**Анфиногентов Владимир Иванович. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков : диссертация... д-ра техн. наук : 05.13.18, 05.12.07 Казань, 2006 340 с. РГБ ОД, 71:07-5/464**

71**:**07**-**5/464

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. А.Н. ТУПОЛЕВА

На правах рукописи

**Президиум ВАК России**

**(решение от"** *PH ■ 0к Лось К, 1Ш*

**[МИР ИВАНОВИЧ**



присудил **ученую степень ДОКТОРА**

**~~ФИНОГ~~**

Начальник управления В

УДК 621.365.5+681.325

**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»



ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени доктора технических наук

Научные консультанты: Заслуженный деятель науки и техники РТ, д. ф.-м. н., профессор Гараев К.Г., Заслуженный деятель науки и техники РТ, д.т. н., профессор Морозов Г.А.

Казань 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение 7

Глава 1. 1.1

1.2.

1.3.

1.4.

Глава 2 2.1.

**2**.**2**.

2.3. Глава 3 3.1.

Нагрев диэлектриков энергией электромагнитных полей *^*

сверхвысокой частоты

25

33

37

44

Анализ применения электромагнитной энергии СВЧ диапазона для нагрева диэлектрических материалов и сред

Установки для сверхвысокочастотного нагрева диэлектриков

Математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей при СВЧ нагреве Выводы по главе

46

51

Одномерные задачи СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика энергией плоской электромагнитной волны Математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при постоянных электрофизических параметрах

**66**

73

Математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика с учетом зависимости коэффициента затухания от температуры Выводы по главе

74

, Математические модели СВЧ нагрева диэлектриков конечной толщины

76

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении плоской волны на слой с отражающей границей

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении плоской волны на слой с границей, осуществляющей поворот плоскости поляризации

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении двух встречно распространяющихся волн от некогерентных источников

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении двух встречно распространяющихся волн от когерентных источников

О некоторых точных решениях уравнений СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины Использование метода моментов в задачах управления СВЧ нагревом диэлектриков Выводы по главе

Математическое моделирование равномерного СВЧ нагрева

Многоэлементные системы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ камерах

Многоэлементное возбуждение электромагнитного поля, основанное на принципах фокусировки Оптимизация многоэлементного возбуждения электромагнитного поля с учетом случайных погрешностей технической реализации Математическое моделирование СВЧ нагрева движущегося диэлектрика

Выводы по главе

Глава 5. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектриков в камерах закрытого типа 13 6

137

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектрика в волноводах прямоугольного сечения

146

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектрика в волноводах круглого сечения

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

несжимаемой вязкой жидкости в волноводе круглого 253

сечения

1. [Выводы по главе 161](#bookmark9)

Глава 6. Математическое моделирование микроволнового

технологического комплекса (МВТК) с адаптивным управлением 162

1. Микроволновой технологический комплекс - как

система автоматического управления 163

1. Оптимизация систем контроля электромагнитных и

тепловых полей в СВЧ камерах 166

1. Статистический подход решения задачи размещения

датчиков в СВЧ камере 167

1. Алгоритм нахождения координат точек контроля 170
2. Устройство размещения датчиков системы контроля

электромагнитного поля 173

1. Восстановление электромагнитного поля по измерениям

его в конечном числе точек 176

1. Восстановление электромагнитного поля при

некоррелированных коэффициентах разложения 177

1. Восстановление поля при коррелированных коэффициентах разложения

179

183 s

*ih*

187

188

189

192

197

207

209

212

216

217

217

225

1. Определение координат датчиков и погрешности восстановления поля излучения
2. Выводы по главе

Глава 7. Математическое и физическое моделирование процесса микроволновой сепарации сырой нефти

1. Моделирование движения сферической капли в вязкой жидкости под действием гравитации
2. Моделирование нагрева капли нефти в воде и капли воды в нефти при СВЧ нагреве
3. Математическое моделирование СВЧ нагрева многослойных сред
4. Математическое моделирование СВЧ нагрева многослойных сред при динамических границах раздела
5. Физическое моделирование процесса сепарации ВНЭ
6. Математическое моделирование процесса сепарации ВНЭ в замкнутом объеме цилиндрической формы
7. Выводы по главе

Глава 8. Разработка комплексов СВЧ обработки нефтепродуктов

1. Исследование режимов воздействия СВЧ полей на водонефтяные эмульсии
2. Экспериментальный образец модуля СВЧ обработки ВНЭ в канале концевого делителя фаз (КДФ)
3. Промысловый модуль СВЧ обработки ВНЭ (ПМВК- 400)
4. Камера электродинамической обработки ВНЭ 239
5. Датчик обводненности сырой нефти 240
6. Устройство термообработки сыпучих и жидких

диэлектрических материалов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты 242

243

1. Выводы по главе

[Заключение 244](#bookmark94)

[Список использованных источников 247](#bookmark95)

Приложения к диссертации Приложение 1 Приложение 2 Приложение 3

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Начавшееся примерно 40 лет назад применение СВЧ энергии в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и биологии, в первую очередь в технологических процессах нагрева и сушки, зачастую сдерживается трудностями построения адекватных математических моделей процессов, происходящих в рабочих камерах СВЧ технологических установок.

Исследованиям и разработкам в области микроволновых технологий (МВТ) посвящен ряд обзоров и монографий. В последние годы наблюдается значительное увеличение количества публикаций, в которых рассматриваются как вопросы реализации МВТ, так и методологические аспекты применения микроволновой энергии.

Исследованием процессов происходящих в СВЧ камерах, проектированием СВЧ технологических установок, а также математическим моделированием электромагнитных и тепловых полей при СВЧ нагреве диэлектрических сред занимаются ученые в России: Архангельский Ю.С., Балакирев В.А., Бецкий О.В., Бородин И.Ф., Воскресенский Д.И. ,Даутов

О.Ш., Диденко А.Н., Девяткин И.И., Девятков Н.Д., Килькеев P. ILL, Кислицын А.А., Кравченко В.Ф., Матисон В. А., Морозов Г.А., Насыров

Н.М,. Неганов В.А., Некрасов Л.Б., Некрутман С.В., Нигматуллин Р.И., Петрасик JI.A., Пономарев Л.И., Пюшнер Г., Рикенглаз JI. Э., Ругинец Р. Г., Рогов И.А., Саяхов Ф. Л., Седельников Ю.Е., Хабибуллин И. Л., Явчуновский В.Я., Яцышен В. В. и за рубежом: Э. Окресс., О. Andrade, J. R.

Cannon, W. С. Chew, С. T. Choi, A. Conrad, J. Clemens, D. Foster, R. G. Grubb, M. A. Ebadian, M. F. Iskander, H. Kimery, L. E. Lagos, W. Li, D. R. Lynch, K. D. Paulsen, L. Pichon, A. Razek, J. W. Strohbehn, A. Sekkak, C. Saltiel, R. L. Smith,, L. Walsh, T. L. White.

Многообразие геометрических размеров и форм обрабатываемых диэлектриков, различие их электрофизических свойств затрудняет создание универсальных СВЧ камер для тепловой обработки диэлектриков, универсальных систем многоэлементного возбуждения электромагнитного поля с неизменной структурой и параметрами. В каждом конкретном случае приходится определять конструкцию камеры СВЧ нагрева и наиболее подходящий вариант многоэлементного возбуждения электромагнитного поля. Эффективное решение подобных технических задач возможно лишь на основе построения математических моделей процессов возбуждения и распространения электромагнитных и температурных полей в диэлектриках. Это необходимо, в первую очередь, для более эффективного использования имеющихся и рационального проектирования и оптимизации новых микроволновых комплексов.

