Максименко, Н. Т. Андрианов ; заявитель Открытое акционерное общество «Гантал».

71. Патент № 2439863 Российская Федерация, МПК Н05В 6/64. Устройство разогрева вязких диэлектрических продуктов при их транспортировке трубопроводами : № 2010151213/07 : заявл. 13.12.2010 : опубл. 10.01.2012 / Н. Н. Морозов, Г. В. Кашкатенко ; заявитель Мурманский гос. техн. ун-т.

72. Патент № 2494824 Российская Федерация, МПК В09В 3/00. Способ переработки нефтяных шламов с использованием СВЧ электромагнитного воздействия : № 2012103820/13 : заявл. 03.02.2012 : опубл. 10.10.2013 / Л. А. Ковалева, И. Ш. Ахатов, Р. Р. Зиннатуллин, Р. З. Миннигалимов, А. А. Мусин, В. Н. Благодичиннов, Ш. М. Валиев ; заявитель Башкирский гос. ун-т.

73. Патент № 2555731 Российская Федерация, МПК Е21В 43/25, Е21В 43/24, Е21В 43/20. Способ разработки обводненных залежей нефти СВЧ электромагнитным воздействием (варианты) : № 2013154455/03 : заявл. 06.12.2013 : опубл. 10.07.2015 / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, А. А. Мусин, В. Н. Благодичиннов, Ш. М. Валиев, А. И. Муллаянов ; заявитель Башкирский гос. ун-т.

74. Патент № 2572205 Российская Федерация, МПК В09В 3/00. Способ переработки углеводородсодержащих шламов в открытых хранилищах с использованием СВЧ электромагнитного излучения : № 2014124778/13 : заявл. 17.06.2014 : опубл. 27.12.2015 / А. В. Бахонин, Е. И. Бахонина, И. Х. Бикбулатов, У. Б. Имашев, Н. С. Шулаев ; заявитель Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т.

75. 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. Секачѳв, А. Е. Яковлев, А. Ф. Фицнер ;

заявитель Ом. гос. техн. ун-т.

76. Патент RU 75643 U1, B65D 88/74. Специальный контейнер для транспортировки и нагрева битумов/ Киншт Н.В., Петрунько Н.Н., Собстель Г.М. 20.08.2008. Заявка № 2008110581/22 от 19.03.2008. заявл. 19.03.2008 : опубл. 20.08.2008 / Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунько, Г. М. Собстел; заявитель Ин-т автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук.

77. Погружные нагреватели взрывозащищенные. – URL: <https://usgz.ru/pogruzhnyie-nagrevateli-vzryivozashhishhennyie.html> (дата обращения: 18.04.2020).

78. Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты) / Г. И. Волкова, Ю. В. Лоскутова, И. В. Прозорова, Е. М. Березина ; Нац.-исслед. Томский гос. ун-т. – Томск : Изд. дом ТГУ, 2015. – 136 с. – ISBN 978-5-94621-452-0.

79. Пономарев, А. А. Механизм крекинга углеводородов в электромагнитных полях - к вопросу об образовании бажендовской нефти / А. А. Пономарев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 1. – Р. 14–18.

80. Применение ВЧ и СВЧ электромагнитных полей при подготовке нефти и переработке нефтяных шламов / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, А. А. Мусин, Ю. И. Фатхуллина. – URL: http://oilgasjournal.ru/vol_5/kovaleva.pdf (date accessed: 04.10.2017).

81. Применение СВЧ- и ИК-излучения для повышения эффективности слива тяжёлых нефтей / Е. К. Галанов, Е. К. Яковенко, М. К. Филатов, Ю. А. Кытин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2 (7). – Р. 118–123.

82. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. – Москва : Институт энергетических исследований РАН, 2019. – 210 р. – ISBN 978-5-91438-028-8.

83. Промприбор. Технология мойки резервуаров. – URL:

http://www.prompribor.ru/stat_moyka_rezerv1.htm (дата обращения: 18.04.2020).

84. Разработка СВЧ модуля для разжижения нефтешлама / А. Ф. Секачѳв, В. П. Кисмерешкин, А. Е. Яковлев [et al.] // 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. – 1 CD-ROM.

85. Рачевский, Б. С. Высоковязкая тяжелая нефть – альтернатива традиционной нефти / Б. С. Рачевский, Ц. Бо // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 6(48). – Р. 40–45.

