

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

На правах рукописи



СМИРНОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**МНОГОСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СВЧ-ОБРАБОТКИ
ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Морозов Геннадий Александрович

Казань - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА	
1.1 Обзор. Постановка задачи.....	18
1.2 Анализ существующих технологий обработки органических отходов животноводства	24
1.3 Интенсификация обработки органических отходов животноводства энергией электромагнитного поля СВЧ диапазона	31
1.4 Микроволновые датчики контроля изменения влажности материалов в процессе сушки.....	35
1.5 Математическое моделирование процесса воздействия ЭМП СВЧ	41
1.6 Выводы по главе. Постановка задач исследования.....	44
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ-ОБРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА ЭНЕРГИЕЙ ЭМП НА ЧАСТОТАХ 915 И 2450 МГц.....	
2.1 Измерение диэлектрических свойств органических отходов животноводства	48
2.1.1 Лабораторный макет СВЧ сушки птичьего помета и методика проведения экспериментальных исследований	48
2.1.2 Лабораторные измерения методом коаксиального пробника.....	50
2.1.3 Лабораторные экспериментальные измерения диэлектрических свойств птичьего помета и конского навоза	54
2.2 Учет температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств птичьего помета и конского навоза при математическом моделировании процесса СВЧ-обработки.....	59
2.3. Математическое моделирование процесса СВЧ-обработки многослойных сред	60
2.4 Выводы по главе.....	71
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА ПРИ СВЧ-ОБРАБОТКЕ	
3.1 Методы измерения свойств диэлектриков	74

3.2 Существующий кольцевой резонансный датчик на основе микрополосковой линии	77
3.3 Расчет кольцевого резонансного датчика на основе симметричной полосковой линии.....	80
3.4 Компьютерное моделирование резонансного кольцевого датчика на основе симметричных полосковых линий.....	82
3.5 Изготовление экспериментального образца резонансного кольцевого датчика на основе симметричной полосковой линии.....	89
3.6 Оценка точности измерения диэлектрической проницаемости и влажности.....	94
3.7 Принципы построения датчиков температуры при СВЧ-обработке.....	95
3.8 Выводы по главе.....	97
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СВЧ-УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЕНСОРНОЙ СЕТИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ.....	
4.1 Структурная схема адаптивной системы управления работы СВЧ установки.....	100
4.2 Конструкция предлагаемой СВЧ-конвейерной установки для обработки птичьего помета и конского навоза	101
4.3 Разработка камеры СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза	104
4.4 Разработка системы измерения влажности и температуры птичьего помета и навоза в процессе СВЧ обработки.....	106
4.4.1 Конструкция секции обработки и контроля конвейерной СВЧ установки для обработки птичьего помета и конского навоза	109
4.4.2 Конвейерная СВЧ-установка по обработке птичьего помета и конского навоза	112
4.5 Адаптивная система. Нейросетевая модель	113
4.6 Система сквозного цифрового проектирования. Цифровой двойник	118
4.7 Выводы по главе.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Актуальность проблемы охраны окружающей среды в животноводстве усиливается в современных условиях в связи с его развитием и расширением процессов загрязнения природных ресурсов его отходами. За последние десять лет Республика Татарстан выделила более 2,5 млрд. рублей на активное развитие птицеводства и коневодства в регионе, контроль процессов переработки которых и будет рассматриваться в диссертации. При повышении численности поголовья увеличивается количество органических отходов указанных отраслей животноводства. Важнейшей проблемой является отсутствие систем их быстрой утилизации и переработки, а также отсутствие контроля за протеканием указанных процессов, учитывая, что органические отходы от птицеводства и коневодства в целом по Российской Федерации составляют более 200 млн. тонн в год. Трудность переработки заключается еще и в том, что разделенный на твердую и жидкую фракцию имеет влажность экскрементов от 30 до 75% соответственно. Поэтому в диссертации целенаправленно решались вопросы разработки СВЧ-комплексов для обработки органических отходов птицеводства и коневодства, как позволяющих автоматизировать процессы контроля за их протеканием с учетом особенностей обрабатываемых сред.

Статья 8.2.3. «Несоблюдение требований в области охраны окружающей среды при обращении с отходами животноводства» ФЗ от 17.06.2019 N

141-ФЗ "О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях" запрещает складирование и хранение органических отходов животноводства и влечет наложение крупных административных штрафов или административное приостановление деятельности соответствующих предприятий на срок до девяноста суток [98, 99].

Перед применением отходов в качестве удобрения, кормов или твердого топлива, они в обязательном порядке должны быть обработаны по соответствующим технологиям. Наиболее распространенными из них считаются компостирование, вермикомпостирование и термическое обеззараживание, ускоренная ферментация и анаэробное сбраживание, каждая из которых характеризуется своими достоинствами и недостатками. Все рассмотренные способы переработки органических отходов птицеводства и коневодства предполагают использование дорогостоящего оборудования или большие временные и/или энергетические затраты.

Существенное улучшение качества процесса переработки органических отходов птицеводства и коневодства, снижение энергетических затрат и сокращение продолжительности необходимого теплового воздействия можно обеспечить путем использования экологически чистой энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а затраты на проектирование, совершенствование и оптимизацию устройств СВЧ-нагрева существенно уменьшаются за счет построения и исследования математических моделей процессов, происходящих в рабочих камерах [28]. Наиболее совершенным, с точки зрения, возможностей достижения требуемых показателей качества СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства, являются технологические СВЧ-установки и комплексы, управление которыми основано на принципах адаптивной организации [9]. Для организации адаптивного контроля и управления процессами обработки органических отходов птицеводства и коневодства, необходимо разработать

многосенсорную систему контроля температуры и влажности обрабатываемой среды, встроенную в СВЧ-комплекс, непосредственно влияющих на электрофизические параметры обрабатываемой среды.

Исследованиям принципов построения адаптивных СВЧ-комплексов и датчиков, применяемых во встроенных многосенсорных системах, посвящены труды российских ученых Г.А. Морозова, О.А. Морозова, Ю.Е. Седельникова, Ю.С. Архангельского, В.А. Грачева, О.Г. Морозова, О.В. Осипова, А.В. Скрипаля, С.Е. Банкова, Д.А. Усанова, Ю.Г. Пастернака, А.С. Раевского, Б.А. Беляева, и др., ведущих исследования в КНИТУ-КАИ, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, СГУ им. Н.Г. Чернышевского, ВГТУ, ПГУТИ, ИРЭ РАН, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИФ им Л.В. Киренского и др. Известны разработки зарубежных ученых J. Thuery, J.M. Osepchuk, R. Hwang, R. Marani, A.G. Perri, M. Grande, A. D'Orazio, J. Huang, T. Wei, X. Lan, J. Fan и др.

В работах указанных авторов широко описаны принципы построения и реализация СВЧ-комплексов различного назначения, СВЧ-датчиков диэлектрических параметров на основе полосковых резонансных структур и волоконно-оптических датчиков температуры для мониторинга технологических процессов и электрофизических параметров обрабатываемых сред, принципы адаптивного управления.

Однако автор нашел лишь малое количество публикаций, посвященных многосенсорным системам контроля температуры и влажности в процессах СВЧ-обработки, именно органических отходов птицеводства и коневодства, и адаптивным принципам управления ими. Основываясь на работах других авторов, занимающихся проблемой совершенствования СВЧ-датчиков, было определено, что в ходе рассматриваемых нами процессов СВЧ-обработки наиболее приемлемым является применения датчиков резонансно-планарного типа, которые, однако, обладают относительно низкой добротностью и зависимостью показаний от площади соприкосновения с обрабатываемой средой как в зоне контроля, так и в зоне фидерных линий. Используемые СВЧ

и волоконно-оптические датчики, как правило, не обладают адресностью, что усложняет процессы сбора и обработки информации в многосенсорных системах. Рассмотренные в публикациях вопросы касаются частных задач, демонстрирующих только возможности СВЧ-обработки, но не представляют комплексного подхода к решению задач контроля обрабатываемых сред ни на стадии определения электрофизических параметров, ни в ходе технологического процесса, ни при определении состояния сред на этапе постобработки с учетом особенностей объектов контроля (обратный набор влажности).

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность научно-технической задачи разработки многосенсорных систем непрерывного неразрушающего контроля температуры и влажности органических отходов птицеводства и коневодства в ходе их СВЧ-обработки и принципов управления СВЧ-устройствами для создания электродинамических установок и их реализации с учетом особенностей поведения объектов обработки под воздействием энергии электромагнитных полей (ЭМП).

Представляемая диссертационная работа посвящена решению этой задачи.

Объект исследования: системы контроля и управления технологическими процессами СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства.

Предмет исследования: методы и средства многосенсорного контроля температуры и влажности в системах контроля и управления технологическими процессами СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства.

Цель работы: разработка системы контроля температуры и влажности органических отходов животноводства в ходе технологических процессов их СВЧ-обработки, на примере птичьего помета и конского навоза, с возможностью организации адаптивного управления качеством указанных

процессов на основе информации, полученной с СВЧ-датчиков влажности резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений и адресных волоконно-оптических датчиков температуры, организованными в единую многосенсорную сеть.

Научная задача диссертации состоит в исследовании диэлектрических характеристик птичьего помета и конского навоза, их зависимостей от температуры и влажности, исследовании влияния на них энергии ЭМП СВЧ-диапазона в ходе технологических процессов СВЧ-обработки, в частности, нагрева и сушки, с целью разработки алгоритмов адаптивного управления их протеканием, а также создании СВЧ-датчиков влажности резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений, сгруппированных с адресными волоконно-оптическими датчиками температуры, организованных в единую многосенсорную сеть для получения информации о текущих значениях температуры и влажности в ходе СВЧ-обработки, являющихся входными параметрами для контура адаптивного управления.

Решаемые задачи:

1. Анализ характеристик существующих и перспективных технологий обработки и переработки птичьего помета и конского навоза; выявление резервов для улучшения качества выходной продукции, основанных на использовании энергии ЭМП СВЧ-диапазона, адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия с получением для него информации с волоконно-оптических и СВЧ-датчиков температуры и влажности; определение на этой основе направлений и задач научных исследований.

2. Построение одномерной многослойной математической модели СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза, определяющей воздействие на них энергии ЭМП СВЧ-диапазона, для учета температурной и влажностной

зависимости их диэлектрических свойств, изменяющихся в процессе СВЧ-обработки, как основы адаптивного управления его параметрами.

3. Разработка резонансных планарно-кольцевых СВЧ-датчиков влажности с повышенной добротностью и экранированием фидерных линий, сгруппированных с адресным волоконно-оптическим измерителем температуры для одновременного получения текущей информации о температуре и влажности птичьего помета и конского навоза в ходе процесса СВЧ-обработки для адаптивного управления его параметрами.

4. Разработка практических рекомендаций для проектирования и создания многосенсорных систем контроля температуры и влажности, встроенных в электродинамические реакторы адаптивных СВЧ-комплексов, реализующих технологические процессы СВЧ-обработки органических отходов животноводства, а также алгоритмов адаптивного управления ими.

Методы исследования, достоверность и обоснованность.

При выполнении данной диссертационной работы применялись методы решения задач математической физики, численные методы решения электродинамических задач, метод статистической обработки результатов измерений, нейросетевые и генетические алгоритмы для решения задач адаптивного управления.

Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами исследований других авторов, а также с результатами экспериментального исследования созданных устройств. При решении задач использованы современные программные средства, в том числе Mathcad, CST Studio.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая

значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих и перспективных технологий переработки птичьего помета и конского навоза, определены пути улучшения технико-экономических характеристик процесса тепловой обработки и качества конечного сырья на основе применения СВЧ-технологий, сформулированы общие принципы адаптивного управления технологическими СВЧ-комплексами и предложена схема адаптивной установки, осуществляющей обработку птичьего помета и конского навоза, и базирующейся на мониторинге параметров объекта обработки и характеристик воздействия на них ЭМП СВЧ-диапазона средствами резонансно-планарных кольцевых датчиков на основе симметричных полосковых линий с решением задач управления методами математического моделирования.

Вторая глава посвящена разработке одномерной многослойной математической модели процесса обработки птичьего помета и конского навоза. Для получения исходных данных для математической модели проведено экспериментальное исследование, что позволило ввести граничные условия на модель и диапазон ее устойчивости. В экспериментальном исследовании диэлектрических свойств птичьего помета и конского навоза, были получены зависимости диэлектрических свойств от температуры и влажности материала. Разработанная модель позволила определить алгоритмы адаптивного управления технологическим процессом СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза.

Третья глава посвящена разработке резонансных планарно-кольцевых СВЧ-датчиков на основе симметричной полосковой линии, предлагаемых для использования в многосенсорной системе мониторинга СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза. Получено улучшение их метрологических

характеристик за счет использования симметричных фидерных линий и экранирования чувствительного элемента от объемного соприкосновения с обрабатываемой средой. Кроме этого, датчики группируются с адресными волоконно-оптическими датчиками температуры для дальнейшего создания многосенсорной системы.

Четвертая глава посвящена разработке практических рекомендаций по проектированию многосенсорных систем контроля технологических процессов в рабочих СВЧ-камерах для обработки органических отходов птицеводства и коневодства, разработке конвейерной установки по СВЧ-обработке органических отходов животноводства с системой контроля и адаптивного управления технологическим процессом.

Научная новизна

1. Проведен системный анализ характеристик существующих и перспективных технологий обработки и переработки органических отходов животноводства, который позволил определить пути улучшения качества выходной продукции, основанные на использовании энергии ЭМП СВЧ-диапазона, адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия с получением для него информации с волоконно-оптических и СВЧ-датчиков температуры и влажности с улучшенными метрологическими и функциональными параметрами.

2. Разработана одномерная многослойная математическая модель СВЧ нагрева и сушки птичьего помета и конского навоза, позволяющая определить уровень воздействия на них энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом изменяющихся температурной и влажностной зависимости диэлектрических свойств обрабатываемых сред и сформулировать рекомендации для обеспечения наиболее эффективных режимов электродинамического воздействия и адаптивного управления им.

3. Разработаны принципы построения резонансно-планарного кольцевого СВЧ-датчика влажности на основе симметричной полосковой

линии, отличающегося от существующих повышенной добротностью, отсутствием физического влияния обрабатываемой среды на погрешность измерений в зоне фидерных линий, и сгруппированных в зоне контроля с волоконно-оптическими датчиками температуры на основе адресных волоконных брэгговских структур, с адресными частотами, лежащими в диапазоне резонансных частот датчиков влажности, что позволяет при синхронном опросе использовать единые принципы сбора и детектирования информации и визуализировать поля распределения температур и влажностей в указанной зоне.

4. На базе разработанных моделей процессов СВЧ-обработки и принципов измерений СВЧ-датчиков влажности и волоконно-оптических датчиков температуры разработана структура многосенсорной системы контроля температуры и влажности, встроенная в адаптивный СВЧ-комплекс для реализации процессов СВЧ-обработки органических отходов животноводства и алгоритмы управления им для достижения высокого качества выходной продукции.

Практическая ценность работы. Совокупность результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, убедительно доказывает возможность создания многосенсорной системы контроля температуры и влажности для разработки установок и комплексов СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства, и адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологических процессов нагрева и сушки. Подтверждением этому являются разработанные СВЧ-устройства, а именно: опытные образцы лабораторной и промышленной электродинамических установок СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза, резонансно-планарные кольцевые СВЧ-датчики на основе симметричной полосковой линии для использования в качестве сенсоров для измерения влажности, волоконно-оптические датчики температуры на основе адресных волоконных

брэгговских структур, программное обеспечение для адаптивного управления пара-метрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

Полученные результаты внедрены в научно-исследовательский процесс КНИТУ-КАИ и использованы в рамках работ с ООО «Санитарная экология» при изготовлении СВЧ-установки для сушки конского навоза.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (2016 г.), XXIII-XXVI Международных молодёжных научных конференциях «Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (2016-2019 гг.), 26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016 г.), МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (2017, 2020 гг.), XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT, 2017 г.), XVIII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (2020 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 15 научных работ, в том числе семь статей в журналах, включенных в перечень ВАК, из которых две по специальности 05.11.13, две статьи в изданиях, цитируемых в Web of Science и Scopus, 6 работ в сборниках докладов и материалов международных и всероссийских конференций. Получено решение о выдаче патента на изобретение. Две работы написаны автором единолично.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 108 наименований, и приложения. Работа без приложения изложена на 141 страницах машинописного текста, включая 56 рисунков и 18 таблиц.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по пунктам:

1. Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (усовершенствованы существующие методы контроля температуры и влажности органических отходов птицеводства и коневодства в ходе их СВЧ-обработки на основе улучшенных по измерительным и функциональным характеристикам СВЧ-датчиков влажности резонансно-планарного типа, построенных на основе симметричной полосковой линии, сгруппированных с адресными волоконно-оптическими датчиками температуры).

2. Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля (разработаны методы проектирования многосенсорных систем контроля температуры и влажности органических отходов животноводства на указанных выше датчиках и на основе математической модели и алгоритмов адаптивного управления технологическим процессом СВЧ-обработки с учетом особенностей изменения электрофизических характеристик обрабатываемой среды в ходе его реализации).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Структура многосенсорной системы контроля температуры и влажности и алгоритмы информационно-измерительных процессов, обеспечивающих ее работоспособность, применение которых для реализации адаптивных процессов СВЧ-обработки органических отходов животноводства на примере птичьего помета и конского навоза позволит повысить качество выходного продукта.

2. Одномерная многослойная математическая модель СВЧ-обработки, позволяющая сформулировать рекомендации для обеспечения наиболее эффективных режимов процесса СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства и адаптивного управления им.

3. Принципы построения и конструкция разработанного резонансно-планарного кольцевого СВЧ-датчика на основе симметричной полосковой линии для измерения влажности, отличающегося повышенной добротностью и снижением влияния обрабатываемого материала на его точность, сгруппированного с адресным волоконно-оптическим измерителем температуры, позволяющим обеспечить одновременное получение адресной текущей информации о температуре и влажности птичьего помета и конского навоза в ходе процесса СВЧ-обработки, реализовать адресную визуализацию распределения полей температур и влажности в зонах контроля, упростить сбор и обработку данных в многосенсорной системе.

4. Практические рекомендации по разработке и проектированию многосенсорных систем контроля температуры и влажности обрабатываемых сред, встроенных в СВЧ-комплексы обработки органических отходов птицеводства и коневодства, датчиков для их построения, алгоритмов адаптивного управления параметрами технологических процессов СВЧ-обработки.

Личный вклад автора заключается в разработке и создании: математической модели воздействия энергии ЭМП СВЧ-диапазона на обрабатываемые среды; резонансного планарно-кольцевого СВЧ-датчика влажности на основе симметричной полосковой линии, сгруппированного с адресным волоконно-оптическим датчиком температуры; многосенсорной системы, ее лабораторного и экспериментального вариантов; алгоритмов адаптивного управления процессами СВЧ-обработки с учетом особенностей изменения электрофизических характеристик обрабатываемой среды в ходе его реализации. Автор лично ставил модельные и физические эксперименты

по исследованию программных и аппаратных узлов многосенсорной системы контроля температуры и влажности и участвовал в их проведении. Апробация, опубликование и внедрение результатов осуществлялось автором лично или под его руководством.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

Современный уровень развития животноводческой отрасли и состояние её сырьевой базы требуют принципиально нового подхода проблеме использования внутренних ресурсов. Сущность этого подхода состоит в создании и внедрении малоотходных или безотходных технологий, позволяющих максимально и комплексно включать в хозяйственный оборот буквально все сырьевые ресурсы, которые образуются и накапливаются в животноводческих хозяйствах. Рациональность такого подхода обусловлена двумя причинами: исключение ущерба, наносимого окружающей природной среде в результате накопления отходов, и создание условий для получения дополнительного дохода от реализации уже переработанного биоматериала [1-2].

Отходы животноводства необходимо карантинировать и обеззараживать. Обеззараживание может проводиться химическим или термическим методом в короткие сроки, либо естественным путем. Согласно РД-АПК 1.10.15.02-08 естественное биологическое обеззараживание осуществляется путем выдерживания в секционных навозохранилищах или прудах-накопителях в течение определенного срока [3].

1.1 Обзор. Постановка задачи

Статистика отходов животноводческих ферм РФ за 2019 г. приведена в таблице 1.1[1-3].

Таблица 1.1 – Статистика отходов животноводческих ферм РФ за 2019 г.

Вид животных	Выход навоза от одного животного		Поголовье, млн	Выход навоза всего поголовья, млн.т.
	кг/сутки	т/год		
Крупный рогатый скот	22	8	18 126	145
Свиньи	5	1,8	25 163,17	45
Овцы	4	1,5	20 654,96	29
Птица	0,3	0,110	544 690,6	60
Лошади	25	10	1 310,88	12

Отходы производства и потребления подразделяются на 5 классов опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду. Классификация отходов в зависимости от источника их образования и других факторов приводится в Федеральном классификационном каталоге отходов, утвержденном Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (в ред. от 28.11.2017; далее — ФККО).

Таблица 1.2 – Сводная таблица по видам навоза и помета, и их классы опасности

Навоз и помет	
Наименование отхода	Класс опасности
Навоз крупного рогатого скота	IV
Навоз конский	IV
Навоз мелкого рогатого скота	IV
Навоз пушных зверей	IV
Навоз свиней	III
Помет куриный	III

По сводной таблице 1.4 видно, что птичий помет и навоз свиной являются наиболее опасными биоматериалами, и как отход производства нужно передавать организации, имеющей лицензию на сбор, транспортировку этих отходов.

За последние десять лет Республика Татарстан выделила более 2,5 млрд рублей на активное развитие коневодства и птицеводства в регионе. При повышении численности поголовья, увеличивается количество органических отходов. Поэтому при разработке СВЧ-установки были использованы свойства птичьего помета и конского навоза.

Таблица 1.3 – Химический состав птичьего помета [4]

Химический элемент		Содержание, %	
Азот	Мочевая кислота	80	8-21
	Белок	10	
	Аммиак	7	
	Нитраты	0.5	
Кальций		до 8.5	
Сырой жир (эфирный экстракт)		2,9–4,5	
Сырая клетчатка		14,25	
Безазотистые экстрактивные вещества		46–48	
Лизин		0.7-0.8	
Гистидин		0.15-0.20	
Аргинин		0.35-0.42	
Аспаргиновая кислота		1.01-1.02	
Треонин		0.5-0.6	
Серин		0.5-0.7	
Глутаминовая кислота		1.2-1.3	
Пролин		0.2-0.3	
Глицин		1.1-1.3	

Аланин	0.7-0.8
Валин	0.6
Изолейцин	0.4-0.5
Лейцин	0.67-0.85
Тирозин	0.17-0.20
Фениланин	0.36-0.45
Медь	0.0025-0.0094
Железо	0.01-0.04
Цинк	0.004-0.056
Марганец	0.5-1
Магний	0.019-0.044

Таблица 1.4 – Химический состав конского навоза [22]

Химический элемент	Содержание, %
Вода	71,3
Органическое вещество	25,4
Азот (N) общий	0,58
- белковый	0,35
- аммиачный	0,19
Фосфор	0,28
Калий	0,63
Известь	0,21
Магнезия	0,14
Серная кислота	0,07
Хлор	0,04
Кремневая кислота	1,77
Окислы Al и Fe	0,11

Разделенный навоз на твердую и жидкую фракцию имеет влажность экскрементов 30–75%. В виде подстилки используются солома, торф, опилки и стружка хвойных пород. Подстилка выполняет функцию антисептика, подавляя активность бактерий, являющихся возбудителями различных болезней; приглушает свойственный навозу неприятный запах.

В статье 8.2.3 КоАП РФ «Несоблюдение требований в области охраны окружающей среды при обращении с отходами животноводства» ФЗ от 17.06.2019 N 141-ФЗ "О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях" запрещается складирование и хранение отходов животноводства, влечет наложение крупных административных штрафов или административное приостановление деятельности на срок до девяноста суток. Хранение навоза дольше 11 месяцев требует наличия лицензии.

Свежий навоз, как отход животноводства, для удобрения растений не используется, так как в такой массе происходят биологические и химические процессы, пагубно влияющие на удобряемую почву. Перед использованием навоза в качестве удобрения, навоз в обязательном порядке должен быть обработан особым способом с использованием различных технологий.

В настоящее время уже существуют различные технологии переработки навоза. Наиболее распространенными технологиями считаются:

- компостирование – это аэробный процесс, основанный на разложении органических веществ под влиянием микроорганизмов. Компостирование требует наличие воздуха и поддержание внутреннего биологического тепла, высокой влажности и наличия микроорганизмов;

- анаэробное сбраживание – процесс превращения органического вещества, протекающий в бескислородной среде под действием анаэробных бактерий, в биогаз [6];

- пиролиз – процесс термической деструкции органической массы, протекающий при температурах 300-700°C в бескислородной среде [6];

– для термической сушки навоза и помета применяют сушилки различных конструкций: барабанные, цепные, валковые, ленточные, пневматические, вальцовые, сушилки со взвешенным слоем [7];

– линия вакуумной сушки предусматривает использование принципа многостадийной обработки навоза и помета: механическое отделение жидкости из навозной массы (центрифугирование, фильтрация, отжим и т. д.); выпаривание и распыление [7].

Рассмотренные способы переработки навоза предполагают использование дорогостоящего оборудования и большие временные затраты.

Такая продукция животноводства, как птичий помет и навоз, давно признана исключительно полезным натуральным удобрением для взращивания хорошего урожая и не только [8]. Используется для удобрения почв, отопления и обогрева конюшни, строительства или утепления зданий.

Благодаря современным технологиям топливные брикеты из птичьего помета и конского навоза приобрели огромную популярность в качестве экологически безопасного биотоплива для различных отопительных систем. Масштабное промышленное изготовление топливных брикетов из навоза заключается в высокотемпературной сушке и гранулировании сырья, после чего оно превращается в твердое биотопливо и органические удобрения. Благодаря масштабной промышленной переработке навоза ликвидируется проблема утилизации отходов жизнедеятельности животноводства, а человечество приобретает в результате сплошную выгоду от этого процесса [8].

Наиболее распространенный вид топливных материалов из навоза производят в виде гранул (пеллет) и брикетов, изготавливаемых при помощи прессования биомассы. Пеллеты и брикеты состоят из навоза, помета, опилок или древесной стружки. Сырье для топлива проходит процесс высокотермической сушки, а после при помощи прессования помета формируются евродрова в форме брикетов. Органическое топливо в брикетах

или гранулах из навоза по достоинству ценится на потребительском рынке. Область их применения в хозяйстве довольно широка - отопление теплиц, каминов частных домов, печей и котлов. В топках тепловых электростанций также очень успешно нашло свое применение такое биотопливо. Топливный навозный брикет вырабатывает дешевое электричество, являясь незаменимым сырьем в бытовых и производственных нуждах [8].

Благодаря низкому уровню зольности и небольшому проценту выделяемого углекислого газа популярность топливных брикетов из навоза растет с каждым годом. Сравнение брикетов с другими видами топлива приведены в таблице 1.5 [8].

Таблица 1.5 – Энергоэффективность видов топлива [8, 107]

Вид топлива	Теплота сгорания (МДж/кг)	Калорийность (ккал)	%зола	%серы
Каменный уголь	15-25	4500-5200	10-35	1-3
Бурый уголь	14-22	4000-4300	10-35	1-3
Дрова	10	2000	2	0
Брикеты торфяные	14,9	3200	23	1-3
Брикеты навозные	18,4	4800-5000	2,5	0,1
Пеллеты древесные	18	4500-4800	6	0,7
Природный газ	35-38 МДж/м ³	-	-	-

Теплота сгорания навозных топливных брикетов сравнима с углем. За счет меньшего образования продуктов сгорания, увеличивается срок службы оборудования. Зола (1-2,5%), образующуюся при сгорании топливных брикетов, в дальнейшем можно использовать как минеральное удобрение. Малый процент серы при сгорании (0,1%) практически не наносит вреда окружающей среде [8].

В ГОСТ Р 55115-2012 (ЕН 14961-3:2011) «Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива» указаны требования к

топливным брикетам. Влажность изготовленного продукта должна быть 10-15%.

Существенное улучшение качества процесса переработки навоза, снижение энергетических и финансовых затрат, сокращение продолжительности переработки позволяет получить использование экологически чистой энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона [9].

Анализ научно-технических литературных источников показывает недостаточность исследований и разработок устройств микроволновой переработки навоза, соответственно, и вопросы выбора режима и частоты воздействия, проектирования и создания специализированных лабораторных и промышленных СВЧ-устройств обработки птичьего помета и конского навоза, управления параметрами электродинамического воздействия остаются без рассмотрения [9].

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность научно-технической задачи разработки СВЧ-устройств для создания электродинамических реакторов для быстрой переработки навоза в брикетированное или пеллетированное твердое топливо [9].

1.2 Анализ существующих технологий обработки органических отходов животноводства

Большие объемы птичьего помета и навоза, образующихся в процессе деятельности животноводческих предприятий, сложность переработки и утилизации указывают на необходимость создания и использования разнообразных эффективных способов решения этих проблем [10, 18].

Одним из направлений решения задачи эффективной переработки навоза является подготовка навоза к использованию как полива на сельскохозяйственных полях. При этом твердая фракция осадка компостируется, а жидкая после выдерживания и обеззараживания поступает на полив полей

(патент Морозова Г.А. Обработка стоков животноводческих ферм), где проводится почвенная очистка и доочистка стоков [12,18].

К малоотходным способам переработки и утилизации навоза также относится метод анаэробного метанового сбраживания [18]. Процессы анаэробного брожения в реакторах с получением метаносодержащего газа, в основном аналогичны таким же процессам в отстойниках, но в результате герметизации, повышение температуры и перемешивание биомассы, распад сложных органических веществ идет значительно быстрее [18].

Одним из способов интенсификации анаэробной ферментации навоза – ведение данного процесса в термофильном режиме (45-57°C) с использованием соответствующих микроорганизмов [12].

Компостирование. Компостирование – это способ приготовления удобрений путём обезвреживания бытовых, пищевых, сельскохозяйственных и некоторых промышленных отходов и отбросов, основанный на естественном разложении органических веществ под влиянием микроорганизмов. Это аэробный процесс (требующий присутствия воздуха) разложения органических твердых отходов. В этом случае сырье для компостирования обычно помещают в бурты и компостеры (компостные ящики, бочки, специальные конструкции). Помимо воздуха компостирование требует поддержание внутреннего биологического тепла, высокой влажности и наличия микроорганизмов [12].

Получаемый продукт – компост многоцелевого назначения представляет собой однородную сухую (55-70% влажности) сыпучую массу темно-коричневого цвета без неприятного запаха, долгое время может храниться в буртах под открытым небом, технологичен для погрузки, перевозки и внесения в почву [13,21].

К недостаткам способа утилизации навоза следует отнести необходимость решения ветеринарно-санитарных вопросов необходимо в технологических процессах переработки органических отходов, обработка

режимов, обеспечивающих их обеззараживание от возбудителей инфекционных и инвазионных заболеваний животных при возникновении эпизоотий на животноводческих фермах и птицеводческих предприятий [11].

Анаэробное сбраживание. Анаэробное сбраживание – это процесс превращения органического вещества, протекающий в бескислородной среде под действием анаэробных бактерий, в биогаз [6].

Анаэробное сбраживание осуществляется в метантенке, где осадок постоянно перемешивается и подогревается. На процесс анаэробного сбраживания осадок поступает без предварительного обезвоживания с высокой влажностью. Процесс распада органического вещества в зависимости от температуры разделяют на мезофильный и термофильный [6].

В результате анаэробного сбраживания образуется 0,8-1,2 м³ биогаза из 1 кг сбраживаемого навоза. Биогаз на 60-67 % состоит из метана, 30-33 % – из углекислого газа, 1-2 % – из водорода, 0,5 % – из азота и имеет теплоту сгорания 15,9-27,8 МДж/м³. На объемный выход биогаза влияет количество жиров, белков и углеводов в сырье [6].

Пиролиз. Пиролиз – процесс термической деструкции органической массы, протекающий при температурах 300-700°С в бескислородной среде. В результате пиролиза образуется пиролизная жидкость и твердый остаток (биоуголь). Скорость нагрева материала при быстром пиролизе обычно составляет 10-200 °С/с. Пиролизная жидкость применяется как топливо для котлов, двигателей внутреннего сгорания для получения тепловой и электрической энергии, а также жидкого топлива для транспорта [6].