Процессы СВЧ нагрева диэлектриков описываются системой дифференциальных уравнений **в** частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и уравнения нестационарной теплопроводности, которая решается достаточно трудно не только аналитическими, но даже и численными методами. Эти трудности связаны с тем, что 1) значения электрофизических параметров диэлектрика, входящих в уравнение Максвелла, зависят от температуры, 2) уравнение нестационарной теплопроводности содержит функцию удельной поглощенной мощности, которая пропорциональна дивергенции вектора Пойнтинга, 3) источники электромагнитного поля и диэлектрики изменяются как во времени, так и в пространстве, 4) погрешности и флуктуации технической реализации многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля приводят к отличию расчетного распределения электромагнитного и температурного полей от технически реализуемых.

Таким образом, актуальна, представляет теоретический интерес и имеет практическую направленность научно-техническая проблема построения и исследования математических моделей СВЧ нагрева диэлектриков и проектирования и совершенствования на их основе устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

Тематика и содержание диссертационной работы соответствует планам научных исследований, являющихся составной частью программ «Развитие приоритетных направлений науки в Республике Татарстан на 2001-2005 годы» фонда НИОКР Республики Татарстан, «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» на 2003­2004 годы, а также темам хоздоговорных НИОКР, выполняемых научно­исследовательским центром Прикладной электродинамики (НИЦ ПРЭ) КГТУ им. А.Н.Туполева с 1995 по 2005 г.

**Цель работы.** Работа посвящена построению и исследованию математических моделей СВЧ нагрева диэлектриков с изменяющимися во времени и пространстве параметрами в камерах открытого и закрытого типа при многоэлементном возбуждении, в том числе, оптимальном с учетом случайных погрешностей технической реализации, изменяющихся во времени и пространстве источниках СВЧ энергии и диэлектриках и их использованию при проектировании и совершенствовании устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

**Задачи исследования.** В соответствии с указанной целью в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Построение и исследование математических моделей СВЧ нагрева:
* полубесконечного диэлектрика одиночными источниками СВЧ энергии и многоэлементными системами при изменении источников во времени и пространстве;
* диэлектрического слоя конечной толщины при разных способах і

. I

возбуждения электромагнитного поля;

* неподвижных и движущихся диэлектриков в камерах закрытого типа.
1. Разработка и исследование многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля и их оптимизация по среднеквадратичному и минимаксному критериям с учетом, имеющих место при технической реализации, случайных погрешностей.
2. Разработка вероятностного подхода в задачах размещения точек контроля в СВЧ камере микроволнового комплекса с адаптивным управлением и восстановления пространственного поля по результатам измерений в точках контроля. Реализация предложенных итерационных процедур не только в виде вычислительных алгоритмов, но и в виде соответствующих устройств.
3. Использование разработанных математических моделей при проектировании и совершенствовании устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

**Методы исследования.** При проведении теоретических исследований были использованы аналитические и численные (конечноразностные) методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, математические методы группового анализа дифференциальных уравнений в частных производных, методы оптимизации, методы математического моделирования, теории вероятностей, линейной алгебры.

**Достоверность и обоснованность.** Обоснованность и достоверность полученных результатов определяется корректным использованием математических методов, удовлетворительным совпадением результатов численного моделирования с результатами экспериментов, а также

**и**

экспертизами ВНЙИГПЭ и ФИПС и признанием ряда технических решений изобретениями и полезными моделями, защищенными авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ.

**Личный вклад автора.** Все основные научные результаты, изложенные в диссертации, принадлежат автору. В опубликованных в соавторстве работах, автор принимал участие в постановке задач, разработке математических моделей и алгоритмов расчетов, в проведении расчетов, экспериментов и анализе результатов.

Научная новизна. Уточнена математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика энергией плоской электромагнитной волны, предложенная Л.Э. Рикенглазом. Для построенной математической модели при определенных допущениях получено удобное для инженерной практики аналитическое решение.

Предложена математическая модель СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины, при разных способах возбуждения электромагнитного поля: а) с отражением падающей электромагнитной волны от нижней границы слоя; б) с отражением падающей электромагнитной волны от нижней границы слоя с поворотом плоскости поляризации; в) при встречном возбуждении двух падающих волн от некогерентных источников; г) при встречном возбуждении двух падающих волн от когерентных источников.

Для всех случаев определены допущения, при которых задача СВЧ нагрева имеет простое аналитическое решение удобное для инженерных расчетов.

Построена математическая модель СВЧ нагрева плоскослоистого диэлектрика при возбуждении электромагнитного поля плоской электромагнитной волной нормально падающей на его границу.

Предложена модифицированная нелинейная математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при линейной зависимости

коэффициента затухания от температуры. Найдена группа Ли, допускаемая нелинейным уравнением теплопроводности, определена полная система функционально независимых инвариантов, что позволило свести нелинейное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному *%* уравнению. j

Созданы математические модели равномерного СВЧ нагрева диэлектриков: 1) многоэлементной системой излучателей; 2)

многоэлементной излучающей системой, оптимизированной к погрешностям технической реализации; 3) основанной на принципах фокусировки многоэлементной системой излучателей, 4) для перемещающегося относительно неподвижного излучателя диэлектрика.

Для задач СВЧ нагрева 2 и 4 получены удобные для инженерных расчетов аналитические решения.

* Предложена математическая модель СВЧ нагрева диэлектрика в камерах закрытого типа прямоугольного и круглого сечений. Для исследования данных моделей СВЧ нагрева использован конечноразностный метод.
* Построена математическая модель СВЧ нагрева несжимаемой вязкой жидкости, текущей в цилиндрической трубе. Математическая модель исследована конечноразностным методом. Показано, что за счет изменения скорости течения и мощности СВЧ излучателя можно получить на выходе из трубы требуемую температуру жидкости.
* Предложен вероятностный подход построения систем контроля полей. Предложены алгоритмы выбора координат точек контроля и восстановления полей, в виде непрерывных функций, реализованные в виде новых технических решений, защищенных авторскими свидетельствами.
* Предложено новое техническое решение на способ и устройство для термообработки диэлектрических материалов, защищенное патентами РФ.

**Практическая значимость.** На основе математической модели СВЧ нагрева жидкости, движущейся в цилиндрической трубе, разработан опытный образец устройства СВЧ нагрева водонефтяных эмульсий (ВНЭ), экспериментально исследованный в НИЦ ПРЭ КГТУ им. А.Н.Туполева и в НГДУ «Лениногорскнефть».

Результаты моделирования СВЧ нагрева плоскослоистых диэлектриков использованы для определения режимов нагрева ВНЭ при её разделении на нефть и воду.

Результаты математического моделирования СВЧ нагрева ВНЭ в цилиндрическом и коаксиальном сепарационных объемах использованы при разработке модулей микроволновой рабочей камеры в датчиках обводненности сырой нефти, предназначенных для автоматического определения процентного соотношения ее компонент.

**Положения, выносимые на защиту** Модифицированные и новые математические модели СВЧ нагрева:

* полубесконечного диэлектрика и результаты их исследования;
* диэлектрика конечной толщины и результаты их сравнительного анализа;
* движущихся диэлектриков источником СВЧ энергии и результаты их исследования;
* диэлектриков в камерах закрытого типа и результаты их исследования; рекомендации по их использованию при разработке СВЧ камер для датчиков обводненности и в устройствах разделения ВНЭ на нефть и воду;
* результаты математического моделирования СВЧ нагрева диэлектрика многоточечными системами возбуждения электромагнитного поля с учетом случайных погрешностей технической реализации;
* статистический подход и методика размещения точек контроля полей в камерах СВЧ нагрева и структурная схема устройства для ее осуществления;
* алгоритмы восстановления полей в виде непрерывных функций по измерениям в дискретной совокупности точек и структурная схема устройства их реализующая;
* структурная схема устройства для равномерной термообработки диэлектрического материала в электромагнитном СВЧ поле;
* результаты внедрения разработанных математических моделей, методик и устройств в промышленность, научные исследования и в учебный процесс.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованных источников, включающего 256 наименования и 3-х приложений. Работа без приложений изложена на 274 страницах машинописного текста, включая 91 рисунок и 3 таблицы.