86. РД 153-39.4-078-01. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов и нефтебаз: утв. Министерством топлива и энергетики Российской Федерации. – Уфа, 2001. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294846/4294846803.htm>? (дата обращения: 18.04.2022).

87. РД 34.21.525 (МУ 34-70-165-87). Методические указания по очистке мазутных резервуаров от донных отложений: утв. Главным науч.-техн. управлением энергетики и электрификации от 11 апр. 1987 г. / разработ. Производственным объединением по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Союзтехэнерго». – Москва: СПО Союзтехэнерго, 1987. – 23 с.

88. Рикконен, С. В. Влияние технологии виброструйной магнитной активации (ВСМА) на фракционный состав нефти / С. В. Рикконен, В. А. Данекер, А. И. Теплов // Экспозиция Нефть Газ. – 2009. – № 5(5). – Р. 28–30.

89. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). Санитарные правила и нормы: утв. Постановлением Гос. комитета санитарно-эпидемиологического надзора Российской Федерации от 8 мая 1996 г. № 9. – URL: http://www.vashdom.ru/sanpin/224_218055-96/ (date accessed: 03.12.2018).

90. Саяхов, Ф. Л. Тепломассоперенос в системе “скважина-пласт” при нагнетании растворителя с одновременным электромагнитным воздействием / Ф.

Л. Саяхов, Л. А. Ковалева, Н. М. Насыров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 4. – Р. 47–55.

91. Саяхов, Ф. Л. Применение электромагнитного воздействия при добыче высоковязких нефтей / Ф. Л. Саяхов, Р. У. Маганов, Л. А. Ковалева // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 1. – Р. 35–39.

92. Саяхов, Ф. Л. Высокочастотная электромагнитная гидродинамика: учебное пособие / Ф. Л. Саяхов, М. А. Фатыхов / Башк. гос. ун-т. – Уфа : Изд-во БашГУ, 1990. – 79 р.

93. Саяхов, Ф. Л. Определение радиуса зоны теплового влияния при стационарной фильтрации битумной нефти в высокочастотном электромагнитном поле / Ф. Л. Саяхов, М. А. Фатыхов // Физико-химическая гидродинамика : межвуз. науч. сб. / Башк. гос. ун-т. – Уфа : Изд-во БГУ, 1989. – Р. 81–84.

94. Саяхов, Ф. Л. Фундаментальные и прикладные проблемы электромагнитных процессов в дисперсных системах / Ф. Л. Саяхов, И. Л. Хабибуллин, Л. А. Ковалева // Физика в Башкортостане : сб. ст. – Уфа : Гилем, 1996. – Р. 283–295.

95. Сентюрова, М. В. Технология дооткачки асфальтопарафинистых отложений из стальных вертикальных резервуаров без ухудшения товарных качеств нефти / М. В. Сентюрова, Н. А. Демьянова // Молодежь и наука : сб. материалов IX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвящ. 385-летию со дня основания г. Красноярска. – Красноярск : Сибирский Федер. ун-т, 2013. – URL: <http://conf.sfukras.ru/sites/mn2013/section076.html> (дата обращения: 18.04.2022).

96. Создание волновой динамики вязкой нефти в трубопроводе / В. С. Тетерин, А. Ф. Секачѳв, В. С. Деева [et al.] // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе. – 2015. – Vol. 2. – № 2. – Р. 497–500.

97. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 р.

98. Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской

Федерации до 2030 г.: проект (Версия от 12.09.2016). – URL: <https://docplayer.com/27602995-Proekt-versiya-12-sentyabrya-2016-goda-strategiya-razvitiya-mineralno-syrevooy-bazy-rossiyskoy-federacii-do->

99. Суфьянов, Р. Р. Исследование воздействия высокочастотного электромагнитного поля на нефтяные шламы: специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»: дис. ... канд. техн. наук / Р. Р. Суфьянов. – Уфа, 2005. – 131 с.

100. Суфьянов, Р. Р. Высокочастотная электромагнитная технология переработки продукции нефтешламовых амбаров / Р. Р. Суфьянов // Сборник статей, посвященный 40-летию научно педагогической деятельности д.ф.-м.н., профессора Саяхова Ф.Л. – Уфа : Изд-во БашГУ, 2000. – Р. 121–124.

101. Тагиров, Р. Р. Анализ технологий уменьшения образования донных отложений в резервуарах / Р. Р. Тагиров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2008. – № 2 (72). – Р. 56–67.