Сушка навоза и помета. Сушка навоза и помета является новым способом переработки отходов в органическое удобрение и биотопливо. Навоз и помет при помощи специальных установок и оборудования высушивают до порошкообразного состояния и (или) при необходимости полученную сыпучую массу гранулируют. Это позволяет хранить и использовать навоз и помет по мере потребности, а также расфасовывать в различную упаковочную

тару для розничной продажи. Сушка позволяет уменьшить объем первоначальной массы навоза и помета более чем в 10 раз (в зависимости от влажности исходного сырья). Применяют в основном два вида сушки – термическую и вакуумную [7].

Получаемые брикеты в процессе сушки птичьего помета и навоза обычно используются как экологически чистое биотопливо для обогрева, теплицы, бани или дачного дома, вполне заменяя дрова и даже уголь. Что становится все более актуальным на фоне стремительного подорожания традиционных энергоносителей [8].

Термическая сушка птичьего помета и навоза. Для термической сушки навоза и помета применяют сушилки различных конструкций: барабанные, цепные, валковые, ленточные, пневматические, вальцовые, сушилки со взвешенным слоем. Во всех типах сушилок, кроме вальцовой, использован конвективный способ сушки, при котором тепловая энергия, необходимая для испарения влаги, непосредственно передается от теплоносителя к навозу и помету. В качестве теплоносителя или сушильного агента чаще всего используются топочные газы с температурой от 500 до 800°С. Для сушки навоза и помета наибольшее распространение получили барабанные сушилки с прямоточным движением осадка и топочных газов [7].

Термическая сушка навоза и помета в специальных барабанных сушильных установках – наиболее эффективный способ переработки этого ценного органического удобрения. Ее применяют на Глебовской птицефабрике Московской области. При термической сушке масса сырого навоза и помета уменьшается в 3–4 раза, а физические свойства сухого удобрения позволяют вносить его в почву практически всеми машинами, предназначенными для разбрасывания минеральных удобрений. Сушка осуществляется при температуре 600–800°С, что способствует уничтожению патогенных бактерий, яиц гельминтов и семян сорняков. В процессе термической обработки сырой навоз и помет превращается в сыпучее

вещество влажностью 12–14%. Из 1 тонны влажностью 65–70% получается до 300–350 кг сухого продукта [7].

Термически высушенный навоз и помет не имеет неприятного запаха и может быть затарен в бумажные или полиэтиленовые мешки. Это высококонцентрированное органическое удобрение, в котором органического вещества содержится до 80%, азота (N) – 4–6%, фосфора (P₂₀₅) – 4–5%, калия (K_{2O}) – 2,0–2,5%, кальция (CaO) – 5–6%. Азотистые соединения представлены главным образом белками и продуктами их распада; доля небелкового азота не превышает 10–12% общего; рН 6,8–7,8 [7].

К недостаткам термической сушки можно отнести принцип многостадийной обработки исходного материала. Многостадийность используемых на практике линий сушки приводит к значительным капиталовложениям на этапе формирования участков обезвоживания. Кроме того, процессы выпаривания и распыления, как правило, проводятся при температурах от 90 до 150°C, что недопустимо для таких веществ, как витамины, сахара, некоторые белковые соединения, аминокислоты и т. д. Подобные вещества желательно обрабатывать в диапазоне температур от 40 до 90°C [7].

Вакуумная сушка птичьего помета и навоза. При производстве вакуумных сушилок в основе лежит непрерывный экологически безопасный одностадийный технологический процесс сушки в вакууме, позволяющий обеспечивать обработку навоза/помета в режиме щадящих температур с сохранением полезных удобрительных химических элементов в органическом удобрении. После переработки навоза и помета получается сухой порошок, а сточная вода (конденсат) направляется на очистные сооружения для последующей очистки и обеззараживания [14].

Оборудование для переработки навоза и помета в органические удобрения, при помощи вакуумной сушки, разработано российскими учеными

в 2009–2010 гг. По КПД и стоимости оно значительно эффективнее имеющихся европейских и американских аналогов [7].

Основная задача работы оборудования состоит в уменьшении влагосодержания исходного продукта без изменение химического состава, необходимости в течение ведения процесса поддерживать баланс потоков подводимого тепла (Q), требуемого для проведения технологического процесса, и потока массы паров воды (M_p), выделяющихся и удаляемых в процессе сушки [100].

Микроволновая сушка птичьего помета и навоза. В настоящее время разрабатываются новые методы переработки птичьего помета и навоза, такие как применение микробиологических препаратов, использование СВЧ-установок и другие, которые позволяют в полной мере использовать отходы животноводства в качестве удобрения, источника минеральных веществ для подкормки сельскохозяйственных животных и птицы, биотоплива [12, 15].

В Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева – КАИ проведены исследования по применению технологий микроволновой сушки навоза и помета позволяющие создавать экологически чистое топливо из навоза с одновременным обеззараживанием обрабатываемого материала (патент Морозова Г.А. Обработка стоков животноводческих ферм).

В бактериологическом отделе ФГБУ «Кемеровская МВЛ» проведенные исследования показали эффективность обеззараживания навоза и помета от птиц СВЧ-волнами в бактериальном и паразитарном отношении. Анализ пробы помёта кур, обработанного СВЧ-волнами, показало отсутствие условно-патогенных микроорганизмов и жизнеспособных личинок и яиц гельминтов. После воздействия СВЧ-волнами на свиной навоз наблюдался аналогичный эффект, как и при обработке куриного помета [15].

Тем не менее метод СВЧ обработки применительно к навозу и помету в настоящее время изучен слабо. В тоже время после СВЧ обработки сухой

навоз храниться дольше, при этом не источает неприятных запахов, и, как правило, вносится в почву как удобрение сразу после СВЧ сушки или используется в качестве кормовой добавки для крупного рогатого скота. Высушенный птичий помет может использоваться как альтернативное биотопливо для генерирования электричества и / или тепла и заменить другие виды топлива.

Современное состояние научно-технических исследований в области совершенствования методов переработки птичьего помета и конского навоза характеризуется следующими сформировавшимися особенностями путем развития [5, 16]:

1. Разработка новой и модернизация существующей технической базы перерабатывающих производств, включающих средства предварительной обработки (транспортировка, хранение, измельчение, грануляция) [5, 16].

2. Применение физических методов для интенсификации процессов переработки птичьего помета и навоза, осуществляющих воздействие на обрабатываемый материал электромагнитных полей СВЧ диапазона [5, 16].

Таблица 1.6 – Сравнительная таблица

	Финанс овые затраты	Длительнос ть переработки	Переработ ка в твердое топливо	Обеззараживан ие	Экологическ ое
Анаэробное сбраживание	-	-	-	-	-
Компостирован ие	+	-	-	-	-
Пиролиз	-	-	-	+	+
Термическая сушка	-	-	+	+	-
Вакуумная сушка	-	-	+	+	+
СВЧ сушка	-	+	+	+	+

Как можно заметить все рассмотренные способы переработки птичьего помета и конского навоза предполагают использование сложного технологического процесса, дорогостоящего оборудования или большие временные затраты. СВЧ-обработка переработка, по нашей оценке, при сравнительной дороговизне оборудования обладает экологичностью, малыми временными затратами на обработку, высокой скоростью преобразования энергии в тепловую, обеззараживанием, что позволяет существенно снизить затраты.

1.3 Интенсификация обработки органических отходов животноводства энергией электромагнитного поля СВЧ диапазона

Интенсификация переработки птичьего помета и навоза электромагнитной энергией поля СВЧ диапазона возможна при разработке конструкции резонаторной камеры для СВЧ нагрева с равномерным нагревом в любой части внутреннего объема обрабатываемого материала [17]. Объем камер должен быть достаточно большим, чтобы в течение каждого цикла равномерно обрабатывать значительное количество материала и полностью использовать мощность СВЧ генератора [17, 18].

С помощью СВЧ энергии можно не только сократить время обработки и равномерно нагревать диэлектрик по его объему, но и получить по желанию любое заданное распределение температур. Поэтому СВЧ-обработка создает возможность многократного ускорения ряда технологических процессов [19].

СВЧ анаэробное сбраживание. Из источников научно-технической и патентной литературы известно использование СВЧ-нагрева биомассы при выработке биогаза из навоза. Достоинство применения СВЧ-нагрева заключается в том, что с помощью СВЧ-энергии можно не только равномерно нагревать диэлектрик по его объему, но и получать по желанию любое заданное распределение температур. Поэтому при СВЧ-нагреве открываются

возможности многократного ускорения ряда технологических процессов. В известном способе для нагревания биомассы используется один СВЧ излучатель на весь метантенк, и интенсификация процесса позволяет увеличить эффективность выхода биогаза на 20-40% в зависимости от исходного сырья [19].

СВЧ пиролиз. Пиролиз - термическая деструкция исходного вещества без доступа кислорода. Важнейшим параметром, влияющим на процесс пиролиза, выступает температура в реакторе. В зависимости от этого выделяют три вида пиролиза [21, 101]:

1. мягкий пиролиз происходит при температурах до 500°C;
2. нормальный (средний) – 500-800°C;
3. жесткий пиролиз – 800-1100°C.

Температура определяет степень деструкции исходных веществ и состава продуктов пиролиза. С ростом температуры соотношение между тремя фазами продуктов разложения изменяется: становится меньше выход жидких и твердых (полукокс в случае мягкого пиролиза, кокс в двух других случаях) остатков и увеличивается выход газов, обладающих все меньшей теплотой сгорания [21, 101].

Наиболее перспективным с экологической точки зрения представляется извлечение органических составляющих в результате СВЧ пиролиза. Основным недостатком «традиционной» схемы теплового пиролиза является ограниченная скорость подвода тепла в область реакции. СВЧ пиролиз позволяет производить объемный нагрев вещества, а также оперативно регулировать скорость пиролитических реакций и состав продуктов на выходе [21, 101].

Исследование возможности переработки методом быстрого пиролиза с получением синтез-газа, а также определение технических и конструктивных параметров СВЧ реактора для реализации данного процесса начато в настоящее время в сотрудничестве ИПФ РАН и ННГУ. Целью работ является

создание высокоэффективных экологически чистых технологий переработки биотоплива с высоким выходом горючих газов, пригодных для дальнейшего использования в энергетических установках, а также получения смолистой фракции и углеродистого остатка.

Микроволновый пиролиз навоза, перемешанного с активированным углем, является надежным методом для валоризации отходов животноводства с целью получения биоэнергии. Параметрическое исследование показывает самый высокий выход, полученный для твердых, жидких и газообразных продуктов составляют 78,83%, 24,7% и 34,17%, соответственно. Относительно высокая концентрация синтез-газа может использоваться в качестве топлива, получаемая биожидкость содержит ценные соединения, такие как фенолы, кетоны, пиридин и фуран.

Преимущество СВЧ сушки перед традиционными способами сушки заключается в саморегулирующемся нагреве. При нагреве для целей сушки качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как, например, дерево, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери СВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность [9, 17].

Нагрев диэлектрика в электромагнитном поле СВЧ происходит за счет взаимодействия со связанными зарядами (процессы поляризации) и со свободными зарядами (токи проводимости). Диэлектрик, обладающий потерями, характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью, имеющей комплексный характер [9, 16]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg\delta) \quad (1.1)$$

Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости определяется как [9, 16]:

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_p''}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (1.2)$$

где ε_p'' – мнимая часть абсолютной диэлектрической проницаемости; σ – удельная проводимость, ω – круговая частота, ε_0 – диэлектрическая постоянная. Выражение (1.1) учитывает и релаксационные потери, и потери на проводимость [16].

Коэффициент потерь (или фактор потерь) ε'' и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ определяют степень преобразования электромагнитной энергии в тепловую энергию за счет мощности потерь электромагнитной волны в рассматриваемой среде [16, 19].

При гармоническом колебании электромагнитного поля удельная мощность тепловых потерь по условию баланса энергии, в случае если среда не обладает магнитными свойствами, определяется как [9, 16]:

$$P_{y\delta} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (1.3)$$

Формула (1.2) объединяет как потери, обусловленные инерционностью поляризации (пропорциональные ε_p''), так и джоулевы потери (пропорциональные σ): эти два типа потерь при фиксированной частоте с макроскопической точки зрения неразличимы. В связи со сказанным удельную мощность потерь можно записать в виде [9, 16]:

$$P_{y\delta} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 + \frac{\omega \varepsilon_p''}{2} |E|^2. \quad (1.4)$$

Интенсификация переработки птичьего помета и навоза электромагнитной энергией поля СВЧ возможна при разработке конструкции резонаторной камеры для СВЧ нагрева с равномерным нагревом в любой части внутреннего объема обрабатываемого материала. Объем камер должен быть достаточно большим, чтобы в течение каждого цикла равномерно

обрабатывать значительное количество материала и полностью использовать мощность СВЧ генераторов [17].

Как правило, эти установки нерегулируемые, с задачей одного режима, установки не адаптированы к входным параметрам материала, в этих установках не стоит задача метода и средств контроля.

Таблица 1.7 – Сравнительная таблица

	Ускорение технологического процесса	Равномерный регулируемый нагрев материала
СВЧ анаэробное сбраживание	+	+
СВЧ пиролиз	+	+

Основной задачей диссертации является разработка универсальной адаптивной установки для переработки навоза и помета с любой влажностью, с любым наличием разных подстилочных материалов, с различным содержанием солей и минералов, которые определяются на входе и подстройка технологического процесса для качественной переработки материалов в топливные брикеты. Все эти функции могут быть реализованы на базе датчиков, которые будут встроены в технологический процесс обработки материалов.

1.4 Микроволновые датчики контроля изменения влажности материалов в процессе сушки

Общим недостатком для многих систем адаптивного управления является необходимость использования специальных датчиков в информационной цепи контура обратной связи, позволяющих контролировать изменения технологических параметров процесса. Наиболее значимыми

характеристиками, с точки зрения управления СВЧ комплексом, можно назвать распределение напряженности электрического поля внутри рабочей камеры, распределение теплового поля по объему обрабатываемого объекта, диэлектрические свойства материала. Определение перечисленных характеристик в реальном времени, в силу специфичности СВЧ-нагрева, является трудноразрешимой задачей [16].

В настоящее время не существует универсальных методов, пригодных для решения задач измерения распределения полей и контроля электрофизических параметров сред в процессе эксплуатации СВЧ технологического комплекса. В настоящей работе в качестве преобразующих элементов предлагается использование резонансных датчиков на основе симметричных полосковых линий [9].

1.4.1 Микроволновые поточные датчики измерения влажности материалов

Ожидаемая стабильность продукта проистекает в первую очередь от качественных характеристик сырья, одной из которых является содержание влаги.

Измерение содержания влаги готового продукта не является достаточным, поэтому знание об влажности материалов на различных этапах производственного процесса имеет большое значение [24].

Измерители влажности постоянно развиваются. В последние годы "Измерение влажности в потоке" (измерение влажности во время непрерывного производственного процесса) достигло значительного прогресса с точки зрения воспроизводимости и простоев. Производители фокусируются на двух основных функциях для своих измерительных приборов: высокая точность и ориентация в потоке [24].

Поточный контроль содержания влаги в материале, сбор информации с помощью приборов измерения влажности, необходим для обратной связи с

адаптивной системой управления процессом. Контроль может производиться в контейнерах, силосах и цистернах, на конвейерных лентах или в трубах [24]. Контроль процесса сушки с помощью поточного анализатора влажности предлагает значительную экономию средств [24].

1.4.2 Микроволновый контактный поточный влагомер для зерносушилок

Данный влагомер предназначен для непрерывного измерения влажности зерна на входе и выходе шахтных, барабанных, камерных, рециркуляционных и колонковых сушилок непосредственно в процессе сушки. Калибровочные данные по умолчанию этого анализатора влажности позволяют осуществлять непрерывное и автоматизированное измерение абсолютной влаги зерновых культур [24]. Имеет встроенный датчик температуры и выход влажности и температуры на компьютер.

Принцип работы влагомера основан на измерении величины поглощения СВЧ энергии влажным материалом и преобразовании этой величины в цифровой код [26]. На рис. 1.1 изображен поточный датчик влажности различных зерновых культур

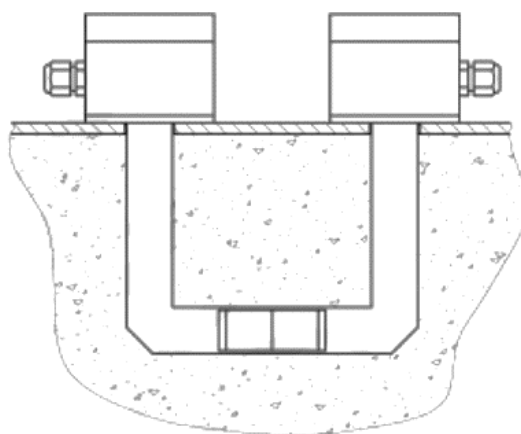


Рис. 1.1 – Поточный датчик влажности различных зерновых культур

Влагомер обеспечивает автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала.