В первой главе проведен обзор основных направлений использования СВЧ электромагнитных полей в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, биологии и других областях хозяйственной деятельности. Многочисленными исследованиями, проводимыми в различных странах, установлена высокая эффективность использования СВЧ нагрева в различных областях хозяйственной деятельности.

Отмечены преимущества СВЧ нагрева диэлектриков по сравнению с традиционными способами нагрева, которые определяют необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, поиска новых приложений и повышения эффективности применения СВЧ электромагнитных полей.

К настоящему времени разработано значительное число технологических устройств СВЧ нагрева для различных областей хозяйственной деятельности. Большая часть указанных устройств СВЧ нагрева предназначена для экспериментальной отработки режимов воздействия энергии СВЧ на обрабатываемые материалы, ряд установок находится в опытной или промышленной эксплуатации.

Приведённый, далеко не полный перечень, устройств СВЧ нагрева показывает, что имеющиеся устройства являются узкоспециализированными, с фиксированными режимами СВЧ обработки конкретных материалов с заданными геометрическими размерами, параметрами влажности и т.д.

**Во второй главе** рассматриваются и исследуются одномерные по пространственной переменной математические модели СВЧ нагрева диэлектрика, заполняющего полуплоскость. Предложена модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика, учитывающая изменение температуры в диэлектрике за счет теплопроводности. Определены условия, при которых задача СВЧ нагрева допускает аналитическое решение и проведено его сравнение с решением задачи в адиабатическом приближении, полученным Рикенглазом Л.Э.

В главе также рассматриваются постановки задач СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при нормальном падении на его границу плоской электромагнитной волны. Для разных граничных условий приведены результаты сравнения полученных в данной главе аналитических решений задач СВЧ нагрева с известными решениями. Численными расчетами установлено, что хотя решения отличаются формой записи и трудоемкостью вычислений, однако дают практически одинаковые результаты.

Исследовано влияние зависимости амплитуды падающей волны от времени на распределение температуры в диэлектрике. Проведенные расчеты показали, что форма сигнала, подаваемого на вход системы возбуждения электромагнитного поля в диэлектрике не влияет на распределение температуры, а влияет лишь на скорость изменения температуры.

Методом конечных разностей исследована нелинейная математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при линейной зависимости коэффициента затухания электромагнитной волны от температуры. Проведено сравнение полученного решения с решением аналогичной задачи, но в адиабатическом приближении, полученным Л.Э. Рикенглазом.

Качественное поведение температурных кривых осталось без изменения, однако в адиабатическом приближении отмечается большее различие между температурой на поверхности и температурой в глубине, так как в этом приближении пренебрегают изменением температуры за счет теплопроводности.

**Третья глава** посвящена построению и исследованию математических моделей СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины при нормальном падении на его границу плоской электромагнитной волны.

Рассмотрены разные модели распространения электромагнитного поля в слое диэлектрика:

а) поле в слое является результатом многократных отражений плоской волны между границей раздела диэлектрика с воздухом и отражающей границей,

б) поле является результатом многократных отражений от границ слоя двух ортогонально поляризованных плоских волн,

в) поле является результатом сложения прошедших плоских волн от двух некогерентных источников, расположенных по разные стороны от слоя диэлектрика,

г) поле является результатом сложения прошедших плоских волн от двух когерентных источников, расположенных по разные стороны от слоя диэлектрика.

Для всех перечисленных случаев определены условия, при которых задачи СВЧ нагрева допускают удобные для инженерных расчетов аналитические решения. Результаты проведенных расчетов показали, что наиболее равномерное распределение температуры в слое достигается при встречном возбуждении электромагнитного поля двумя некогерентными источниками.

Далее в главе рассмотрены задачи управляемого СВЧ нагрева: определить такую функцию удельной поглощенной мощности, чтобы к заданному моменту времени распределение температуры в диэлектрике совпало бы с требуемым распределением. Для решения задачи управления распределением температуры в диэлектрике использован метод моментов.

Для нахождения неотрицательной функции управления

рассматриваются задачи минимизации критерия близости требуемого распределения температуры и распределения, соответствующего найденной функции управления. В качестве критерия близости температурных распределений использовались среднеквадратическое и минимаксное приближения. Задачи управления СВЧ нагревом диэлектриков проиллюстрированы расчетными примерами.

В четвертой главе рассматриваются математические модели равномерного СВЧ нагрева с помощью многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля, в том числе оптимизированных к случайным погрешностям технической реализации и основанных на принципах фокусировки и с помощью перемещения диэлектрика.

Рассматривается задача СВЧ нагрева протяженного диэлектрика с помощью многоэлементной системы излучателей, расположенных над его поверхностью. Математическое моделирование заключается в аналитическом решении двумерного уравнения нестационарной теплопроводности при оптимизации функции удельной поглощенной мощности за счет выбора амплитуд возбуждения отдельных излучателей при заданном их расположении в многоэлементной системе возбуждения электромагнитного поля в диэлектрике.

Проведенными расчетами показан выигрыш от использования многоэлементных систем возбуждения по сравнению с одиночными излучателями.

Далее в главе рассматриваются задачи равномерного СВЧ нагрева с помощью многоэлементных систем излучателей, основанные на принципах фокусировки. Для сфокусированной апертуры характерно синфазное сложение излучаемых отдельными элементами полей в заданной области фокусировки, что позволяет создать в этой области электромагнитное поле максимально возможной интенсивности с учетом, ограничения на мощность, подводимую к системе возбуждения. Перемещая тем или иным способом область фокусировки в пространстве, можно осуществлять эффективную СВЧ обработку диэлектриков больших размеров.

Отмечена связь задачи оптимизации многоэлементной системы возбуждения в открытой камере микроволновой установки с задачей синтеза антенной решетки по заданной комплексной диаграмме направленности.

Приведен расчетный пример, показывающий, что за счет выбора области фокусировки в виде отрезка прямой или в виде полосы можно обеспечить равномерность распределения электромагнитной энергии вглубь диэлектрика.

Для эффективного использования технологических установок, использующих СВЧ энергию для нагрева диэлектрических материалов, необходимо разработать методы их оптимального проектирования с учетом неизбежных при их технической реализации случайных погрешностей и флуктуаций.

В главе сформулирована задача оптимизации амплитуд возбуждения излучателей по статистическому критерию эффективности в среднем.

На расчетных примерах показан выигрыш, достигаемый при оптимизации амплитуд возбуждения при условии наличия погрешностей технической реализации.

**В пятой главе** исследуются математические модели СВЧ нагрева диэлектриков в камерах закрытого типа прямоугольного и круглого поперечного сечений, выбор которых обусловлен, во-первых, геометрией СВЧ камер, в которых осуществляется СВЧ обработка, и во-вторых многочисленными исследованиями по возбуждению и распространению электромагнитных полей в прямоугольных и круглых резонаторах и волноводах.

При математическом моделировании СВЧ нагрева диэлектриков предполагается, что в СВЧ камере прямоугольного поперечного сечения возбуждается единственный тип волны. Наибольший практический интерес представляют моды с наибольшими значениями критической длины волны

£цИ#10.