102. Тагиров, Р. Р. Технологии уменьшения образования донных отложений в резервуарах / Р. Р. Тагиров // Нефтепромышленное дело. – 2009. – № 2. – Р. 50–54.

103. Техника и технологические процессы при транспорте энергоресурсов : учеб. пособие : в 2 т. / под общ. ред. Ю. Д. Земенкова / Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Тюмень : Вектор Бук, 2008. – Т. 1. – 379 р. – ISBN 978-5-91409-129-0.

104. Типовая технологическая карта. Технология зачистки (очистки внутренних поверхностей) резервуаров от остатков нефтепродуктов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/493577751?section=text> (date accessed: 18.04.2022).

105. Титов, Е. В. Оценка эффективности защитного экранирования СВЧ-установки / Е. В. Титов // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – Vol. 2. – № 17. – Р. 201–206. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26371171> (date accessed: 03.12.2018).

106. Фатыхов, М. А. Математическое моделирование процесса разрушения газогидрата в газовой скважине высокочастотным электромагнитным

излучением / М. А. Фатыхов, Ф. Л. Саяхов, Н. М. Насыров / Физико-химическая гидродинамика : межвуз. сб. / Башк. гос. ун-т. – Уфа, 1995. – 102 р.

107. Фатыхов, М. А. Микроструктурные особенности водонефтяных эмульсий при сверхвысокочастотном излучении / М. А. Фатыхов, Л. А. Хамитова // Научные преобразования в эпоху глобализации : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Курган, 20 мая 2016 г.). – Уфа : ООО «Аэтерна», 2016. – Т. 4. – С. 23–27. – Курган, 2016. – Р. 23–27.

108. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов» : утв. Приказом Федер. службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 дек. 2020 г. № 529. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264122> (date accessed: 18.04.2022).

109. Фрадин, А. З. Антенно-фидерные устройства : учеб. пособие для вузов связи / А. З. Фрадин. – Москва : Связь, 1977. – 440 р.

110. Цао, Бо. Исследование воздействия микроволнового излучения на свойства высоковязких нефтей с целью повышения эффективности их транспортировки : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бо Цао ; РГУ нефти и газз (НИУ) им. И. М. Губкина. – Москва, 2017. – 24 с.

111. Шайхутдинова, М. Ш. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных резервуаров с применением электрофизических методов : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : дис. ... канд. техн. наук / М. Ш. Шайхутдинова ; Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т. – Уфа, 2020. – 150 с.

112. Эволюция микроструктуры водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, А. И. Муллаянов [et al.] // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Vol. 51. – № 6. – Р. 952–955. – URL: <http://naukarus.com/evolyutsiya-mikrostruktury-vodoneftyanyh-emulsiy-v-vysokochastotnyh-i-sverhvyssokochastotnyh-elektromagnitnyh-polyah> (date accessed:

29.11.2018).

113. Экспериментальное исследование передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля в нефтяную среду посредством погружного излучателя / А. Ф. Секачѳв, В. В. Шалай, Ю. Д. Земенков [et al.] // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – Р. 120–129.

114. Электрофизика нефтегазовых систем: учебное пособие / Ф. Л. Саяхов, Л. . Ковалева, А. Д. Галимбеков, А. М. Хайдар / Башкирский гос. ун-т. – Уфа : РИО БашГУ, 2003. – 190 р. – ISBN 5-7477-0855-4.

115. Юдина, В. О. Применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке / В. О. Юдина, Ю. С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 1 (22). – Р. 22–34.

116. A New Technique for Heavy Oil Recovery Based on Electromagnetic Heating: Pilot Scale Experimental Validation / M. Bientinesi, L. Petarca, A. Cerutti [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 32. – P. 2287.

117. A New Technique for Heavy Oil Recovery Based on Electromagnetic Heating: System Design and Numerical Modelling / A. Cerutti, M. Bandinelli, M. Bientinesi [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 32. – P. 1255.

118. Aggregate structure analysis of Colombian heavy crude oil-derived asphaltenes using small angle X-ray scattering / L. R. Morante, J. C. Poveda, R. Montiel, J. A. Henao // CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro. – 2017. – Vol. 6. – № 5. – P. 49–58.

119. Akinlua, A. Microwave-Assisted Ionic Liquid Extraction of n-Alkanes and Isoprenoid Hydrocarbons from Petroleum Source Rock / A. Akinlua, M. A. Jochmann, T. C. Schmidt // Chromatographia. – 2015. – Vol. 78. – № 17. – P. 1201–1209.