Такие датчики применяются для целей автоматизации шахтных сушилок: один датчик – в приемном бункере сырого зерна, на входе в зерносушилку, второй – на выходе высушенного зерна, в зоне охлаждения.

1.4.3 Микроволновый контактный поточный влагомер для пеллет и древесной стружки



Рис. 1.2 – Микроволновый датчик измерения влажности пеллет, древесной стружки [24]

Измерение влажности древесины в потоке во время промышленного процесса производства деревянных композитных панелей (например, ДСП, МДФ, ОСП), пеллет и древесной стружки имеет решающее значение для гарантии эффективности процесса. Потребление энергии поддерживается на низком уровне, а потери сырья сведены к минимуму [24].

Измеряемые материалы: пеллеты, сыпучие материалы, гранулы, панели, деревянные панели, МДФ, древесная мука, древесные опилки, волоконный материал, древесное волокно, целлюлоза, текстиль, шерсть, пряжа, порошкообразный материал, древесная стружка, оксиды, гидроксиды, каменная пыль, асбест, стекловолокно, обрезки ткани, сажа, угольная крошка, красители, карбонат кальция, плитка, керамика, порошок, опилки [24].

Принцип действия влагомера основан на разнице между сверхвысокой частотой, диэлектрическими характеристиками материала. Прибор оснащен кольцевым резонатором в центре. Параметры резонатора изменяются, если электромагнитные волны вступают в контакт с различной степенью влажности материала [24]. Резонатор измеряет два параметра - резонансную частоту и резонансную амплитуду - одновременно и его сочетание с алгоритмом управления технологическим процессом. Независимо от плотности материала, достигается высокая степень надежности измерений и воспроизводимости. Измеряемому материалу или датчику не наносится никаких повреждений. Так как передача очень низкая, не происходит нагрева или деформации испытуемого материала [24].

Повышенная точность поточного измерения влажности гарантирует более однородный конечный продукт (например, МДФ, ОСП). Кроме того, процесс сушки этих материалов является очень дорогостоящим, эффективный контроль этой части процесса обеспечивает большую экономическую выгоду. Слишком агрессивные температуры сушки - это не только пустая трата энергии, но они также приводят к нежелательному ухудшению качества волокна, особенно деревянных изделий [24].

1.4.4 Микроволновый бесконтактный поточный влагомер

Микроволновые бесконтактные поточные влагомеры используются для измерения влажности зерна, силикатной массы, формовочных смесей, глиняных порошков, песка, каолина, рудных концентратов, угля, оксида алюминия и многих других материалов на ленточных конвейерах в условиях высоких температур и запыленности, при высокой абразивности, агрессивности материала и склонности его к налипанию. Принцип действия основан на измерении параметров электромагнитной СВЧ энергии, прошедшей через слой контролируемого материала. Датчик имеет излучающую и приемную антенны, блок генераторов СВЧ энергии [26].

СВЧ колебания, проходя через слой контролируемого материала, изменяют свои параметры и через приемную антенну блока детектора поступают на СВЧ детектор. Величина ослабления СВЧ колебаний, измеряемая в децибелах (дБ), пропорциональна влажности контролируемого материала. В детекторе СВЧ колебания преобразуются в низкочастотный сигнал, который поступает на вход блока управления и контроля. Кроме этого, на вход блока обработки с датчика температуры поступает информация о температуре контролируемого материала для учета влияния температуры на результат измерения влажности. По каналу RS485 полученные данные передаются на блок управления и контроля [26].

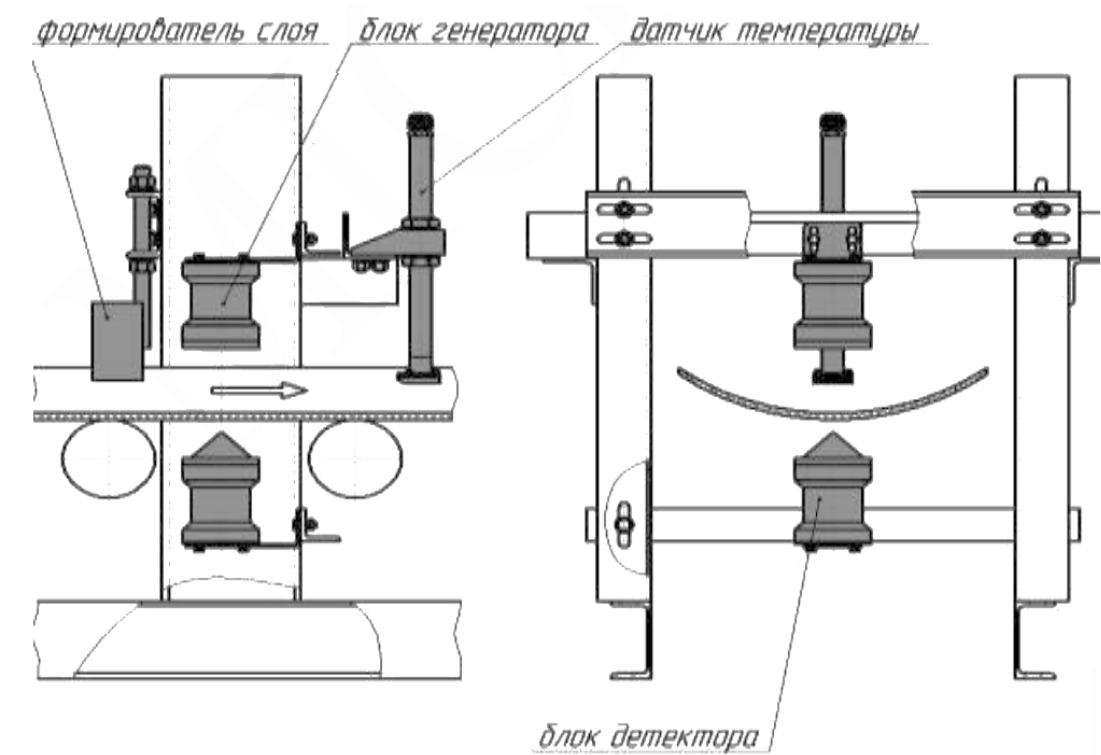


Рис. 1.3 – Схема установки бесконтактного микроволнового измерителя влажности на конвейерную ленту [24]

Микроволновый датчик является идеальным решением для непрерывного измерения влажности в производстве, ценным инструментом на многих этапах производственного процесса и может быть использован для

измерения влажности широкого спектра материалов: при переработке различных материалов, в обработке смолы, во время прессования, обезвоживания и сушки [24].

Скорость измерения, точность и надежность контроля за производственным процессом с помощью микроволнового влагомера приводит к сокращению времени простоя во время прессования или сушки и уменьшению потерь материала [24].

В сравнении с обычными датчиками влажности использование микроволновой системы измерения влажности обеспечивает гораздо более высокий уровень однородности и качества продукции при одновременном снижении затрат на эксплуатацию и техобслуживание. При подключении поточного измерителя влажности к контроллеру или системе управления технологическим процессом, оператор имеет возможность реагировать на результаты измерений в режиме реального времени [24].

1.5 Математическое моделирование процесса воздействия ЭМП СВЧ

Проектирование и оптимизация микроволновых технологических комплексов (МВТК) невозможна без этапа математического моделирования процессов, происходящих в рабочих камерах. Трудности моделирования совместных электромагнитных и тепловых процессов обусловлены зависимостью диэлектрических свойств среды от температуры и изменением напряженности электромагнитного поля. Математическое моделирование СВЧ нагрева позволяет выбрать оптимальные режимы работы, которые обеспечивают при меньших энергетических и временных затратах получение требуемого качества обрабатываемого материала. Математическое моделирование заключается в решении взаимосвязанной системы уравнений электродинамики и нестационарной теплопроводности, которая решается

достаточно трудно не только аналитически, но и численными методами [27, 28].

Однако, при некоторых упрощающих предположениях возможно получение аналитических решений, преимущества которых по сравнению с численными решениями очевидны [27, 28].

Методы математического моделирования совместных электромагнитных и тепловых процессов можно разделить на аналитические и численные [27, 28].

В [29] в адиабатическом приближении решена одномерная задача СВЧ нагрева при падении на полубесконечный слой диэлектрика плоской электромагнитной волны. Полученное в [29] решение используется в [30] для решения задачи СВЧ нагрева слоистых влагосодержащих материалов [27, 28].

В [31] при отказе от адиабатического приближения получено аналитическое решение одномерной задачи СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрического слоя, которое при малом времени нагрева практически совпадает с решением из [29], однако при увеличении времени нагрева их различия становятся значительными [27, 28].

В [32] при линейной зависимости коэффициента затухания от температуры решена задача СВЧ нагрева полубесконечного диэлектрического слоя с малыми потерями, что позволяет использовать для решения уравнения электродинамики метод ВКБ [27, 28].

В [33] получено аналитическое решение задачи СВЧ нагрева при произвольной зависимости коэффициента затухания от температуры [27, 28].

В [34] получено аналитическое решение задачи СВЧ нагрева плоскостройной структуры при возбуждении электромагнитного поля произвольно ориентированным диполем [27, 28].

В [34] и [35] рассматривались задачи распространения электромагнитных волн в многослойных средах и СВЧ нагрева при кусочно-постоянных по времени параметрах среды [27, 28].

В [36] получено аналитическое решение задачи СВЧ нагрева плоскостойкой структуры при возбуждении электромагнитного поля произвольно ориентированным диполем [27, 28].

При моделировании совместных электромагнитных и тепловых полей в камерах открытого типа и особенно в камерах закрытого типа применяются лишь численные методы решения взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и нестационарной теплопроводности. При этом для решения используются либо метод конечных элементов, либо метод конечных разностей. Так, например, методом конечных элементов моделировались процессы СВЧ нагрева в одномерных [37, 38], двумерных [38, 39, 40] и трехмерных структурах [41,42], а методы конечных разностей использовались при моделировании процессов СВЧ нагрева в двумерных и трехмерных задачах [27, 28, 36, 43 - 47].

Одним из требований, предъявляемых к температурному полю в рабочей камере, является его равномерность по всему объему или его части [22, 27, 28].

В работах [48, 49] равномерность нагрева диэлектрика обеспечивается созданием в его объеме равномерного распределения СВЧ энергии. Это достигается либо методами сфокусированной апертуры, либо использованием многоэлементных систем излучателей СВЧ энергии [22, 27, 28].

В работе [38] моделирование равномерного нагрева диэлектрика, за счет применения многоэлементных излучающих систем или использованием перемещающегося излучателя СВЧ энергии, осуществляется методом конечных элементов [22, 27, 28].

В [50] сформулированы принципы построения многомагнетронных микроволновых установок. В качестве основного критерия использовалась равномерность электромагнитного поля [22, 27, 28].

В [51] при моделировании СВЧ нагрева диэлектрика движущимся излучателем использовалось аналитическое решение, полученное для

неподвижного излучателя. Проведено сравнение результатов моделирования с методом конечных разностей [22, 27, 28].

В данной диссертационной работе объект нагрева рассматривался как многослойная структура, т.к. измерение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь птичьего помета и конского навоза показало высокий уровень поглощения электромагнитного поля СВЧ диапазона, таким образом прогрев материала по толщине является сложной задачей, т.к. нагрев будет происходить неравномерно по всему объему объекта. Решена одномерная задача СВЧ-нагрева.

1.6 Выводы по главе

Постановка задач исследования

На основе анализа научно-технических публикаций, затрагивающих вопросы осуществления обработки органических отходов с применением различных технологий, выявлено что отличительной чертой использования возможностей электромагнитных полей СВЧ диапазона для обработки птичьего помета и конского навоза, является наиболее перспективным методом для применения в данной области, за счет экологичности процесса обработки, скорости нагрева больших объемов, и не требует больших финансовых затрат. По результатам первой главы были сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследований:

Объект исследования: системы СВЧ-обработки органических отходов животноводства.

Предмет исследования: методы и средства контроля температуры и влажности в процессах СВЧ-обработки органических отходов животноводства.

Цель работы: разработка системы контроля температуры и влажности в процессах СВЧ-обработки органических отходов животноводства, на примере конского навоза и птичьего помета, с возможностью организации адаптивного управления указанными процессами на основе информации, полученной с СВЧ-датчиков резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений, организованными в единую многосенсорную сеть.

Научная задача диссертации состоит в исследовании диэлектрических характеристик птичьего помета и конского навоза, их зависимостей от температуры и влажности, исследовании влияния на них электромагнитных полей (ЭМП) СВЧ-диапазона в технологических процессах СВЧ-обработки, в частности, нагрева и сушки, с целью разработки алгоритмов адаптивного управления их протеканием, а также создания СВЧ-датчиков резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений, организованными в единую многосенсорную сеть, для получения информации о текущих значениях температуры и влажности в ходе СВЧ-обработки, являющихся входными параметрами для контура адаптивного управления.

Решаемые задачи:

1. Анализ характеристик существующих и перспективных технологий обработки и переработки птичьего помета и конского навоза; выявление резервов для улучшения качества выходной продукции, основанных на использовании энергии ЭМП СВЧ-диапазона, адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия с получением для него информации с СВЧ-датчиков температуры и влажности; определение на этой основе направлений и задач научных исследований.

2. Построение одномерной многослойной математической модели СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза, определяющей воздействие на них энергии ЭМП СВЧ-диапазона, с учетом температурной и частотной

зависимости их диэлектрических свойств, изменяющихся в процессе СВЧ-обработки, как основы адаптивного управления его параметрами.

3. Разработка резонансных планарно-кольцевых СВЧ-датчиков с повышенной добротностью и экранированием фидерных линий, объединенного с измерителем температуры для одновременного получения текущей информации о температуре и влажности птичьего помета и конского навоза в ходе процесса СВЧ-обработки для адаптивного управления его параметрами.

4. Разработка практических рекомендаций для проектирования и создания адаптивных СВЧ-комплексов и многосенсорных систем контроля температуры и влажности, встроенных в их электродинамические реакторы, реализующих технологический процесс СВЧ-обработки органических отходов животноводства.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ-ОБРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА ЭНЕРГИЕЙ ЭМП НА ЧАСТОТАХ 915 И 2450 МГц

К настоящему времени разработано большое число технологических установок СВЧ нагрева, применяемых в научных исследованиях, в промышленности и в быту. Они отличаются конструкцией СВЧ камер и устройствами возбуждения электромагнитного поля, так как обрабатываемые диэлектрики имеют разные геометрические размеры, формы и электрофизические параметры.

Затраты на проектирование, совершенствование и оптимизацию устройств СВЧ нагрева существенно уменьшаются за счет построения и исследования математических моделей процессов, происходящих в рабочих камерах. Математическое моделирование заключается в построении и решении системы дифференциальных уравнений в частных производных электродинамики и нестационарной теплопроводности, которая трудно поддается решению даже численными методами. Важно отметить, что совместное моделирование электромагнитных и тепловых процессов усложняются непостоянством диэлектрических параметров сред, зависимостью диэлектрических параметров от температуры, частоты и изменением напряженности электромагнитного поля в пространстве и во времени [52-53].

2.1 Измерение диэлектрических свойств органических отходов животноводства

Для построения математической модели необходимо знать диэлектрические свойства обрабатываемых материалов. Анализ научных литературных источников показал отсутствие информации о диэлектрических свойствах птичьего помета и навоза. С целью получения диэлектрических свойств было проведено измерение комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь птичьего помета и конского навоза на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц при различной влажности исследуемого материала. В качестве метода измерения был выбран метод коаксиального пробника [69].

2.1.1 Лабораторный макет СВЧ сушики птичьего помета и методика проведения экспериментальных исследований

На рис.2.1. изображена структурная схема лабораторной установки для СВЧ-обработки с системой удаления испаряющейся влаги из рабочей камеры [102].