Трехмерное уравнение нестационарной теплопроводности решалось конечноразностным методом по неявной схеме. Приведен пример расчета распределения температуры в поперечном сечении СВЧ камеры.

Далее в главе рассматриваются задачи СВЧ нагрева неподвижных и движущихся диэлектриков в СВЧ камерах круглого поперечного сечения. Подобные задачи возникают, например, при моделировании СВЧ нагрева в технологических устройствах получения товарной нефти из ВНЭ. Путем численных расчетов показано, что за счет выбора скорости движения и мощности СВЧ генератора можно получить на выходе из трубы требуемое распределение температуры жидкости. Если в поперечных сечениях СВЧ камеры, близких к источнику СВЧ энергии температура ВНЭ сильно зависит от расстояния до оси трубы, то на выходе из трубы температуры мало зависит от расстояния до оси.

**В шестой главе** на основе вероятностного подхода исследуются задачи оптимизации пространственного размещения датчиков, контролирующих электромагнитные и температурные поля в камерах СВЧ нагрева и задачи восстановления пространственных распределений этих полей.

В главе обсуждается возможность построения технологического комплекса СВЧ нагрева в виде системы автоматического управления с адаптацией параметров математической модели. Контроль

электромагнитных и температурных полей в камере СВЧ нагрева

осуществляется с помощью дискретной системы датчиков, увеличение числа которых приводит к усложнению системы контроля и отличию расчетных электромагнитного и температурного полей от реально существующих полей. Поэтому является важной задача наиболее достоверного восстановления этих полей при контроле их с помощью умеренного числа датчиков.

В главе на основе информационного критерия - количества

информации о поле, снимаемое с датчиков, предлагается итерационная

процедура определения координат датчиков. Приводится пример реализации вычислительной процедуры в виде устройства, ее осуществляющую.

Далее в главе на основе статистического подхода рассмотрены вопросы восстановления пространственных распределений полей по измерениям в дискретной совокупности точек контроля. Предложены алгоритмы нахождения коэффициентов разложения полей по базисным функциям и получены выражения для оценки погрешности восстановления полей.

Изложенные в главе вероятностные подходы и полученные решения задач размещения датчиков и восстановления полей проиллюстрированы расчетными примерами.

**Седьмая глава** посвящена исследованию влияния СВЧ электромагнитных полей на процесс сепарации ВНЭ, содержит математические модели, результаты математического и физического Моделирования-

Исследования процесса сепарации ВНЭ под действием гравитации, показали, что одним из основных факторов, влияющих на скорость движения нефтяных капель в ВНЭ, является их динамическая вязкость. При уменьшении динамической вязкости жидкости скорость движения сферической капли увеличивается тем больше, чем больше радиус капли; скорость движения капли при уменьшении ее динамической вязкости увеличивается меньше, чем при уменьшении динамической вязкости жидкости.

При математическом моделировании СВЧ нагрева ВНЭ, она рассматривается в виде плоскослоистой структуры, состоящей из трех слоев: нефть, межфазный слой (собственно ВНЭ) и вода. Геометрии плоскослоистой структуры соответствуют электромагнитные поля в виде плоских линейно-поляризованных волн, прохождение которых через плоскослоистую структуру может быть записано в аналитической форме. Температурное поле в плоскослоистой структуре описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности, которая решалась конечноразностным методом по консервативной неявной разностной схеме на сетке, узловые точки которой, совпадают с граничными точками слоев. В результате были получены кривые, отражающие зависимость распределения температуры в плоскослоистой структуре от толщины слоев для разного времени нагрева. По ним видно, что с увеличением времени нагрева температура слоев увеличивается, а распределение температуры в слоях становится более равномерным. Температура слоя ВНЭ увеличивается больше, чем температура слоев нефти и воды. С уменьшением толщины слоя ВНЭ улучшается равномерность его нагрева.

Аналогичные исследования были проведены для частот 433 и 915 МГц. Показано, что данные частоты удобнее применять для анализа компонентного состава ВНЭ в больших контрольных объемах, чем используемый на частоте 2450 МГц - 0.5 л, что вызвано увеличением рабочих длин волн и особенностями их распространения в диэлектрических средах.

Далее проведен анализ динамики сепарации ВНЭ с учетом движения слоев в ее процессе. Скорость движения границ фаз в рамках разработанной динамической модели расслоения в основном определяется скоростью движения капель дисперсной фазы, чей радиус лежит в диапазоне 50­80 мкм. В результате проведения вычислений на ЭВМ было получено, что для обеспечения 100%-го расслоения ВНЭ время воздействия СВЧ полем при заданных параметрах напряженности электрического поля для различного компонентного состава составляет от 3 до 5 минут. Полученные данные были подтверждены результатами физического моделирования при унитарной (микроволновой) и комбинированной (микроволновой и химической) обработке.

**В восьмой** главе приведено описание разработанных на основе проведенного математического моделирования устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов, которые используются при проведении экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях.

Приведены результаты физического моделирования процесса сепарации ВНЭ в лабораторных условиях при разных режимах и длительностях СВЧ нагрева. Установлено, что наиболее эффективное отделение воды от ВНЭ как при добавлении, так и без добавления деэмульгатора, происходит при 40%-м режиме мощности СВЧ генератора.

Проведенные эксперименты процесса отделения воды от ВНЭ показали, что при СВЧ нагреве обеспечивается не только более быстрое, но и качественное отделение воды от ВНЭ.

В главе содержится описание функциональной схемы экспериментального образца технологического СВЧ модуля обработки ВНЭ в канале концевого делителя фаз (КДФ). Приведен расчет камеры электродинамической обработки ВНЭ, описание ее конструкции и внешний вид в составе промыслового модуля СВЧ обработки ВНЭ.

Приведен внешний вид и описание блока микроволновой рабочей камеры датчика обводненности нефти, который предназначен для автомати­ческого определения процентного соотношения воды и нефти в сырой нефти. Блок микроволновой рабочей камеры служит для забора, слива и обработки проб ВНЭ и представляет собой прямоугольный резонатор с размещенной внутри сепарационной емкостью цилиндрической формы. В процессе экспериментальных исследований установлено, что датчик обеспечивает высокую оперативность и точность контроля обводненности нефти по сравнению с известными приборами.

Также приведена блок схема и принцип работы устройства термообработки сыпучих и жидких диэлектриков в электромагнитном СВЧ поле.

**В приложении** содержатся дополнительные материалы и документы, подтверждающие некоторые положения диссертации и использование ее результатов.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 46 научных работ, в том числе 2 монографии, 7 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 6 статей в реферируемых трудах и сборниках докладов симпозиумов международных НТО, 2 авторских свидетельства СССР, 2 патента РФ. Автор имеет 14 единоличных публикаций.

Апробация **работы** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на научных конференциях КГТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, 1997-2005г., на 7-ой, 12-ой, 13-ой Международных Крымских конференциях «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 1997, 2002 и 2003 гг., на 1-й Международной конференции «Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизация проектирования», Казань, 1997 г., на 7-ой Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2001 г., на VIII Четаевской международной конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», Казань, 2002г., на Международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование», Казань, 2002 г., 2004 г., 2006 г., на Всероссийской конференции «Современные методы теории функций и смежные проблемы», Воронеж, 2003 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии», Москва, 8-15.12.2003 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии», Сочи,, 2004 г., на МНТК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ- 18», Казань, 2005 г., на Международной конференции «Antenna Theory and Techniques», Киев, Украина, 2005г., на Всероссийском семинаре, посвященном восьмидесятилетию Скимеля В.Н., Казань, 2005 г., на III, IV и V МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов», Волгоград, 2004 г., Нижний Новгород, 2005 г. и Самара, 2006 г.