120. Baig, R. B. N. Alternative energy input: mechanochemical, microwave and ultrasound-assisted organic synthesis / R. B. N. Baig, R. S. Varma // Chem. Soc. Rev. – 2012. – Vol. 41. – № 4. – P. 1559–1584.

121. Chhetri, A. B. A Critical Review of Electromagnetic Heating for Enhanced Oil Recovery / A. B. Chhetri, M. R. Islam // Petroleum Science and

Technology. – 2008. – Vol. 26. – № 14. – P. 1619–1631.

122. Development of Magnetic Nanoparticles as Microwave-Specific Catalysts for the Rapid, Low-Temperature Synthesis of Formalin Solutions / M. Crosswhite, J. Hunt, T. Southworth [et al.] // *ACS Catalysis*. – 2013. – Vol. 3. – № 6. – P. 1318–1323.

123. Dudley, G. B. On the existence of and mechanism for microwave-specific reaction rate enhancement / G. B. Dudley, R. Richert, A. E. Stiegman // *Chem. Sci.* – 2015. – Vol. 6. – № 4. – P. 2144–2152.

124. Effect of frequency on ultrasound-assisted centrifugal dewatering of petroleum sludge / F. Mao, X. Han, Q. Huang [et al.] // *Drying Technology*. – 2016. – Vol. 34. – № 16. – P. 1948–1956. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2016.1144611> (date accessed: 20.09.2018).

125. Effect of microwave irradiation on wax and asphaltene content of heavy crude oil / J. Taheri-Shakib, A. Shekarifard, H. Naderi, S. A. Hosseini // 79th EAGE Conference and Exhibition: Energy, Technology, Sustainability - Time to Open a New Chapter. – Paris, 2017.

126. Effects of ultrasound on oily sludge deoiling / N. Xu, W. Wang, P. Han, X. Lu // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 171. – № 1-3. – P. 914–917. – URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409010206> (date accessed: 20.09.2018).

127. Fatykhov, M. A. Experimental investigations of the effect of degassing on the dielectric properties of liquids in a radio-frequency electromagnetic field / M. A. Fatykhov, R. I. Idrisov // *High Temperature*. – 2008. – Vol. 46. – № 4. – P. 583–584. – URL: <http://link.springer.com/10.1134/S0018151X08040214> (date accessed: 09.10.2018).

128. Full scale modeling of an antenna in offshore environment for electromagnetic enhanced oil recovery / M. Kashif, N. Yahya, N. Nasir [et al.]. – 2012. – P. 164–169.

129. Integrated interrogation of causes of membrane fouling in a pilot-scale anoxic-oxic membrane bioreactor treating oil refinery wastewater / O. K. Abass, F. Fang,

M. Zhuo, K. Zhang // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 642. – P. 77–89. – URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896971832117X> (date accessed: 20.09.2018).

130. Kappe, C. O. *Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis* / C. O. Kappe // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2004. – Vol. 43. – № 46. – P. 6250–6284.

131. Kappe, C. O. *Microwave Effects in Organic Synthesis: Myth or Reality?* / C. O. Kappe, B. Pieber, D. Dallinger // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2013. – Vol. 52. – № 4. – P. 1088–1094.

132. MacDonald, B. *Microwave Application in Petroleum Processing* / B. MacDonald, A. Miadonye // *Ecology, Pollution, and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 1 (1). – P. 10–12.

133. *Mathematical modeling of a water-in-oil emulsion droplet behavior under the microwave impact* / Y. I. Fatkhullina, A. A. Musin, L. A. Kovaleva, I. S. Akhatov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 574. – P. 012110.

134. *Multi-stage hydraulic fracturing and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production* / A. Y. Davletbaev, L. A. Kovaleva, N. M. Nasyrov, T. Babadagli // *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*. – 2015. – Vol. 12. – P. 15–22.

135. *Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids* / C. Liu, Y. Zhang, S. Sun [et al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 170. – P. 14–20. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518305199?via%3Dihub> (date accessed: 19.09.2018).

136. *Regulation of the rheological properties of paraffin-base crudes with a high-frequency electromagnetic field* / R. N. Shiryayeva, F. L. Sayakhov, F. K. Kudasheva [et al.] // *Chemistry and technology of fuels and oils*. – 2001. – Vol. 37. – № 6. – P. 407–409.