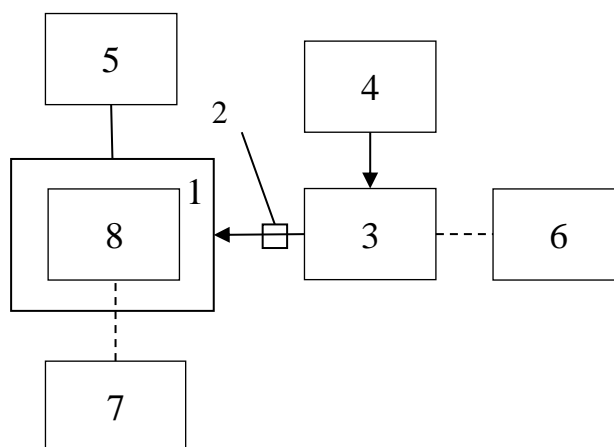


Рис. 2.1 – Структурная схема лабораторной установки СВЧ-обработки

1 – рабочая камера СВЧ суши; 2 – волновод; 3 – СВЧ генератор; 4 – блок управления СВЧ генератором; 5 – система удаления испаряющейся влаги; 6 – прибор учета активной электроэнергии; 7 – измеритель температуры; 8 – исследуемая среда [102].

На рис. 2.2. представлен лабораторный макет устройства [102]:



Рис.2.2 – Лабораторный макет СВЧ-обработки

1 – СВЧ-печь, магнетрон с выходной мощностью 700 Вт и частотой 2,45 ГГц и, фидерный волновод с сечением 90×45 мм, СВЧ-камера 2, внутри которой находится объект обработки в радиопрозрачном боксе, прямоугольной формы, габаритными размерами 80×50×50 мм; 4 – датчик температуры обрабатываемой среды, 5 – блок управления СВЧ генератором [102].

Экспериментальные исследования СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза проводились по 7 серий. Методика проведения экспериментальных исследований [54]:

1. Емкость с объектом обработки помещалась в камеру СВЧ-обработки;
2. Задавались необходимые параметры мощности и времени СВЧ-обработки;
3. Испаряющаяся влага удалялась с помощью системы вентиляции;

4. С помощью термопар цифровых измерителей температуры определялась динамика изменения температуры в исследуемой среде;
5. По мере испарения влаги фиксировалась величина масса исследуемого материала.

2.1.2 Лабораторные измерения методом коаксиального зондика

Открытый коаксиальный зонд представляет собой отрезанный участок линии передачи. Структурная схема измерения представлена на рис.2.3. Измерительная система, использующая метод коаксиального зонда, состоит из анализатора цепей, программного обеспечения для расчета диэлектрической проницаемости и коаксиального зонда, кронштейн для зонда и кабель [55, 56].

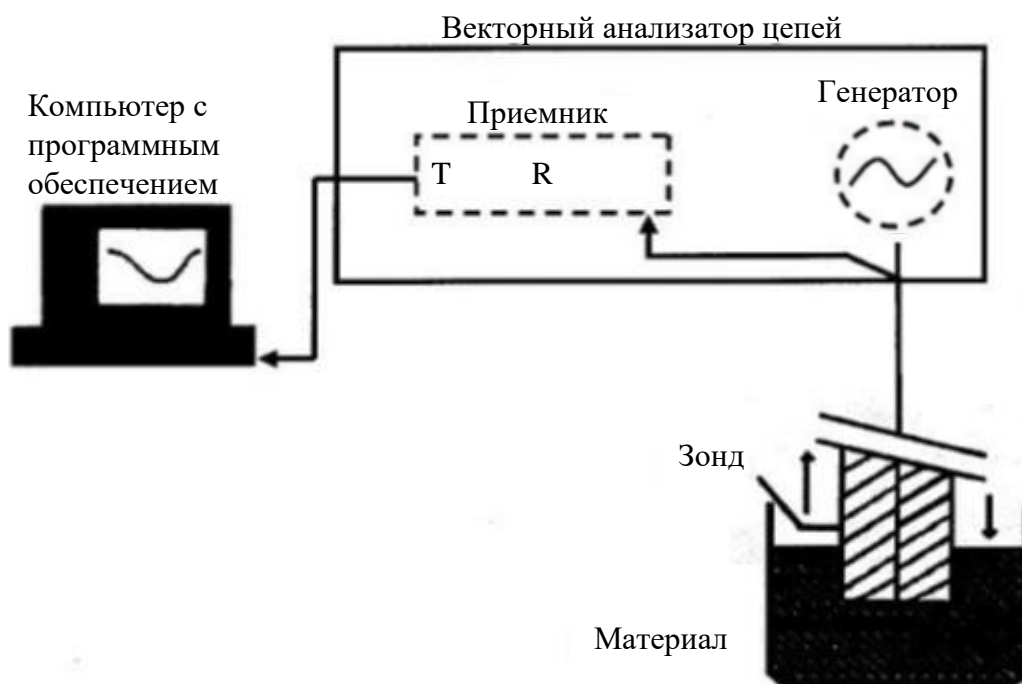


Рис. 2.3 – Структурная схема измерения методом коаксиального зондика

Измерение отражения от материала и/или прохождения через него в совокупности с знанием его физических размеров дает информацию для определения диэлектрической и магнитной проницаемости материала. Векторные анализаторы цепей позволяют проводить высокочастотные

измерения методом стимул-отклик в режиме качания частоты от 300 кГц до 325 ГГц [57].

Векторный анализатор цепей состоит из источника сигнала, приемника и дисплея (рисунок 2.4) [57].



Рис. 2.4 – Структурная схема векторного анализатора цепей

Источник запускает сигнал на одной частоте в испытуемый материал. Приемник настроен на эту частоту, чтобы обнаружить отраженный от материала и прошедший через него сигналы [57].

Измеренный отклик дает информацию об амплитуде и фазе на этой частоте. Далее источник переключается на следующую частоту и измерения повторяются, что позволяет отобразить измеренные отраженный и прошедшие отклики как функции частоты [57].

Для устранения постоянных (устойчивых и систематических) ошибок измерений, вызванных несовершенствами системы, используется калибровка. Калибровка существенно уменьшает составляющие погрешности измерения, связанные с направленностью, собственным нулем и согласованием в источнике, которые могут присутствовать при измерении отражения. Для уменьшения этих трех составляющих погрешности измеряются три известных меры. Три известных меры – воздух, короткозамыкающее устройство и дистиллированная деионизированная вода. Даже после калибровки пробника существуют дополнительные источники погрешностей, которые могут влиять на точность измерений [57, 58].

Три основных источника погрешностей [57, 58]:

- Стабильность кабеля
- Воздушные зазоры
- Толщина образца

Автоматизированная функция Electronic Calibration Refresh (обновление электронной калибровки) перекалибровывает систему автоматически перед осуществлением каждого измерения. Это фактически исключает ошибки, связанные с нестабильностью кабеля и уходом параметров системы [59].

Разомкнутый коаксиальный пробник является срезом линии передачи. Свойства материала измеряются погружением пробника в жидкость или касанием пробником плоской поверхности твердого (или порошкового) материала. Структура полей на конце пробника искажается, как только они входят в контакт с испытуемым материалом (рисунок 2.5). Отраженный сигнал S_{11} может быть измерен и связан с вещественной частью комплексной диэлектрической проницаемости и тангенсом угла диэлектрических потерь материала [15, 60, 69].

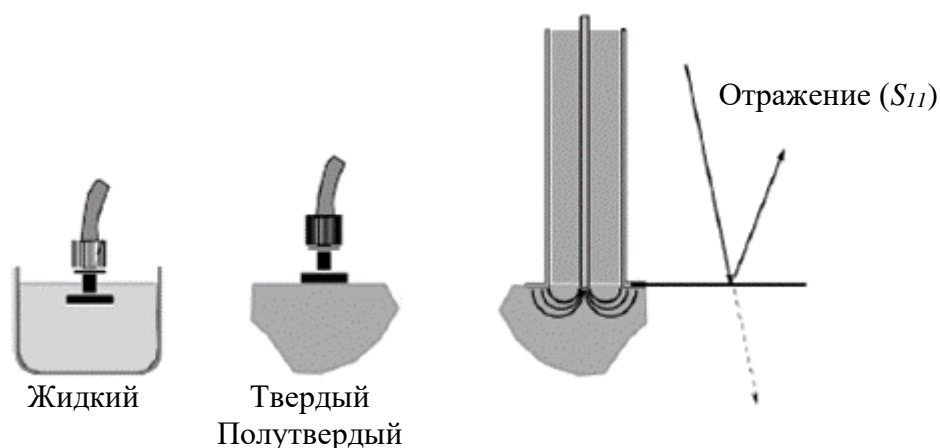


Рис. 2.5 – Метод с использованием коаксиального пробника [60]

Пробник выдерживает применение в широком диапазоне температур от -40 до $+200^{\circ}\text{C}$, что позволяет проводить измерения в зависимости от частоты и температуры. Большой фланец позволяет измерять свойства твердых

материалов с плоской поверхностью, в дополнение к жидкостям и полутвердым материалам [54-56, 60].

Таблица 2.1 – Особенности метода коаксиального пробника

Особенности метода	Широкополосный
	Неразрушающий
	Ограниченные точность измерения ϵ_r и разрешение измерения $\text{tg}\delta$ при низких потерях
	Наилучший для жидкостей или полутвердых материалов
Допущения о свойствах материала	Полубесконечная толщина
	Немагнитный
	Изотропный и однородный
	Плоская поверхность
	Отсутствие воздушных зазоров

Существующий в РФ государственный стандарт на измерения диэлектрической проницаемости ГОСТ Р 8.623—2015, разработанный в ВНИИ ФТРИ, в основном касается только измерений твердых диэлектриков. Описанные в нем методы, относящиеся преимущественно к резонансным. В ГОСТе даются значения расширенной неопределенности результата измерений ϵ и $\text{tg}\delta$ (от 0.00005 до 0.01), оцененные в соответствии с ГОСТ Р 54500.3 при уровне доверия 0.95 и коэффициенте охвата 2, которые не превышают [61]:

- 1 % — для ϵ от 1.2 до 10;
- 1.5 % — для ϵ от 10 до 60;
- 2 % — для ϵ от 60 до 100;
- 3 % — для ϵ более 100;
- $(10 + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\text{tg}\delta})$ % - для $\text{tg}\delta$.

Метод коаксиального пробника является преимущественно лабораторным методом измерения комплексной диэлектрической проницаемости. Сложность применения коаксиального зонда в технических

измерениях обуславливается сложной схемой получения измерительной информации и высокими требованиями к механическому контакту открытого конца волновода с поверхностью исследуемого объекта. Промышленные сенсоры на основе коаксиальных зондов имеют только ограниченный круг приложений.

2.1.3 Лабораторные экспериментальные измерения диэлектрических свойств птичьего помета и конского навоза

Птичий помет и конский навоз сушили в СВЧ реакторе и с периодичностью в 2 минуты проводили измерение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь с помощью анализатора цепей Agilent E5071C [53] и температуры (Рис. 2.6) [15, 62, 69].



Рис. 2.6 – Измерение комплексной диэлектрической проницаемости птичьего помета методом коаксиального пробника

Результаты измерения диэлектрических параметров птичьего помета показаны в таблице 2.2.

Расчетная влажность W вычислялась по ГОСТ5180-2015:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где m_1 - масса исходного материала, m_2 - масса высушенного материала.

Таблица 2.2 – Результаты измерения диэлектрических свойств птичьего помета на частоте 2,45 ГГц при температуре 20 °С [15, 69]

Время обработки, мин	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta$	Масса, гр	Расчетная влажность, %
Исходный материал	43,25	0,5581	184,6	71
2	39,78	0,44602	163,9	67
4	34,76	0,3591	139,8	61
6	27,87	0,29163	109,3	51
8	15,25	0,2523	80	32
10	2,81	0,2135	60	10
10,30	1,9	0,1	53,9	0

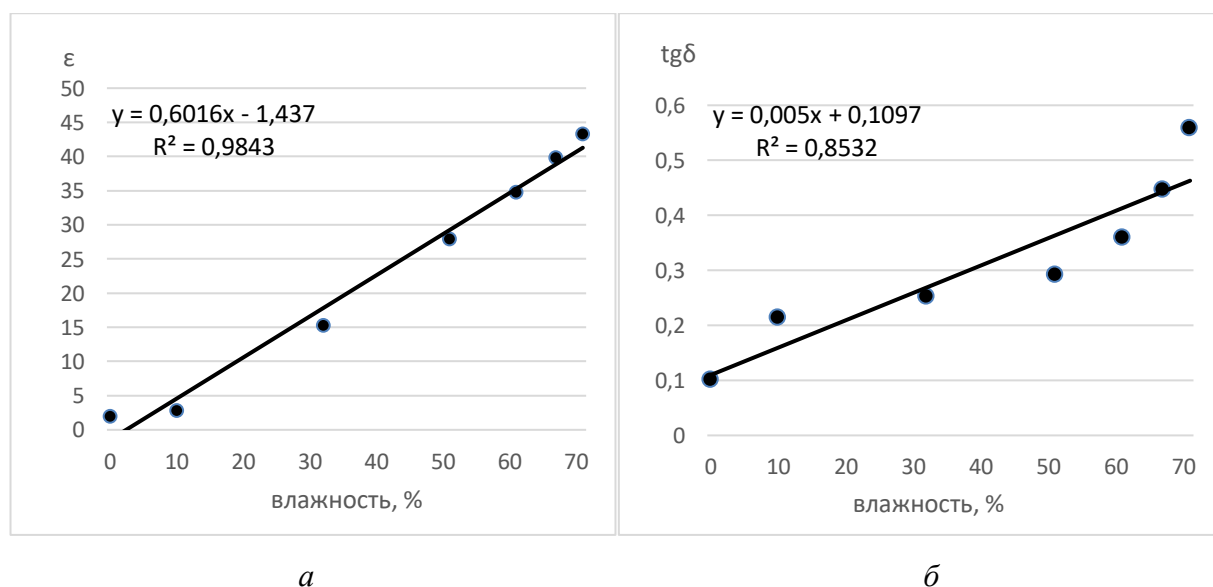


Рис.2.7 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (б) от влажности птичьего помета на частоте 2,45 ГГц [15]

Таблица 2.3 – Результаты измерения диэлектрических свойств конского навоза на частоте 2,45 ГГц при температуре 20 °С [15, 69]

Время обработки, мин	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta$	Масса, гр	Расчетная влажность, %
Исходный материал	35,52	0,5639	166,4	70
2	30,28	0,4714	144,8	65
4	27,5	0,4102	118,1	57
6	19,48	0,3163	86,9	42
8	10,9	0,1647	63,3	20
10	4,3	0,0829	56,1	10
10,30	2	0,021	50,3	0