71**:**07**-**5/464

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. А.Н. ТУПОЛЕВА

На правах рукописи

**Президиум ВАК России**

**(решение от"** *PH ■ 0к Лось К, 1Ш*

**[МИР ИВАНОВИЧ**



присудил **ученую степень ДОКТОРА**

**~~ФИНОГ~~**

Начальник управления В

УДК 621.365.5+681.325

**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»



ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени доктора технических наук

Научные консультанты: Заслуженный деятель науки и техники РТ, д. ф.-м. н., профессор Гараев К.Г., Заслуженный деятель науки и техники РТ, д.т. н., профессор Морозов Г.А.

Казань 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение 7

Глава 1. 1.1

1.2.

1.3.

1.4.

Глава 2 2.1.

**2**.**2**.

2.3. Глава 3 3.1.

Нагрев диэлектриков энергией электромагнитных полей *^*

сверхвысокой частоты

25

33

37

44

Анализ применения электромагнитной энергии СВЧ диапазона для нагрева диэлектрических материалов и сред

Установки для сверхвысокочастотного нагрева диэлектриков

Математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей при СВЧ нагреве Выводы по главе

46

51

Одномерные задачи СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика энергией плоской электромагнитной волны Математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при постоянных электрофизических параметрах

**66**

73

Математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика с учетом зависимости коэффициента затухания от температуры Выводы по главе

74

, Математические модели СВЧ нагрева диэлектриков конечной толщины

76

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении плоской волны на слой с отражающей границей

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении плоской волны на слой с границей, осуществляющей поворот плоскости поляризации

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении двух встречно распространяющихся волн от некогерентных источников

СВЧ нагрев диэлектрического слоя при падении двух встречно распространяющихся волн от когерентных источников

О некоторых точных решениях уравнений СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины Использование метода моментов в задачах управления СВЧ нагревом диэлектриков Выводы по главе

Математическое моделирование равномерного СВЧ нагрева

Многоэлементные системы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ камерах

Многоэлементное возбуждение электромагнитного поля, основанное на принципах фокусировки Оптимизация многоэлементного возбуждения электромагнитного поля с учетом случайных погрешностей технической реализации Математическое моделирование СВЧ нагрева движущегося диэлектрика

Выводы по главе

Глава 5. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектриков в камерах закрытого типа 13 6

137

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектрика в волноводах прямоугольного сечения

146

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

диэлектрика в волноводах круглого сечения

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

несжимаемой вязкой жидкости в волноводе круглого 253

сечения

1. [Выводы по главе 161](#bookmark9)

Глава 6. Математическое моделирование микроволнового

технологического комплекса (МВТК) с адаптивным управлением 162

1. Микроволновой технологический комплекс - как

система автоматического управления 163

1. Оптимизация систем контроля электромагнитных и

тепловых полей в СВЧ камерах 166

1. Статистический подход решения задачи размещения

датчиков в СВЧ камере 167

1. Алгоритм нахождения координат точек контроля 170
2. Устройство размещения датчиков системы контроля

электромагнитного поля 173

1. Восстановление электромагнитного поля по измерениям

его в конечном числе точек 176

1. Восстановление электромагнитного поля при

некоррелированных коэффициентах разложения 177

1. Восстановление поля при коррелированных коэффициентах разложения

179

183 s

*ih*

187

188

189

192

197

207

209

212

216

217

217

225

1. Определение координат датчиков и погрешности восстановления поля излучения
2. Выводы по главе

Глава 7. Математическое и физическое моделирование процесса микроволновой сепарации сырой нефти

1. Моделирование движения сферической капли в вязкой жидкости под действием гравитации
2. Моделирование нагрева капли нефти в воде и капли воды в нефти при СВЧ нагреве
3. Математическое моделирование СВЧ нагрева многослойных сред
4. Математическое моделирование СВЧ нагрева многослойных сред при динамических границах раздела
5. Физическое моделирование процесса сепарации ВНЭ
6. Математическое моделирование процесса сепарации ВНЭ в замкнутом объеме цилиндрической формы
7. Выводы по главе

Глава 8. Разработка комплексов СВЧ обработки нефтепродуктов

1. Исследование режимов воздействия СВЧ полей на водонефтяные эмульсии
2. Экспериментальный образец модуля СВЧ обработки ВНЭ в канале концевого делителя фаз (КДФ)
3. Промысловый модуль СВЧ обработки ВНЭ (ПМВК- 400)
4. Камера электродинамической обработки ВНЭ 239
5. Датчик обводненности сырой нефти 240
6. Устройство термообработки сыпучих и жидких

диэлектрических материалов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты 242

243

1. Выводы по главе

[Заключение 244](#bookmark94)

[Список использованных источников 247](#bookmark95)

Приложения к диссертации Приложение 1 Приложение 2 Приложение 3

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Начавшееся примерно 40 лет назад применение СВЧ энергии в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и биологии, в первую очередь в технологических процессах нагрева и сушки, зачастую сдерживается трудностями построения адекватных математических моделей процессов, происходящих в рабочих камерах СВЧ технологических установок.

Исследованиям и разработкам в области микроволновых технологий (МВТ) посвящен ряд обзоров и монографий. В последние годы наблюдается значительное увеличение количества публикаций, в которых рассматриваются как вопросы реализации МВТ, так и методологические аспекты применения микроволновой энергии.

Исследованием процессов происходящих в СВЧ камерах, проектированием СВЧ технологических установок, а также математическим моделированием электромагнитных и тепловых полей при СВЧ нагреве диэлектрических сред занимаются ученые в России: Архангельский Ю.С., Балакирев В.А., Бецкий О.В., Бородин И.Ф., Воскресенский Д.И. ,Даутов

О.Ш., Диденко А.Н., Девяткин И.И., Девятков Н.Д., Килькеев P. ILL, Кислицын А.А., Кравченко В.Ф., Матисон В. А., Морозов Г.А., Насыров

Н.М,. Неганов В.А., Некрасов Л.Б., Некрутман С.В., Нигматуллин Р.И., Петрасик JI.A., Пономарев Л.И., Пюшнер Г., Рикенглаз JI. Э., Ругинец Р. Г., Рогов И.А., Саяхов Ф. Л., Седельников Ю.Е., Хабибуллин И. Л., Явчуновский В.Я., Яцышен В. В. и за рубежом: Э. Окресс., О. Andrade, J. R.

Cannon, W. С. Chew, С. T. Choi, A. Conrad, J. Clemens, D. Foster, R. G. Grubb, M. A. Ebadian, M. F. Iskander, H. Kimery, L. E. Lagos, W. Li, D. R. Lynch, K. D. Paulsen, L. Pichon, A. Razek, J. W. Strohbehn, A. Sekkak, C. Saltiel, R. L. Smith,, L. Walsh, T. L. White.

Многообразие геометрических размеров и форм обрабатываемых диэлектриков, различие их электрофизических свойств затрудняет создание универсальных СВЧ камер для тепловой обработки диэлектриков, универсальных систем многоэлементного возбуждения электромагнитного поля с неизменной структурой и параметрами. В каждом конкретном случае приходится определять конструкцию камеры СВЧ нагрева и наиболее подходящий вариант многоэлементного возбуждения электромагнитного поля. Эффективное решение подобных технических задач возможно лишь на основе построения математических моделей процессов возбуждения и распространения электромагнитных и температурных полей в диэлектриках. Это необходимо, в первую очередь, для более эффективного использования имеющихся и рационального проектирования и оптимизации новых микроволновых комплексов.