137. Taheri-Shakib, J. *Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil)*

properties: Based on heating time and upgrading / J. Taheri-Shakib, A. Shekarifard, H. Naderi // Fuel. – 2018. – Vol. 228. – P. 243–253. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118307853?via%3Dihub> (date accessed: 25.10.2018).

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

139. Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method / M. Duan, X. Wang, S. Fang [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 554. – P. 272–278. – URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775718305429> (date accessed: 20.09.2018).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Решение задачи нестационарной теплопроводности в Matlab.

Численные методы, в частности метод конечных элементов, позволяют решать дифференциальные уравнения с приемлемой точностью. Для решения уравнения теплопроводности был использован программный комплекс MatLab R2019a с приложением PDE modeler. Приложение PDE modeler предназначено для решения дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных при двумерной постановке задачи в декартовых координатах методом конечных элементов. В частности, оно позволяет решать уравнения параболического типа вида

$$d \cdot u(t, x, y, z)' - \operatorname{div}(c \cdot \operatorname{grad}(u(t, x, y, z))) + a \cdot u = f. \quad (97)$$

где d, c, a, f – функции координат.

Пользователю достаточно указать значения коэффициентов в диалоговом окне (рисунок 43).

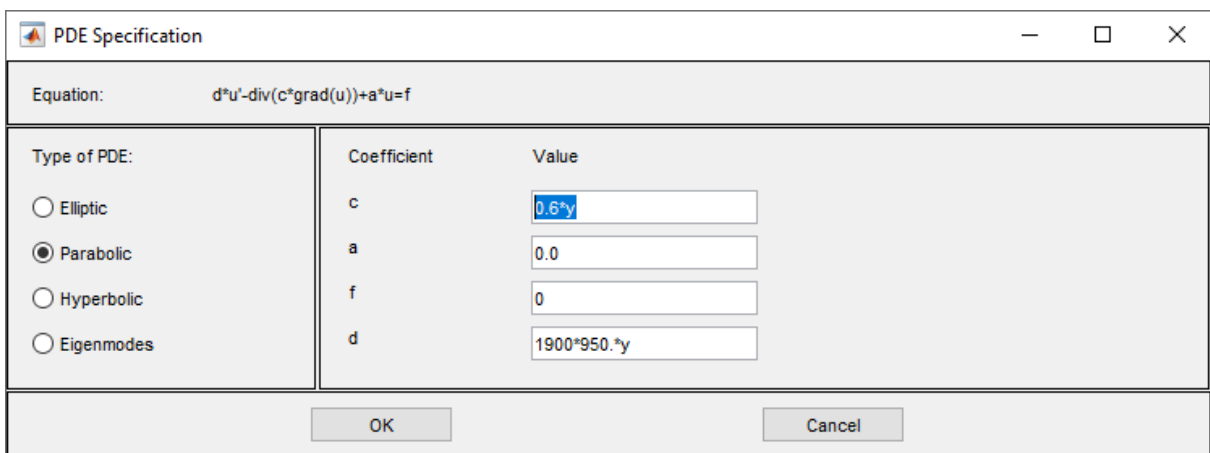


Рисунок 43 – Задание коэффициентов уравнения теплопроводности в PDE modeler

Основной трудностью применения PDE modeler для расчета теплового поля, создаваемого биконическим рупорным излучателем, является необходимость перехода от сферических координат к декартовым. Для этого необходимо сначала по формулам перехода получить выражение в цилиндрических координатах, а

затем преобразовать его и путём формального переобозначения переменных получить в декартовых.

Для перехода от сферических координат к цилиндрическим воспользуемся известным соотношением

$$r = \sqrt{\rho^2 + z^2}, \quad (98)$$

где ρ и z соответственно радиальная и осевая координаты.

Функция удельной мощности (52) с учётом (98) имеет вид

$$q(r) = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{\rho^2 + z^2} - r_0)}}{2\pi(\rho^2 + z^2)}. \quad (99)$$

Аналогично выражение удельной мощности (59) для отраженной волны:

$$q^*(r) = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c - \sqrt{\rho^2 + z^2} - r_0)}}{2\pi(\rho^2 + z^2)}. \quad (100)$$

Для отраженной (63) от противоположной поверхности

$$q^{**}(r) = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{\rho^2 + z^2} + 2r_c - 2r_0)}}{2\pi(\rho^2 + z^2)}. \quad (101)$$

Выражение (66) в цилиндрических координатах

$$\operatorname{div}(\nabla T) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}. \quad (102)$$