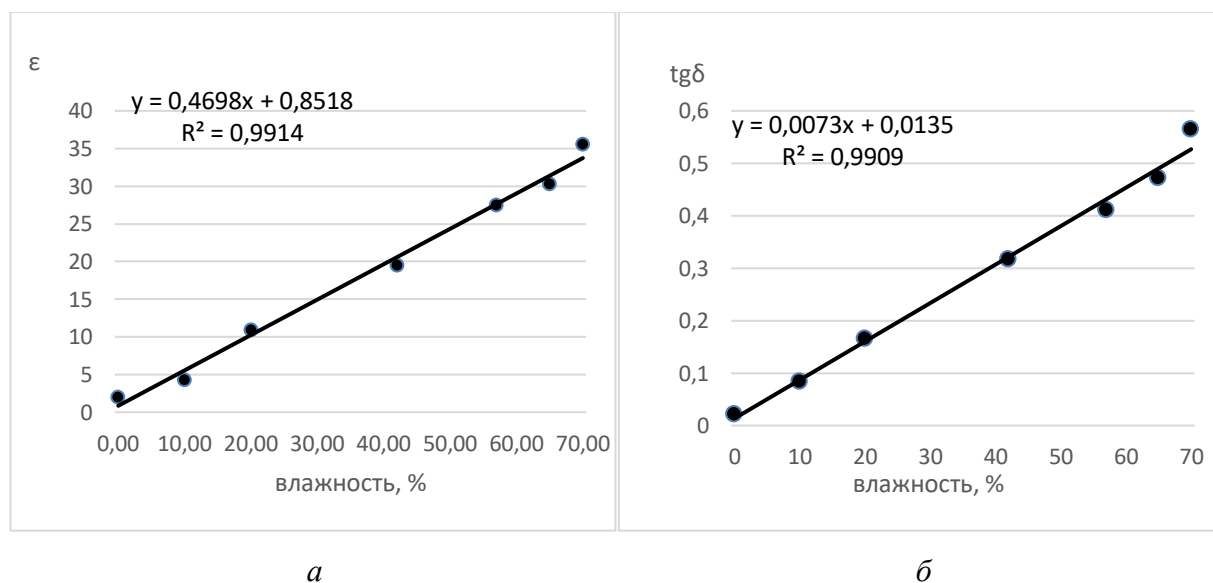
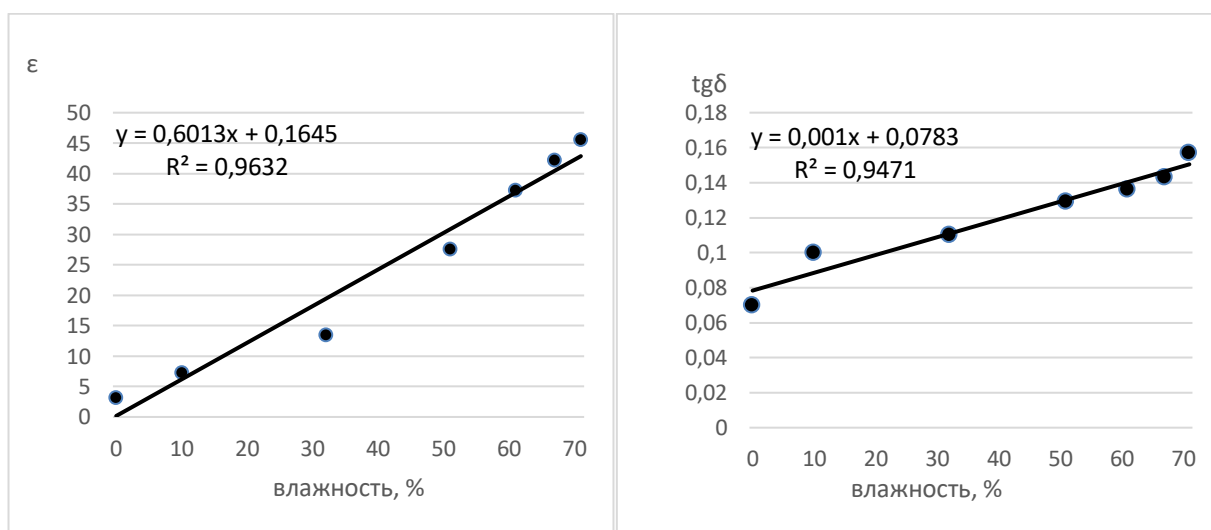


Рис. 2.8 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (б) от влажности конского навоза на частоте 2,45 ГГц [15]

Таблица 2.4 – Результаты измерения диэлектрических свойств птичьего помета на частоте 915 МГц при температуре 20 °С [15, 69]

Время обработки, мин	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta$	Масса, гр	Расчетная влажность, %
Исходный материал	45,61	0,157	184,6	71
2	42,25	0,143	163,9	67
4	37,23	0,136	139,8	61
6	27,65	0,129	109,3	51
8	13,5	0,11	80	32
10	7,34	0,1	60	10
10,30	3,15	0,07	53,9	0



а

б

Рис. 2.9 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (б) от влажности птичьего помета на частоте 915 МГц [15]

Таблица 2.5 – Результаты измерения диэлектрических свойств конского навоза на частоте 915 МГц при температуре 20 °С [15, 69]

Время обработки, мин	Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta$	Масса, гр	Расчетная влажность, %
Исходный материал	31,87	0,161	166,4	70
2	26,65	0,148	144,8	65
4	17,93	0,139	118,1	57
6	12,37	0,128	86,9	42
8	9,29	0,112	63,3	20
10	6,43	0,1	56,1	10
10,30	2,57	0,08	50,3	0

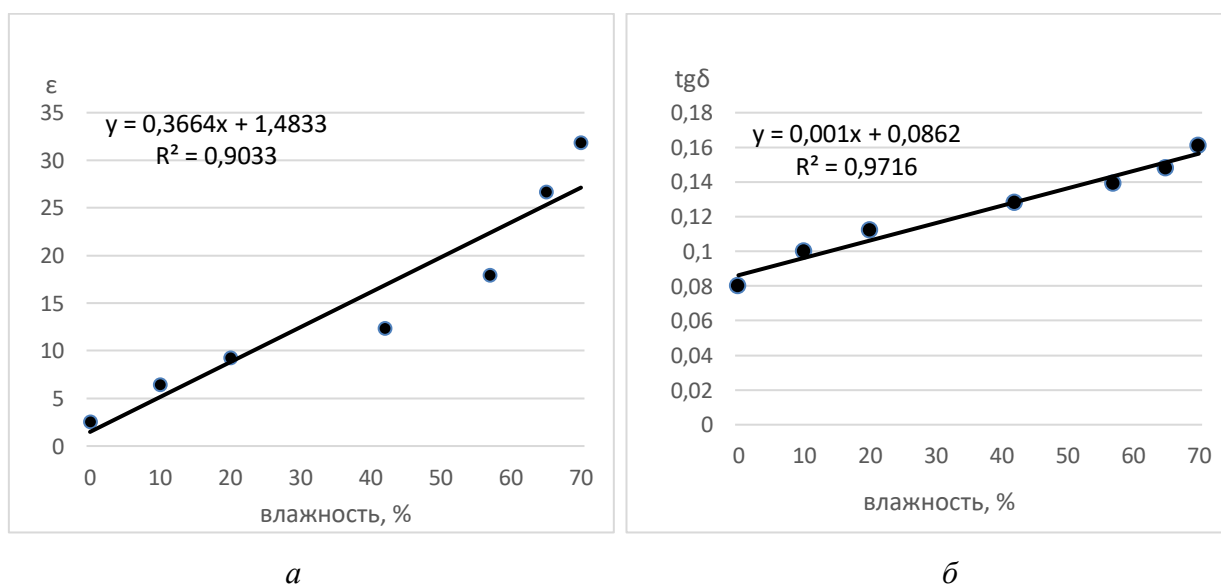


Рис. 2.10 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (б) от влажности конского навоза на частоте 915 МГц [15]

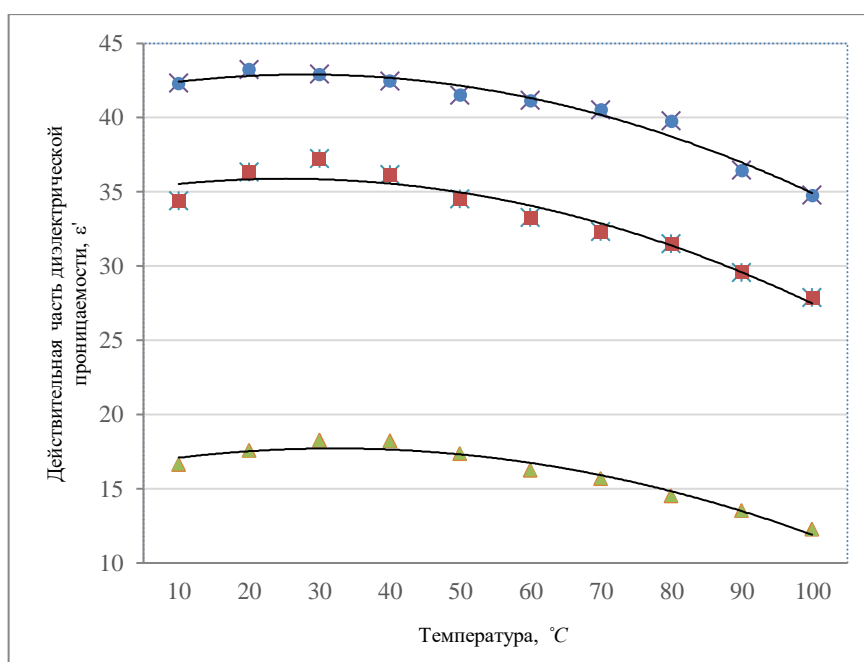
Начальная влажность птичьего помета и конского навоза может составлять 30-75% в зависимости от способа удаления отходов из помещения для хранения. Для изготовления топливных брикетов и пеллет из птичьего

помета и конского навоза готовый продукт должен содержать влажность 10-15%, поэтому появляется задача контроля влажности в процессе СВЧ сушки [69].

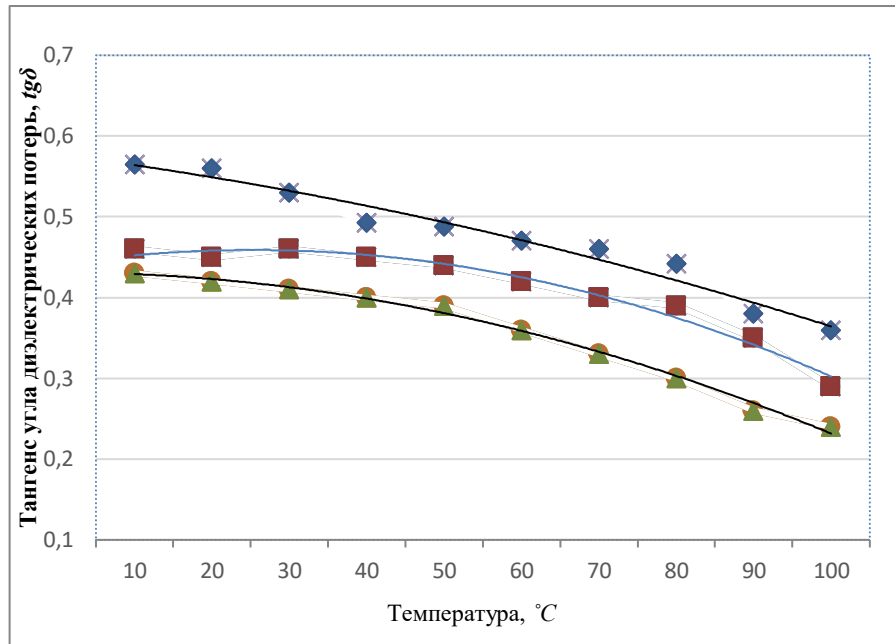
2.2 Учет температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств птичьего помета и конского навоза при математическом моделировании процесса СВЧ-обработки

При построении математической модели процесса СВЧ-обработки необходимо учитывать зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от температуры и частоты воздействующего электромагнитного поля. Причем характер этой зависимости может быть определен только экспериментально [62].

На рис. 2.11 показаны графики зависимостей действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ птичьего помета от температуры на частоте электромагнитных колебаний 2450 МГц, полученные на основе экспериментальных данных.



a)



б)

Рис. 2.11 – Температурные зависимости действительной части (а), комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь (б) при влажности птичьего помета 20% (▲), 50% (■) и 70% (●) на частоте 2450 МГц

На представленных графиках сплошными линиями показаны аналитические зависимости, полученные аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Все аппроксимированные зависимости, в силу их нелинейности, определялись полиномами 2-ой степени.

Также измерены зависимости значений диэлектрических свойств (ϵ' и $\text{tg}\delta$) от температуры птичьего помета и конского навоза на частотах 915 и 2450 МГц [62].

2.3 Математическое моделирование процесса СВЧ-обработки многослойных сред

Измерение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь птичьего помета и

конского навоза показало высокий уровень поглощения электромагнитного поля СВЧ диапазона, таким образом прогрев материала по толщине является сложной задачей, т.к. нагрев будет происходить неравномерно по всему объему объекта. Поэтому необходимо рассматривать объект нагрева как многослойную структуру [15, 69].

Рассмотрим задачу СВЧ нагрева многослойного диэлектрика при нормальном падении на его границу из воздуха плоской электромагнитной волны, напряженность которой равна E_0 (рис. 2.12). Допустим, что толщина первого слоя объекта равна h_1 , толщина второго слоя h_2 и т.д., толщина последнего слоя h_6 и короткозамыкающая стенка СВЧ камеры [15, 52, 63, 69].

Электрофизические параметры каждого слоя одинаковы и их будем обозначать с помощью введенных индексов: значения плотности ρ , теплоемкости C , теплопроводности λ , действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ [52, 63].

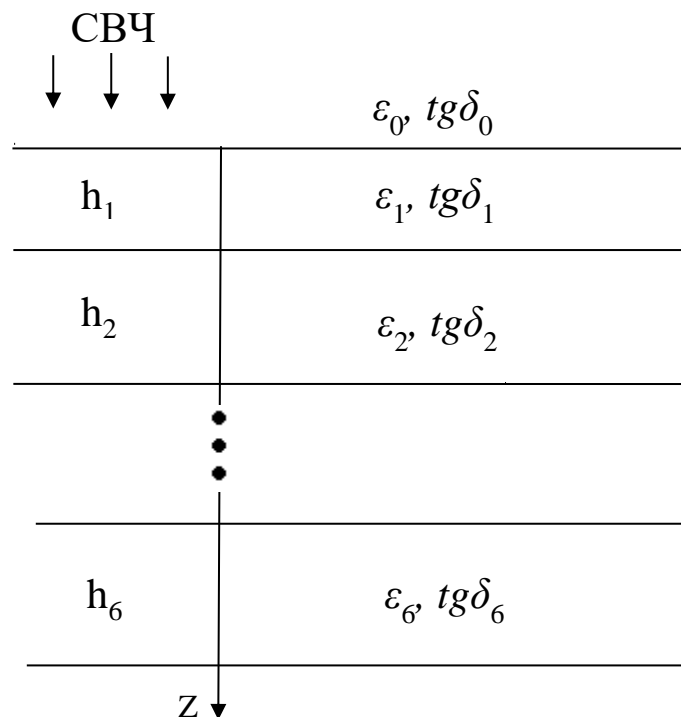


Рис. 2.12 – Геометрия задачи СВЧ нагрева многослойной структуры

Рассмотрим нормальное падение плоской волны из воздуха на плоскостойкую структуру, состоящую из двух слоев исследуемого объекта. После завершения переходных процессов в каждом слое имеется две плоские волны – падающая и отраженная, распространяющиеся вдоль оси z в положительном и отрицательном направлении соответственно. Предположим, что падающая волна E_n поляризована линейно в плоскости падения, следовательно, и отраженная волна E_o будет линейно поляризованной [52, 63].

Обозначим через E_n^0 – комплексную амплитуду напряженности электрического поля, падающего на плоскостойкую структуру из воздуха. Тогда, комплексная амплитуда напряженности магнитного поля будет равна $H_n^0 = E_n^0 / w_0$, где $w_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ – волновое сопротивление воздуха [52, 63].

Комплексные амплитуды полей в i – ом слое представим в виде [52, 63]:

$$\begin{aligned} E_i(z) &= t_i \cdot \exp(-ik_i z) + r_i \cdot \exp(ik_{i1} z), \\ H_i(z) &= (t_i \cdot \exp(-ik_i z) - r_i \cdot \exp(ik_{i1} z)) / w_i, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $t_0 = 1$, а $r_6 = 0$, $i = 0, 1, \dots, 6$.

При единичной амплитуде падающей из воздуха волны на плоскостойкую структуру коэффициенты t_i и r_i называются соответственно коэффициентами прохождения и отражения [52, 63].

При переходе через границы раздела слоев электрическое и магнитное поля должны быть непрерывными. Используя граничные условия на границе раздела сред, получим систему уравнений для определения коэффициентов прохождения и отражения [52, 63]:

ней определяется в основном толщиной и коэффициентом поглощения слоя материала [52, 63].

Тепловые источники в диэлектрике распределены в соответствии с функцией тепловых потерь [52]:

$$q(z,t) = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \varepsilon'' \cdot \varepsilon_0 \cdot |\dot{E}|^2 \quad (2.4)$$

Данная функция не является непрерывной, т.к. глубина проникновения меняется в зависимости от диэлектрической проницаемости ε'' , а измерение ε'' происходит в определенный момент времени, т.е. ε'' считается постоянной только во временном промежутке Δt до очередного измерения.