Процессы СВЧ нагрева диэлектриков описываются системой дифференциальных уравнений **в** частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и уравнения нестационарной теплопроводности, которая решается достаточно трудно не только аналитическими, но даже и численными методами. Эти трудности связаны с тем, что 1) значения электрофизических параметров диэлектрика, входящих в уравнение Максвелла, зависят от температуры, 2) уравнение нестационарной теплопроводности содержит функцию удельной поглощенной мощности, которая пропорциональна дивергенции вектора Пойнтинга, 3) источники электромагнитного поля и диэлектрики изменяются как во времени, так и в пространстве, 4) погрешности и флуктуации технической реализации многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля приводят к отличию расчетного распределения электромагнитного и температурного полей от технически реализуемых.

Таким образом, актуальна, представляет теоретический интерес и имеет практическую направленность научно-техническая проблема построения и исследования математических моделей СВЧ нагрева диэлектриков и проектирования и совершенствования на их основе устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

Тематика и содержание диссертационной работы соответствует планам научных исследований, являющихся составной частью программ «Развитие приоритетных направлений науки в Республике Татарстан на 2001-2005 годы» фонда НИОКР Республики Татарстан, «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» на 2003­2004 годы, а также темам хоздоговорных НИОКР, выполняемых научно­исследовательским центром Прикладной электродинамики (НИЦ ПРЭ) КГТУ им. А.Н.Туполева с 1995 по 2005 г.

**Цель работы.** Работа посвящена построению и исследованию математических моделей СВЧ нагрева диэлектриков с изменяющимися во времени и пространстве параметрами в камерах открытого и закрытого типа при многоэлементном возбуждении, в том числе, оптимальном с учетом случайных погрешностей технической реализации, изменяющихся во времени и пространстве источниках СВЧ энергии и диэлектриках и их использованию при проектировании и совершенствовании устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

**Задачи исследования.** В соответствии с указанной целью в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Построение и исследование математических моделей СВЧ нагрева:
* полубесконечного диэлектрика одиночными источниками СВЧ энергии и многоэлементными системами при изменении источников во времени и пространстве;
* диэлектрического слоя конечной толщины при разных способах і

. I

возбуждения электромагнитного поля;

* неподвижных и движущихся диэлектриков в камерах закрытого типа.
1. Разработка и исследование многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля и их оптимизация по среднеквадратичному и минимаксному критериям с учетом, имеющих место при технической реализации, случайных погрешностей.
2. Разработка вероятностного подхода в задачах размещения точек контроля в СВЧ камере микроволнового комплекса с адаптивным управлением и восстановления пространственного поля по результатам измерений в точках контроля. Реализация предложенных итерационных процедур не только в виде вычислительных алгоритмов, но и в виде соответствующих устройств.
3. Использование разработанных математических моделей при проектировании и совершенствовании устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов.

**Методы исследования.** При проведении теоретических исследований были использованы аналитические и численные (конечноразностные) методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, математические методы группового анализа дифференциальных уравнений в частных производных, методы оптимизации, методы математического моделирования, теории вероятностей, линейной алгебры.

**Достоверность и обоснованность.** Обоснованность и достоверность полученных результатов определяется корректным использованием математических методов, удовлетворительным совпадением результатов численного моделирования с результатами экспериментов, а также

**и**

экспертизами ВНЙИГПЭ и ФИПС и признанием ряда технических решений изобретениями и полезными моделями, защищенными авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ.

**Личный вклад автора.** Все основные научные результаты, изложенные в диссертации, принадлежат автору. В опубликованных в соавторстве работах, автор принимал участие в постановке задач, разработке математических моделей и алгоритмов расчетов, в проведении расчетов, экспериментов и анализе результатов.

Научная новизна. Уточнена математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика энергией плоской электромагнитной волны, предложенная Л.Э. Рикенглазом. Для построенной математической модели при определенных допущениях получено удобное для инженерной практики аналитическое решение.

Предложена математическая модель СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины, при разных способах возбуждения электромагнитного поля: а) с отражением падающей электромагнитной волны от нижней границы слоя; б) с отражением падающей электромагнитной волны от нижней границы слоя с поворотом плоскости поляризации; в) при встречном возбуждении двух падающих волн от некогерентных источников; г) при встречном возбуждении двух падающих волн от когерентных источников.

Для всех случаев определены допущения, при которых задача СВЧ нагрева имеет простое аналитическое решение удобное для инженерных расчетов.

Построена математическая модель СВЧ нагрева плоскослоистого диэлектрика при возбуждении электромагнитного поля плоской электромагнитной волной нормально падающей на его границу.

Предложена модифицированная нелинейная математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при линейной зависимости

коэффициента затухания от температуры. Найдена группа Ли, допускаемая нелинейным уравнением теплопроводности, определена полная система функционально независимых инвариантов, что позволило свести нелинейное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному *%* уравнению. j

Созданы математические модели равномерного СВЧ нагрева диэлектриков: 1) многоэлементной системой излучателей; 2)

многоэлементной излучающей системой, оптимизированной к погрешностям технической реализации; 3) основанной на принципах фокусировки многоэлементной системой излучателей, 4) для перемещающегося относительно неподвижного излучателя диэлектрика.

Для задач СВЧ нагрева 2 и 4 получены удобные для инженерных расчетов аналитические решения.

* Предложена математическая модель СВЧ нагрева диэлектрика в камерах закрытого типа прямоугольного и круглого сечений. Для исследования данных моделей СВЧ нагрева использован конечноразностный метод.
* Построена математическая модель СВЧ нагрева несжимаемой вязкой жидкости, текущей в цилиндрической трубе. Математическая модель исследована конечноразностным методом. Показано, что за счет изменения скорости течения и мощности СВЧ излучателя можно получить на выходе из трубы требуемую температуру жидкости.
* Предложен вероятностный подход построения систем контроля полей. Предложены алгоритмы выбора координат точек контроля и восстановления полей, в виде непрерывных функций, реализованные в виде новых технических решений, защищенных авторскими свидетельствами.
* Предложено новое техническое решение на способ и устройство для термообработки диэлектрических материалов, защищенное патентами РФ.

**Практическая значимость.** На основе математической модели СВЧ нагрева жидкости, движущейся в цилиндрической трубе, разработан опытный образец устройства СВЧ нагрева водонефтяных эмульсий (ВНЭ), экспериментально исследованный в НИЦ ПРЭ КГТУ им. А.Н.Туполева и в НГДУ «Лениногорскнефть».

Результаты моделирования СВЧ нагрева плоскослоистых диэлектриков использованы для определения режимов нагрева ВНЭ при её разделении на нефть и воду.

Результаты математического моделирования СВЧ нагрева ВНЭ в цилиндрическом и коаксиальном сепарационных объемах использованы при разработке модулей микроволновой рабочей камеры в датчиках обводненности сырой нефти, предназначенных для автоматического определения процентного соотношения ее компонент.

**Положения, выносимые на защиту** Модифицированные и новые математические модели СВЧ нагрева:

* полубесконечного диэлектрика и результаты их исследования;
* диэлектрика конечной толщины и результаты их сравнительного анализа;
* движущихся диэлектриков источником СВЧ энергии и результаты их исследования;
* диэлектриков в камерах закрытого типа и результаты их исследования; рекомендации по их использованию при разработке СВЧ камер для датчиков обводненности и в устройствах разделения ВНЭ на нефть и воду;
* результаты математического моделирования СВЧ нагрева диэлектрика многоточечными системами возбуждения электромагнитного поля с учетом случайных погрешностей технической реализации;
* статистический подход и методика размещения точек контроля полей в камерах СВЧ нагрева и структурная схема устройства для ее осуществления;
* алгоритмы восстановления полей в виде непрерывных функций по измерениям в дискретной совокупности точек и структурная схема устройства их реализующая;
* структурная схема устройства для равномерной термообработки диэлектрического материала в электромагнитном СВЧ поле;
* результаты внедрения разработанных математических моделей, методик и устройств в промышленность, научные исследования и в учебный процесс.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованных источников, включающего 256 наименования и 3-х приложений. Работа без приложений изложена на 274 страницах машинописного текста, включая 91 рисунок и 3 таблицы.