Температура не зависит от переменной ϕ , поэтому вторая производная по ϕ равна нулю, следовательно

$$\operatorname{div}(\nabla T) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (103)$$

Таким образом, уравнение теплопроводности (68) с правой частью (99) в цилиндрических координатах имеет вид:

$$c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{\rho^2 + z^2} - r_0)}}{2\pi(\rho^2 + z^2)}. \quad (104)$$

Умножая обе части (104) на ρ , получим:

$$\rho c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\lambda \rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \rho \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{\rho^2 + z^2} - r_0)}}{2\pi(\rho^2 + z^2)} \rho. \quad (105)$$

Далее формально переобозначим $\rho = y$, $z = x$ и получим выражение в декартовых координатах

$$yc\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda y \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{y^2+x^2}-r_0)}}{2\pi(y^2+x^2)} y. \quad (106)$$

Учитывая, что в декартовых координатах

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda y \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \operatorname{div}(\lambda y \nabla T), \quad (107)$$

окончательно получаем уравнение теплопроводности для падающей волны (68) в декартовых координатах:

$$yc\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda y \nabla T) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{y^2+x^2}-r_0)}}{2\pi(y^2+x^2)} y \quad (108)$$

Для приведения выражения (108) к виду (97) достаточно ввести обозначения

$$d = c\rho_n y;$$

$$c = \lambda y;$$

$$f = \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(\sqrt{y^2+x^2}-r_0)}}{2\pi(y^2+x^2)} y;$$

$$a = 0.$$

Аналогичным образом получаем уравнение теплопроводности для отраженной волны (69) в декартовых координатах:

$$yc\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda y \nabla T) + \frac{P_0 \alpha e^{-2\alpha(2r_c-\sqrt{y^2+x^2}-r_0)}}{2\pi(y^2+x^2)} y. \quad (109)$$

Для уравнений (108) и (109) решается начально-краевая задача в прямоугольнике $x=(0 \div r_c)$, $y=(0 \div r_c)$, на границах которого задаются краевые условия 2 рода, а именно: при $x = r_c$ и $y = r_c$, однородные граничные условия Неймана, а при $x = 0$ и $y = 0$ неоднородные граничные условия того же рода. При этом начальные условия соответствуют начальной температуре среды T_0 .

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Акт внедрения результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО "Сибирский институт по проектированию
предприятий транспорта и хранения газа, нефти
и нефтепродуктов «Сибнефтьтранспроект»



И.В. Крупников

2022 г.

АКТ

внедрения «Технологии разогрева нефтяных шламов внутри
технологических ёмкостей систем трубопроводного транспорта»

Комиссия в составе:

Председатель:

Начальник конструкторско-технологического отдела С.А. Толбин

Члены комиссии:


Начальник группы
конструкторско-технологического отдела Р.В. Дзыра

Начальник группы
конструкторско-технологического отдела Д.Л. Стогов


составила настоящий акт о том, что разработанная технология разогрева нефтяных сред с повышенным содержанием тяжелых фракций внутри технологических ёмкостей для хранения углеводородов использовалась при оценке эффективности технологического оборудования для удаления донных отложений.

Автор: Секачёв Андрей Федорович

Подписи:

Начальник конструкторско-технологического отдела  С.А. Толбин

Начальник группы
конструкторско-технологического отдела  Р.В. Дзыра

Начальник группы
конструкторско-технологического отдела  Д.Л. Стогов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Патент на изобретение**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2681619

**СПОСОБ И УСТРОЙСТВО РАЗЖИЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ
ШЛАМОВ ВНУТРИ РЕЗЕРВУАРОВ И ЗАКРЫТЫХ
ЕМКОСТЕЙ СВЧ-ПОЛЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Кисмерешкин Владимир Павлович (RU), Секачёв Андрей Фёдорович (RU), Яковлев Алексей Евгеньевич (RU), Фицнер Артём Фёдорович (RU)*

Заявка № 2017147175

Приоритет изобретения 29 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 марта 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 декабря 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 203589**КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ БИТУМА С
СВЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (ОмГТУ) (RU)*

Авторы: *Секачёв Андрей Фёдорович (RU), Сеченова Анастасия Валерьевна (RU), Шалай Виктор Владимирович (RU), Осипов Алексей Романович (RU)*

Заявка № **2020143548**Приоритет полезной модели **29 декабря 2020 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **13 апреля 2021 г.**Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **29 декабря 2030 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0x02A5CFBC00B1ACF59A40A2F08092E9A118
Владелец: **Илиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Илиев