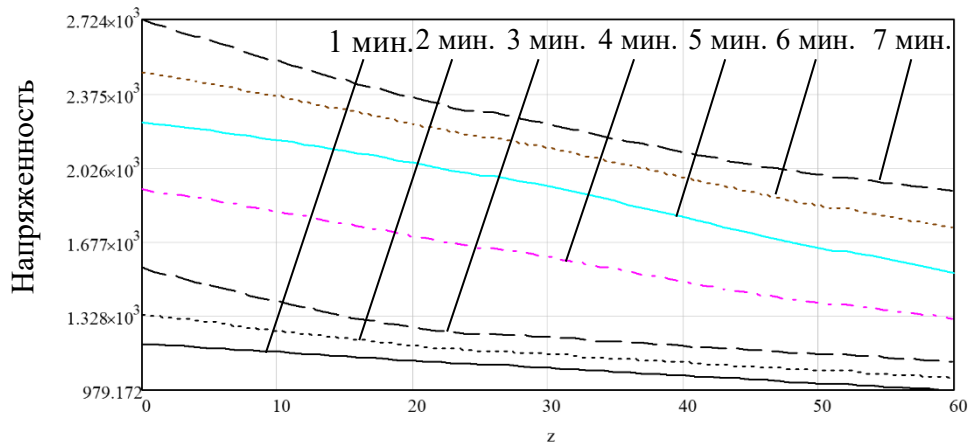


Рис. 2.13 – Модуль напряженности электрического поля в многослойной структуре при толщине каждого слоя $h = 0,01$ м. Материал: конский навоз, частота: 915 МГц

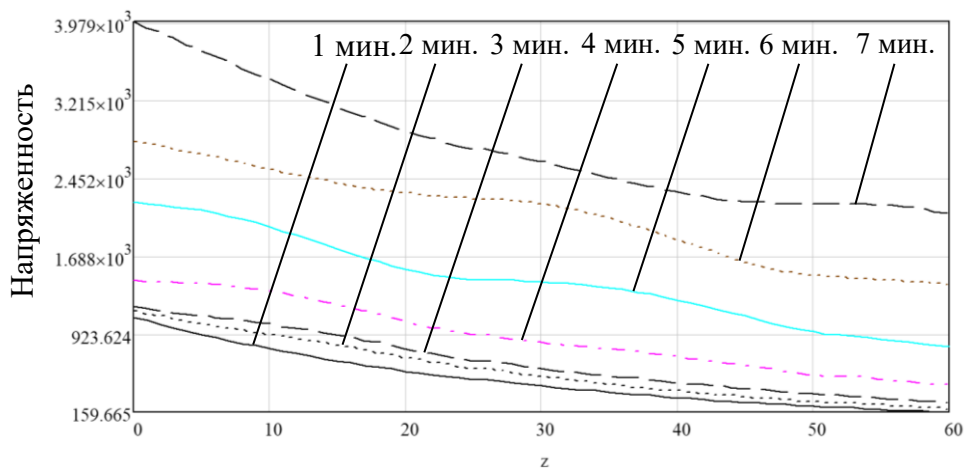


Рис. 2.14 – Модуль напряженности электрического поля в многослойной структуре при толщине каждого слоя $h = 0,01$ м. Материал: конский навоз, частота: 2450 МГц

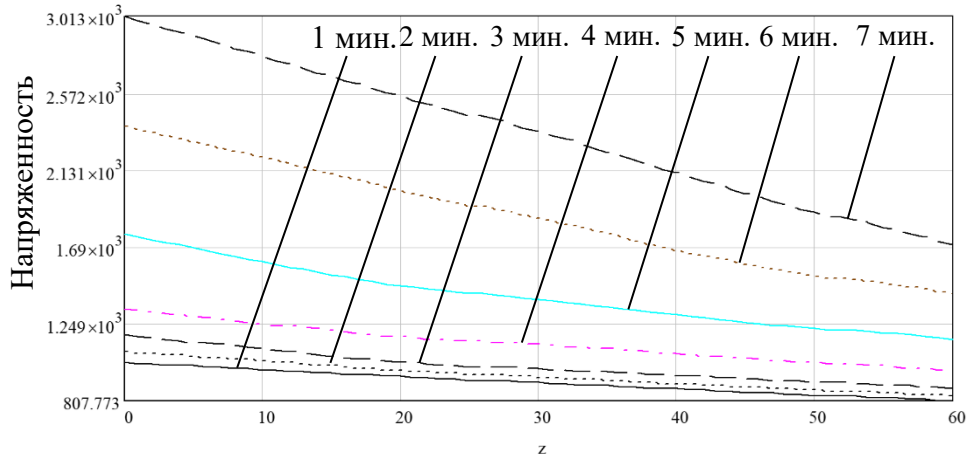


Рис. 2.15 – Модуль напряженности электрического поля в многослойной структуре при толщине каждого слоя $h = 0,01$ м. Материал: птичий помет, частота: 915 МГц

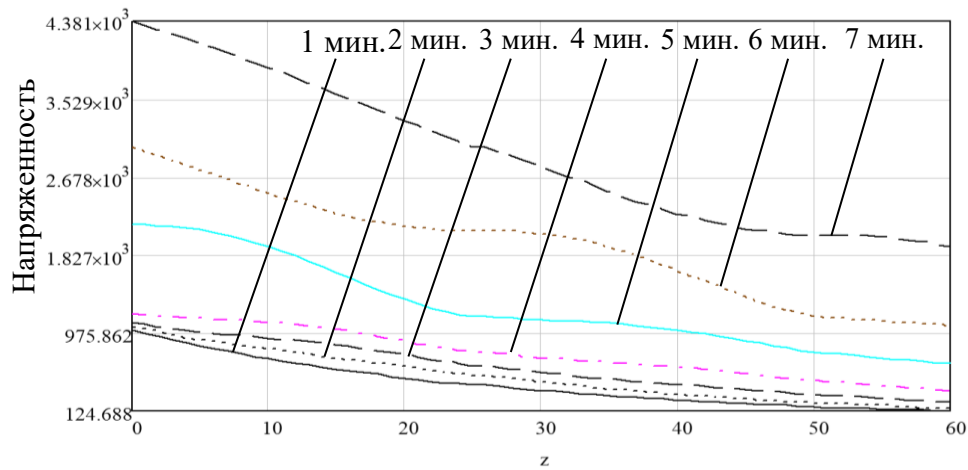


Рис. 2.16 – Модуль напряженности электрического поля в многослойной структуре при толщине каждого слоя $h = 0,01$ м. Материал: птичий помет, частота: 2450 МГц

Температурное поле в плоскостойкой структуре при условии постоянства электрофизических параметров диэлектриков, образующих слоистую структуру, описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности [64]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_1(z, t), \quad t > 0, \quad 0 < z < h_1, \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_2(z, t), \quad t > 0, \quad h_1 < z < h'_2, \\ \dots \\ c_6 \rho_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = \lambda_6 \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} + q_6(z, t), \quad t > 0, \quad h'_5 < z < h'_6. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Начальные и граничные условия выбираются в виде [54, 63]:

$$T_1(z, 0) = T_0, \quad T_2(z, 0) = T_0, \quad \dots \quad T_6(z, 0) = T_0 \quad (2.6)$$

(здесь T_0 – начальная температура плоскостойкой структуры),

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}(0, t) = \kappa_1(T_1(0, t) - T_s), \quad \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z}(h'_6, t) = \kappa_6(T_6(h'_6, t) - T_s) \quad (2.7)$$

(здесь κ_1, κ_3 – коэффициенты теплообмена на верхней и нижней границе плоскостойкой структуры, T_s – температура окружающей среды),

$$\begin{aligned} T_1(h_1, t) &= T_2(h_1, t), & -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=h_1-0} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=h_1+0}, \\ T_5(h'_5, t) &= T_6(h'_5, t), & -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} \Big|_{z=h'_5-0} &= \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} \Big|_{z=h'_5+0}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Последние граничные условия (2.8) определяют совпадение температур и тепловых потоков по разные стороны от границ слоев плоскостойкой структуры [63].

Система уравнений теплопроводности (2.5) при начальных и граничных условиях (2.6) - (2.8) и (2.2) решалась конечноразностным методом по неявной схеме на сетке, узловые точки которой, совпадают с граничными точками слоев [63]. Для построения консервативной разностной схемы в одномерной области $[0 \leq z \leq h'_6]$ вводится в каждом слое равномерная по координате z сетка $z_j^{(m)} = (j-1)\Delta z_m$, $j = 1, 2, \dots, N_m$, где $\Delta z_m = h_m / (N_m - 1)$, $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. [52].

Обозначим $\hat{T}_j^{(m)} = T_m(z_j^m, t_k)$ и $T_j^{(m)} = T_m(z_j^m, t_{k-1})$ значения температуры в узлах сетки на последующем и предыдущем временных слоях соответственно ($t_k = (k-1) \cdot \Delta t$) [52, 65]. Уравнение теплового баланса для элементарной ячейки $[z_{j-1/2}^{(m)}, z_{j+1/2}^{(m)}]$, содержащей внутренний узел $z_j^{(m)}$ на промежутке времени от t_{k-1} до t_k , записывается в следующем виде [52]:

$$\int_{z_{j-1/2}^{(m)}}^{z_{j+1/2}^{(m)}} c_m \rho_m (\widehat{T}^{(m)} - T^{(m)}) dz = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left[-q_{j+1/2}^{(m)} + q_{j-1/2}^{(m)} + \int_{z_{j-1/2}^{(m)}}^{z_{j+1/2}^{(m)}} q_m(z) dz \right] dt. \quad (2.9)$$

где $q_{j\pm 1/2} = -\lambda \frac{\partial T^{(m)}}{\partial z} (z_{j\pm 1/2}^{(m)}, t_k)$ - тепловые потоки на границах элементарной ячейки $[z_{j-1/2}^{(m)}, z_{j+1/2}^{(m)}]$. Интеграл в левой части равенства определяет количество теплоты, затрачиваемое на нагрев элементарной ячейки. Аппроксимируем его выражением [52]:

$$\int_{z_{j-1/2}^{(m)}}^{z_{j+1/2}^{(m)}} c_m \rho_m (\widehat{T}^{(m)} - T^{(m)}) dz \approx c_m \rho_m (\widehat{T}_j^{(m)} - T_j^{(m)}) \Delta z_m. \quad (2.10)$$

Подставляя выражения для тепловых потоков в уравнение баланса, получим разностное уравнение для внутренних точек [52]:

$$c_m \rho_m (\widehat{T}_j^{(m)} - T_j^{(m)}) \Delta z_m = \Delta t \left(\lambda_m \frac{\widehat{T}_{j+1}^{(m)} - 2\widehat{T}_j^{(m)} + \widehat{T}_{j-1}^{(m)}}{\Delta z_m} + \int_{z_{j-1/2}^{(m)}}^{z_{j+1/2}^{(m)}} q_m(z) dz \right). \quad (2.11)$$

Записав уравнение теплового баланса для элементарной ячейки $[0, \Delta z_1/2]$, прилегающей к верхней границе области, получим разностное уравнение для верхней границы [52]:

$$k_1 (T_c - \widehat{T}_1^{(1)}) - \lambda_1 \frac{\widehat{T}_1^{(1)} - \widehat{T}_2^{(1)}}{\Delta z_1} + \int_0^{\Delta z_1/2} q_1(z, t_k) dz = c_1 \rho_1 \frac{\widehat{T}_1^{(1)} - T_1^{(1)}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta z_1}{2}. \quad (2.12)$$

Для элементарной ячейки, содержащей узел, принадлежащий границе слоев, разностное уравнение имеет вид [52]:

$$\begin{aligned} & \lambda_{m-1} \frac{\widehat{T}_{N_m-1}^{(m-1)} - \widehat{T}_{N_m}^{(m-1)}}{\Delta z_{m-1}} - \lambda_m \frac{\widehat{T}_1^{(m)} - \widehat{T}_2^{(m)}}{\Delta z_m} + \int_{h_{m-1}-\Delta z_{m-1}/2}^{h_{m-1}} q_{m-1}(z) dz + \int_{h_{m-1}}^{h_{m-1}+\Delta z_m/2} q_m(z) dz = \\ & = c_{m-1} \rho_{m-1} \frac{\widehat{T}_{N_m}^{(m-1)} - T_{N_m}^{(m-1)}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta z_{m-1}}{2} + c_m \rho_m \frac{\widehat{T}_1^{(m)} - T_1^{(m)}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta z_m}{2}, \quad m = 2, 3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Записав уравнение теплового баланса для элементарной ячейки $[h'_6, h'_6 - \Delta z_6/2]$, прилегающей к нижней границе области, получим разностное уравнение для нижней границы [52]:

$$k_5 \left(T_c - \widehat{T}_{N_6}^{(6)} \right) + \lambda_6 \frac{\widehat{T}_{N_3}^{(6)} - \widehat{T}_{N_6-1}^{(6)}}{\Delta z_6} + \int_{h_6 - \Delta z_6/2}^{h_6} q_6(z) dz = c_6 \rho_6 \frac{\widehat{T}_{N_6}^{(6)} - T_{N_5}^{(6)}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta z_6}{2}. \quad (2.14)$$

Начальные условия записываются в виде $T_j^{(1)} = T_j^{(2)} = \dots = T_j^{(6)} = T_0$

Значения температуры $\widehat{T}_j^{(m)}$ в сеточных точках на следующем временном слое находятся путем решения системы линейных уравнений. Значения температуры на первом временном слое определяется из начального условия [65].

На рис. 2.17 – 2.20 приведены кривые, отражающие распределение температуры в плоскостройной структуре для частот 915 и 2450 МГц. По горизонтальной оси отложены значения координаты z в мм, а по вертикальной оси – значения температуры в °С. Также приведены значения усредненной температуры всех слоев в зависимости от времени СВЧ воздействия.

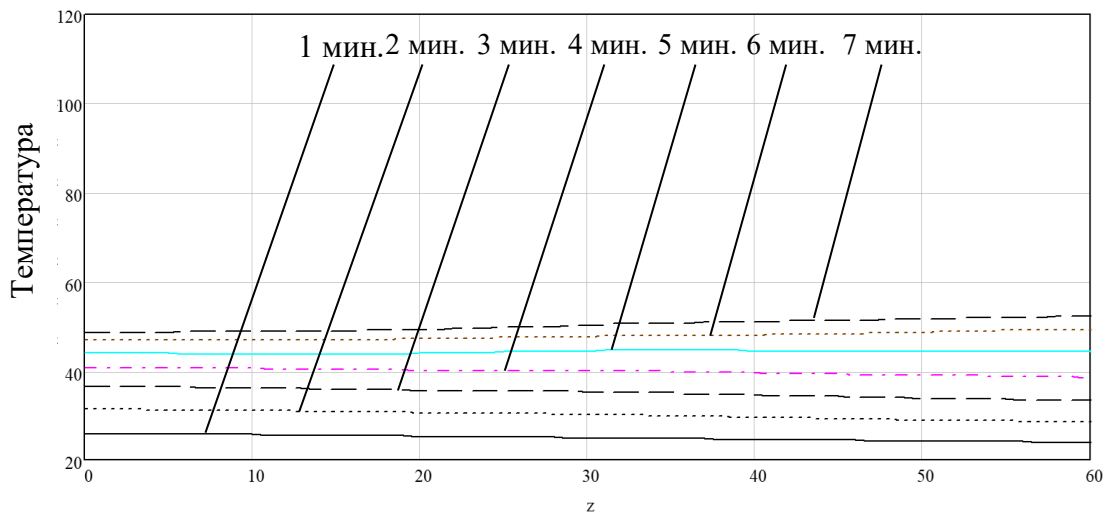


Рис. 2.17 – Распределение температуры в многослойной структуре. Материал: птичий помет, частота: 915 МГц, время нагрева 7 минут

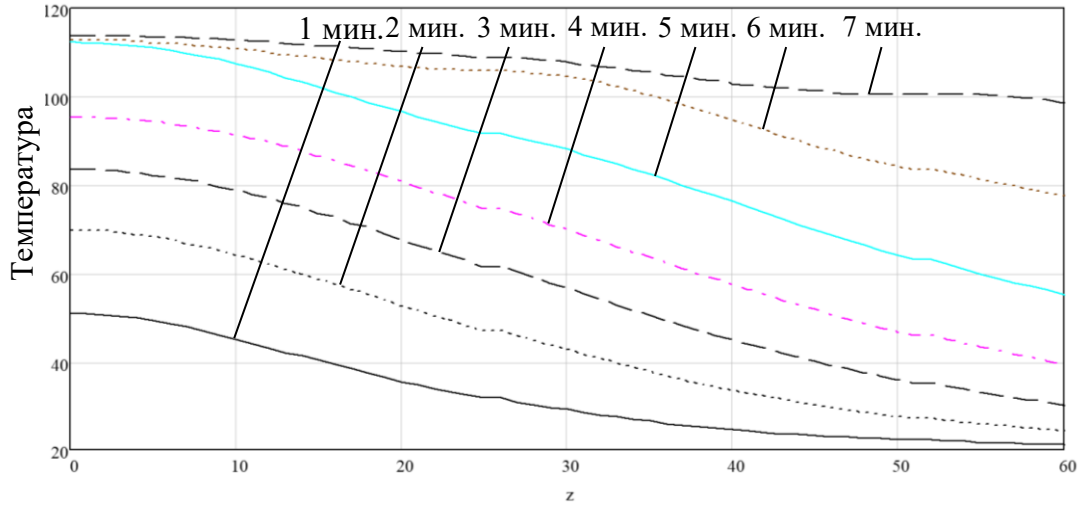


Рис. 2.18 – Распределение температуры в многослойной структуре. Материал: птичий помет, частота: 2450 МГц, время нагрева 7 минут