В первой главе проведен обзор основных направлений использования СВЧ электромагнитных полей в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, биологии и других областях хозяйственной деятельности. Многочисленными исследованиями, проводимыми в различных странах, установлена высокая эффективность использования СВЧ нагрева в различных областях хозяйственной деятельности.

Отмечены преимущества СВЧ нагрева диэлектриков по сравнению с традиционными способами нагрева, которые определяют необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, поиска новых приложений и повышения эффективности применения СВЧ электромагнитных полей.

К настоящему времени разработано значительное число технологических устройств СВЧ нагрева для различных областей хозяйственной деятельности. Большая часть указанных устройств СВЧ нагрева предназначена для экспериментальной отработки режимов воздействия энергии СВЧ на обрабатываемые материалы, ряд установок находится в опытной или промышленной эксплуатации.

Приведённый, далеко не полный перечень, устройств СВЧ нагрева показывает, что имеющиеся устройства являются узкоспециализированными, с фиксированными режимами СВЧ обработки конкретных материалов с заданными геометрическими размерами, параметрами влажности и т.д.

**Во второй главе** рассматриваются и исследуются одномерные по пространственной переменной математические модели СВЧ нагрева диэлектрика, заполняющего полуплоскость. Предложена модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика, учитывающая изменение температуры в диэлектрике за счет теплопроводности. Определены условия, при которых задача СВЧ нагрева допускает аналитическое решение и проведено его сравнение с решением задачи в адиабатическом приближении, полученным Рикенглазом Л.Э.

В главе также рассматриваются постановки задач СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при нормальном падении на его границу плоской электромагнитной волны. Для разных граничных условий приведены результаты сравнения полученных в данной главе аналитических решений задач СВЧ нагрева с известными решениями. Численными расчетами установлено, что хотя решения отличаются формой записи и трудоемкостью вычислений, однако дают практически одинаковые результаты.

Исследовано влияние зависимости амплитуды падающей волны от времени на распределение температуры в диэлектрике. Проведенные расчеты показали, что форма сигнала, подаваемого на вход системы возбуждения электромагнитного поля в диэлектрике не влияет на распределение температуры, а влияет лишь на скорость изменения температуры.

Методом конечных разностей исследована нелинейная математическая модель СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрика при линейной зависимости коэффициента затухания электромагнитной волны от температуры. Проведено сравнение полученного решения с решением аналогичной задачи, но в адиабатическом приближении, полученным Л.Э. Рикенглазом.

Качественное поведение температурных кривых осталось без изменения, однако в адиабатическом приближении отмечается большее различие между температурой на поверхности и температурой в глубине, так как в этом приближении пренебрегают изменением температуры за счет теплопроводности.

**Третья глава** посвящена построению и исследованию математических моделей СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины при нормальном падении на его границу плоской электромагнитной волны.

Рассмотрены разные модели распространения электромагнитного поля в слое диэлектрика:

а) поле в слое является результатом многократных отражений плоской волны между границей раздела диэлектрика с воздухом и отражающей границей,

б) поле является результатом многократных отражений от границ слоя двух ортогонально поляризованных плоских волн,

в) поле является результатом сложения прошедших плоских волн от двух некогерентных источников, расположенных по разные стороны от слоя диэлектрика,

г) поле является результатом сложения прошедших плоских волн от двух когерентных источников, расположенных по разные стороны от слоя диэлектрика.

Для всех перечисленных случаев определены условия, при которых задачи СВЧ нагрева допускают удобные для инженерных расчетов аналитические решения. Результаты проведенных расчетов показали, что наиболее равномерное распределение температуры в слое достигается при встречном возбуждении электромагнитного поля двумя некогерентными источниками.

Далее в главе рассмотрены задачи управляемого СВЧ нагрева: определить такую функцию удельной поглощенной мощности, чтобы к заданному моменту времени распределение температуры в диэлектрике совпало бы с требуемым распределением. Для решения задачи управления распределением температуры в диэлектрике использован метод моментов.

Для нахождения неотрицательной функции управления

рассматриваются задачи минимизации критерия близости требуемого распределения температуры и распределения, соответствующего найденной функции управления. В качестве критерия близости температурных распределений использовались среднеквадратическое и минимаксное приближения. Задачи управления СВЧ нагревом диэлектриков проиллюстрированы расчетными примерами.

В четвертой главе рассматриваются математические модели равномерного СВЧ нагрева с помощью многоэлементных систем возбуждения электромагнитного поля, в том числе оптимизированных к случайным погрешностям технической реализации и основанных на принципах фокусировки и с помощью перемещения диэлектрика.

Рассматривается задача СВЧ нагрева протяженного диэлектрика с помощью многоэлементной системы излучателей, расположенных над его поверхностью. Математическое моделирование заключается в аналитическом решении двумерного уравнения нестационарной теплопроводности при оптимизации функции удельной поглощенной мощности за счет выбора амплитуд возбуждения отдельных излучателей при заданном их расположении в многоэлементной системе возбуждения электромагнитного поля в диэлектрике.

Проведенными расчетами показан выигрыш от использования многоэлементных систем возбуждения по сравнению с одиночными излучателями.

Далее в главе рассматриваются задачи равномерного СВЧ нагрева с помощью многоэлементных систем излучателей, основанные на принципах фокусировки. Для сфокусированной апертуры характерно синфазное сложение излучаемых отдельными элементами полей в заданной области фокусировки, что позволяет создать в этой области электромагнитное поле максимально возможной интенсивности с учетом, ограничения на мощность, подводимую к системе возбуждения. Перемещая тем или иным способом область фокусировки в пространстве, можно осуществлять эффективную СВЧ обработку диэлектриков больших размеров.

Отмечена связь задачи оптимизации многоэлементной системы возбуждения в открытой камере микроволновой установки с задачей синтеза антенной решетки по заданной комплексной диаграмме направленности.

Приведен расчетный пример, показывающий, что за счет выбора области фокусировки в виде отрезка прямой или в виде полосы можно обеспечить равномерность распределения электромагнитной энергии вглубь диэлектрика.

Для эффективного использования технологических установок, использующих СВЧ энергию для нагрева диэлектрических материалов, необходимо разработать методы их оптимального проектирования с учетом неизбежных при их технической реализации случайных погрешностей и флуктуаций.

В главе сформулирована задача оптимизации амплитуд возбуждения излучателей по статистическому критерию эффективности в среднем.

На расчетных примерах показан выигрыш, достигаемый при оптимизации амплитуд возбуждения при условии наличия погрешностей технической реализации.

**В пятой главе** исследуются математические модели СВЧ нагрева диэлектриков в камерах закрытого типа прямоугольного и круглого поперечного сечений, выбор которых обусловлен, во-первых, геометрией СВЧ камер, в которых осуществляется СВЧ обработка, и во-вторых многочисленными исследованиями по возбуждению и распространению электромагнитных полей в прямоугольных и круглых резонаторах и волноводах.

При математическом моделировании СВЧ нагрева диэлектриков предполагается, что в СВЧ камере прямоугольного поперечного сечения возбуждается единственный тип волны. Наибольший практический интерес представляют моды с наибольшими значениями критической длины волны

£цИ#10.

Трехмерное уравнение нестационарной теплопроводности решалось конечноразностным методом по неявной схеме. Приведен пример расчета распределения температуры в поперечном сечении СВЧ камеры.

Далее в главе рассматриваются задачи СВЧ нагрева неподвижных и движущихся диэлектриков в СВЧ камерах круглого поперечного сечения. Подобные задачи возникают, например, при моделировании СВЧ нагрева в технологических устройствах получения товарной нефти из ВНЭ. Путем численных расчетов показано, что за счет выбора скорости движения и мощности СВЧ генератора можно получить на выходе из трубы требуемое распределение температуры жидкости. Если в поперечных сечениях СВЧ камеры, близких к источнику СВЧ энергии температура ВНЭ сильно зависит от расстояния до оси трубы, то на выходе из трубы температуры мало зависит от расстояния до оси.

**В шестой главе** на основе вероятностного подхода исследуются задачи оптимизации пространственного размещения датчиков, контролирующих электромагнитные и температурные поля в камерах СВЧ нагрева и задачи восстановления пространственных распределений этих полей.

В главе обсуждается возможность построения технологического комплекса СВЧ нагрева в виде системы автоматического управления с адаптацией параметров математической модели. Контроль

электромагнитных и температурных полей в камере СВЧ нагрева

осуществляется с помощью дискретной системы датчиков, увеличение числа которых приводит к усложнению системы контроля и отличию расчетных электромагнитного и температурного полей от реально существующих полей. Поэтому является важной задача наиболее достоверного восстановления этих полей при контроле их с помощью умеренного числа датчиков.

В главе на основе информационного критерия - количества

информации о поле, снимаемое с датчиков, предлагается итерационная

процедура определения координат датчиков. Приводится пример реализации вычислительной процедуры в виде устройства, ее осуществляющую.

Далее в главе на основе статистического подхода рассмотрены вопросы восстановления пространственных распределений полей по измерениям в дискретной совокупности точек контроля. Предложены алгоритмы нахождения коэффициентов разложения полей по базисным функциям и получены выражения для оценки погрешности восстановления полей.

Изложенные в главе вероятностные подходы и полученные решения задач размещения датчиков и восстановления полей проиллюстрированы расчетными примерами.

**Седьмая глава** посвящена исследованию влияния СВЧ электромагнитных полей на процесс сепарации ВНЭ, содержит математические модели, результаты математического и физического Моделирования-

Исследования процесса сепарации ВНЭ под действием гравитации, показали, что одним из основных факторов, влияющих на скорость движения нефтяных капель в ВНЭ, является их динамическая вязкость. При уменьшении динамической вязкости жидкости скорость движения сферической капли увеличивается тем больше, чем больше радиус капли; скорость движения капли при уменьшении ее динамической вязкости увеличивается меньше, чем при уменьшении динамической вязкости жидкости.

При математическом моделировании СВЧ нагрева ВНЭ, она рассматривается в виде плоскослоистой структуры, состоящей из трех слоев: нефть, межфазный слой (собственно ВНЭ) и вода. Геометрии плоскослоистой структуры соответствуют электромагнитные поля в виде плоских линейно-поляризованных волн, прохождение которых через плоскослоистую структуру может быть записано в аналитической форме. Температурное поле в плоскослоистой структуре описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности, которая решалась конечноразностным методом по консервативной неявной разностной схеме на сетке, узловые точки которой, совпадают с граничными точками слоев. В результате были получены кривые, отражающие зависимость распределения температуры в плоскослоистой структуре от толщины слоев для разного времени нагрева. По ним видно, что с увеличением времени нагрева температура слоев увеличивается, а распределение температуры в слоях становится более равномерным. Температура слоя ВНЭ увеличивается больше, чем температура слоев нефти и воды. С уменьшением толщины слоя ВНЭ улучшается равномерность его нагрева.

Аналогичные исследования были проведены для частот 433 и 915 МГц. Показано, что данные частоты удобнее применять для анализа компонентного состава ВНЭ в больших контрольных объемах, чем используемый на частоте 2450 МГц - 0.5 л, что вызвано увеличением рабочих длин волн и особенностями их распространения в диэлектрических средах.

Далее проведен анализ динамики сепарации ВНЭ с учетом движения слоев в ее процессе. Скорость движения границ фаз в рамках разработанной динамической модели расслоения в основном определяется скоростью движения капель дисперсной фазы, чей радиус лежит в диапазоне 50­80 мкм. В результате проведения вычислений на ЭВМ было получено, что для обеспечения 100%-го расслоения ВНЭ время воздействия СВЧ полем при заданных параметрах напряженности электрического поля для различного компонентного состава составляет от 3 до 5 минут. Полученные данные были подтверждены результатами физического моделирования при унитарной (микроволновой) и комбинированной (микроволновой и химической) обработке.

**В восьмой** главе приведено описание разработанных на основе проведенного математического моделирования устройств СВЧ нагрева нефтепродуктов, которые используются при проведении экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях.

Приведены результаты физического моделирования процесса сепарации ВНЭ в лабораторных условиях при разных режимах и длительностях СВЧ нагрева. Установлено, что наиболее эффективное отделение воды от ВНЭ как при добавлении, так и без добавления деэмульгатора, происходит при 40%-м режиме мощности СВЧ генератора.

Проведенные эксперименты процесса отделения воды от ВНЭ показали, что при СВЧ нагреве обеспечивается не только более быстрое, но и качественное отделение воды от ВНЭ.

В главе содержится описание функциональной схемы экспериментального образца технологического СВЧ модуля обработки ВНЭ в канале концевого делителя фаз (КДФ). Приведен расчет камеры электродинамической обработки ВНЭ, описание ее конструкции и внешний вид в составе промыслового модуля СВЧ обработки ВНЭ.

Приведен внешний вид и описание блока микроволновой рабочей камеры датчика обводненности нефти, который предназначен для автомати­ческого определения процентного соотношения воды и нефти в сырой нефти. Блок микроволновой рабочей камеры служит для забора, слива и обработки проб ВНЭ и представляет собой прямоугольный резонатор с размещенной внутри сепарационной емкостью цилиндрической формы. В процессе экспериментальных исследований установлено, что датчик обеспечивает высокую оперативность и точность контроля обводненности нефти по сравнению с известными приборами.

Также приведена блок схема и принцип работы устройства термообработки сыпучих и жидких диэлектриков в электромагнитном СВЧ поле.

**В приложении** содержатся дополнительные материалы и документы, подтверждающие некоторые положения диссертации и использование ее результатов.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 46 научных работ, в том числе 2 монографии, 7 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 6 статей в реферируемых трудах и сборниках докладов симпозиумов международных НТО, 2 авторских свидетельства СССР, 2 патента РФ. Автор имеет 14 единоличных публикаций.

Апробация **работы** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на научных конференциях КГТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, 1997-2005г., на 7-ой, 12-ой, 13-ой Международных Крымских конференциях «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 1997, 2002 и 2003 гг., на 1-й Международной конференции «Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизация проектирования», Казань, 1997 г., на 7-ой Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2001 г., на VIII Четаевской международной конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», Казань, 2002г., на Международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование», Казань, 2002 г., 2004 г., 2006 г., на Всероссийской конференции «Современные методы теории функций и смежные проблемы», Воронеж, 2003 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии», Москва, 8-15.12.2003 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии», Сочи,, 2004 г., на МНТК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ- 18», Казань, 2005 г., на Международной конференции «Antenna Theory and Techniques», Киев, Украина, 2005г., на Всероссийском семинаре, посвященном восьмидесятилетию Скимеля В.Н., Казань, 2005 г., на III, IV и V МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов», Волгоград, 2004 г., Нижний Новгород, 2005 г. и Самара, 2006 г.