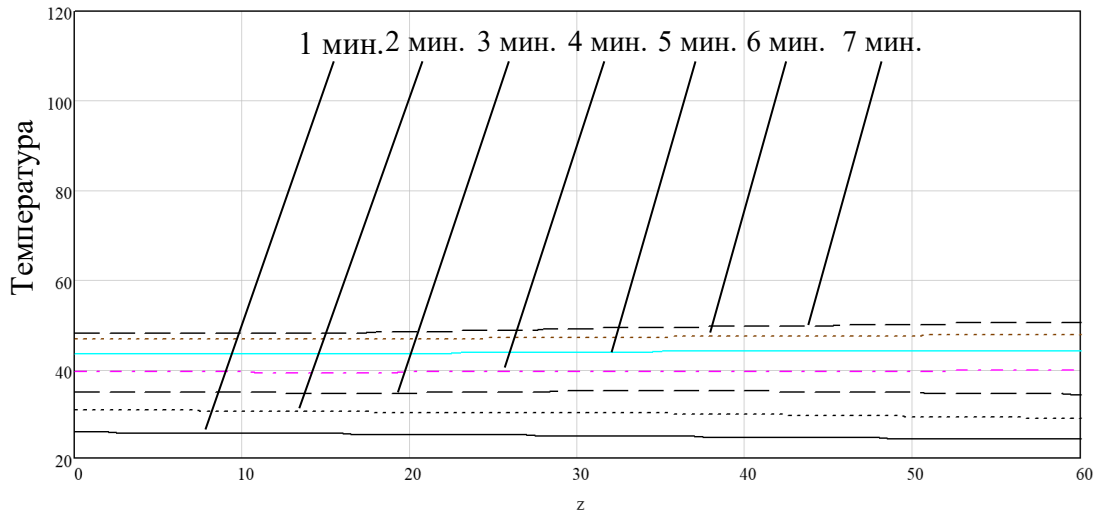


Рис. 2.19 – Распределение температуры в многослойной структуре. Материал: конский навоз, частота: 915 МГц, время нагрева 7 минут

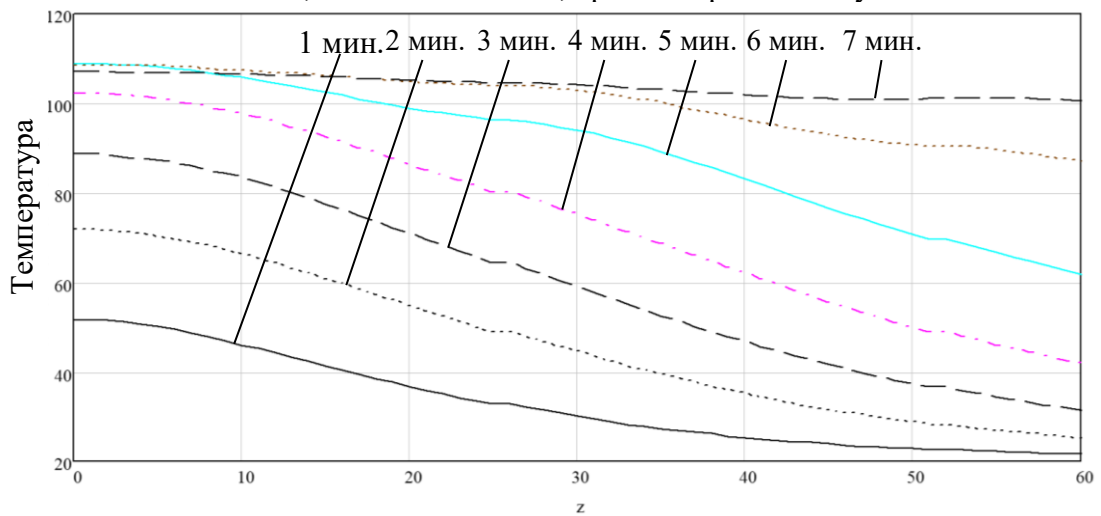


Рис. 2.20 – Распределение температуры в многослойной структуре. Материал: конский навоз, частота: 2450 МГц, время нагрева 7 минут

В таблице 2.7 представлены усредненные значения температур всех слоев при различном времени нагрева частотами ЭМП СВЧ диапазона 915 и 2450 МГц

Таблица 2.7 – Средняя температура всех слоев птичьего помета в зависимости от времени СВЧ воздействия, частота 915 МГц

Материал	Время нагрева, мин.	Средняя температура объекта, °С,	Частота, МГц
Птичий помет	1	24,99	915
	2	29,9805	
	3	34,9095	
	4	39,7175	
	5	44,0375	
	6	48,176	
	7	50,428	

Таблица 2.8 – Средняя температура всех слоев птичьего помета в зависимости от времени СВЧ воздействия, частота 2450 МГц

Материал	Время нагрева, мин.	Средняя температура объекта, °С	Частота, МГц
Птичий помет	1	35,4605	2450
	2	47,138	
	3	56,842	
	4	67,8685	
	5	84,3135	
	6	94,9985	
	7	106,184	

Таблица 2.9 – Средняя температура всех слоев конского навоза в зависимости от времени СВЧ воздействия, частота 915 МГц

Материал	Время нагрева, мин.	Средняя температура объекта, °С,	Частота, МГц
Конский навоз	1	24,947	915
	2	29,8945	
	3	34,579	
	4	39,4735	
	5	43,684	
	6	47,105	
	7	49,0525	

Таблица 2.10 –Средняя температура всех слоев конского навоза в зависимости от времени СВЧ воздействия, частота 2450 МГц

Материал	Время нагрева, мин.	Средняя температура объекта, °С	Частота, МГц
Конский навоз	1	36,612	2450
	2	48,783	
	3	60,1315	
	4	72,1395	
	5	85,1335	
	6	97,7975	
	7	103,88	

Из приведенных кривых видно, что за 6 минут нагрева птичьего помета и конского навоза частотой 915 МГц температура во всем слое на 56 и 53°С меньше, соответственно, чем при 2450 МГц. С увеличением времени нагрева температура слоев также увеличивается, а распределение температуры в слое становится более равномерным. Температура первого слоя, увеличивается более значительно, за счет большого значения коэффициента потерь.

По мере высыхания первого слоя уменьшается его значение тангенса угла диэлектрических потерь, электромагнитное поле проникает в следующий слой где происходит интенсивное преобразование энергии электрического поля в тепловую энергию, а также осуществляется теплообмен с первым слоем, поэтому улучшается равномерность нагрева во всех слоях обрабатываемого материала.

Из приведенных кривых видно, что при требуемом слое птичьего помета и конского навоза целесообразно использовать генераторы с частотой 2450 МГц.

2.4 Выводы по главе

Проведено экспериментальное измерение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь птичьего помета и конского навоза на частотах 915 и

2450 МГц методом коаксиального пробника; определены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, связь диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь с влажностью материала. Полученные результаты были использованы в расчете математического моделирования процесса обработки птичьего помета и конского навоза.

Разработана математическая модель СВЧ нагрева многослойного диэлектрика (птичьего помета и конского навоза) для частот 915 и 2450 МГц. В ходе математического моделирования были получены следующие результаты: при нагреве куриного помета на частоте 2450 МГц, нагрев происходит за 7 минут до 110 °С с неравномерностью нагрева между слоями в 10 °С, при использовании частоты 915 МГц нагрев происходит за 7 минут до 40 °С с неравномерностью нагрева 2 °С. Таким образом можно увидеть, что неравномерность нагрева в случае применения частоты 915 МГц ниже, чем при частоте 2450 МГц, но энергоемкость процесса при частоте 2450 МГц при той-же мощности генератора выше, т.е. при частоте 2450 МГц временные затраты на нагрев до 100 °С в 2,5 раза меньше, чем при частоте 915 МГц. Таким образом можно сделать вывод, что для построения системы для решения задач производительного, но не равномерного нагрева требуется использование генератора частотой 2450 МГц, а для обеспечения равномерного прогрева, во избежание перегрева, но с большими энергозатратами, требуется использовать генераторы частотой 915 МГц.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА ПРИ СВЧ-ОБРАБОТКЕ

Влажность органических отходов животноводства является ключевым фактором, определяющим качество выходного продукта, следовательно, осуществление контроля влажности во время обработки может значительно повысить общую эффективность процесса технологической обработки. Существуют различные методы и средства измерения влажности, применяемые в практике промышленной обработки сред различной природы. Одним из распространенных методов является микроволновый диэлектрический метод измерения влажности, основанный на характерном взаимодействии влаги, распределенной в объекте, с электромагнитным полем СВЧ диапазона.

Применение микроволнового диэлектрического метода измерения влажности в процессе конвейерной СВЧ обработки, когда возможна организация отдельных зон контроля и электромагнитного воздействия, открывает ряд перспективных возможностей, основным из которых представляется использование измеренной комплексной диэлектрической проницаемости в схеме адаптивного управления установкой СВЧ обработки.

Точное определение электродинамических характеристик материалов является важной задачей для СВЧ-процессов. Существует множество методов

измерения комплексной диэлектрической проницаемости, зависящей от структуры молекул, из которых состоит материал. Измерение диэлектрических свойств материала широко используются во многих областях, таких как пищевая промышленность, контроль качества, биоинженерия или медицинская промышленность, где необходимо контролировать изменение комплексной диэлектрической проницаемости материалов.

Микроволновое измерение является эффективным методом зондирования за счет неинвазивных свойств, способности проникновения, обнаружения в реальном времени и высокой точности.

В главе рассматривается разработка конструкции планарного резонансного датчика для измерения комплексной диэлектрической проницаемости объекта для дальнейшего использования результатов измерений в адаптивной схеме управления технологической СВЧ-установкой и нахождения влажности материала.

3.1 Методы измерения свойств диэлектриков

Существуют два типа методов, которые могут быть использованы для измерения диэлектрика с помощью микроволновой техники, которые можно отнести к нерезонансным и резонансным методам.

Резонансный метод имеет высокую точность по сравнению с нерезонансным методом; что является причиной выбора резонансного метода вместо нерезонансного. С помощью резонансного метода вычисляются электромагнитные свойства исследуемого материала за счет изменения резонансных свойств резонатора. Другими словами, резонансный метод используется для получения точных диэлектрических свойств только на одной частоте или нескольких дискретных частотах. Нерезонансный метод

используется для получения электромагнитных свойств материала в диапазоне частот.

По сравнению с нерезонансным методом, резонансный обычно применяется в качестве точного прибора для измерения электромагнитных свойств материала, таких как комплексная диэлектрическая проницаемость, проницаемость и сопротивление для частот микроволнового диапазона. Высокая добротность резонатора обуславливает высокую чувствительность прибора, в этом случае его можно использовать для восприятия разности физических величин, зависящих от комплексной диэлектрической проницаемости.

Метод возмущения. Наиболее популярный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями известен как метод возмущений. Метод возмущений использовался в течение многих десятилетий для измерения электромагнитных характеристик между пустыми и частично нагруженными резонаторами. Эта техника является наиболее распространенной из-за ее простоты и точности. Когда в резонансную полость вводится диэлектрик, резонансная частота сдвигается на определенную величину, а полоса контура и амплитуда изменяются в зависимости от потерь. Для максимальной чувствительности измерения параметров диэлектрика, образец должен быть помещен в максимум электрического поля. Введение исследуемого объекта в полость вызывает эффект возмущения в общем контуре. Возмущение вызывает смещение резонансной частоты и уменьшение незагруженной добротности.

Отклик полости на возмущение, в частности, связан с диэлектрическими свойствами исследуемого материала через теорию возмущения. Исходя из теории возмущений, предполагается, что изменение резонансной частоты увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости исследуемого материала. Резонансная частота смещается на более низкую частоту при контакте исследуемого материала с датчиком. Это происходит из-за

максимального электрического поля резонатора, т.к. когда он возмущен образцом поле фокусируется в объекте наложения. Также, при контакте резонатора с исследуемым объектом можно увидеть изменения амплитуды резонанса. Изменение амплитуды обусловлено эффективными диэлектрическими свойствами образца.

Метод отражения. Метод отражения способен измерять только один из параметров: либо диэлектрическую проницаемость, либо магнитную проницаемость.

Излученные электромагнитные волны направляются на исследуемый материал, после чего свойства образца можно определить по коэффициенту отражения, возникающему в заданной плоскости отсчета. Для применения метода отражения при измерении диэлектрических свойств в основном используется однопортовый резонатор. Излученный сигнал отражается обратно от исследуемого материала в тот же порт и измеряется параметр S_{11} . Динамический диапазон измерений отражения ограничен направленностью измерительного порта.

Необходима калибровка порта для того, чтобы повысить точность и чувствительность измерения системы. Благодаря калибровке исключаются ошибки при измерении свойств объекта. Значение S_{11} можно использовать для определения ширины по половинной мощности (3.1). В уравнении (3.1) S_{11b} является базовой линией резонанса для значения S_{11} . В то время как S_{11f_0} - это значение резонансной частоты для S_{11} . Кроме того, из рис. 3.1 также можно определить добротность резонатора на основе полосы пропускания и резонансной частоты [70,71]:

$$S_{1,1\Delta f} = 10 \log \left(\frac{10^{\frac{S_{11b}}{10}} + 10^{\frac{S_{11f_0}}{10}}}{2} \right) (dB) \quad (3.1)$$

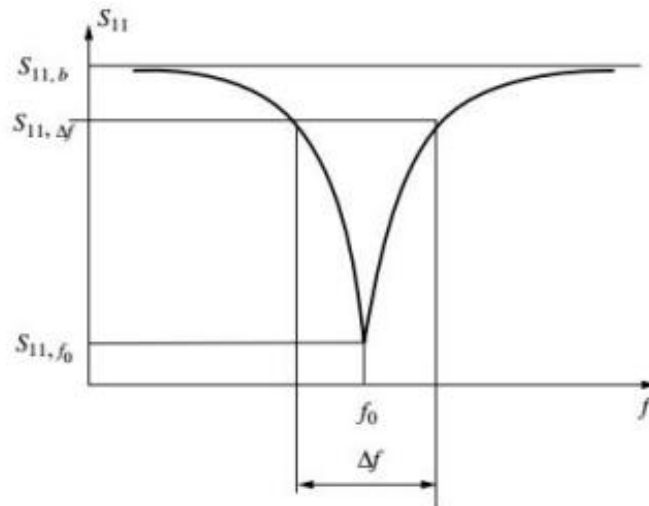


Рис. 3.1 – Характеристика отражения

3.2 Существующий кольцевой резонансный датчик на основе микрополосковой линии

Разработка однопортового прямоугольного резонаторного датчика с резонансной частотой 3,98 ГГц описана в статье [66].

Датчик построен с использованием подложки Roger 5880 толщиной 0,787 мм и тангенсом потерь 0,009 [72-75]. Прямоугольный резонаторный датчик показан на рис. 3.2. Для преодоления проблемы низкой производительности в резонаторе из-за больших обратных потерь в конструкцию введен метод усиления.

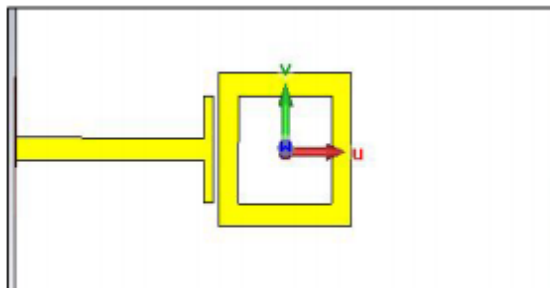


Рис. 3.2 – Структура резонансного прямоугольного датчика [66]

Исследования датчика проводились на основе метода отражения. Полоса пропускания S11 на уровне 0,707 (-3 дБ) составляет 0,070678 ГГц (Рис. 3.3). Резонансная частота возникает при 3,992 ГГц, добротность составляет 57.

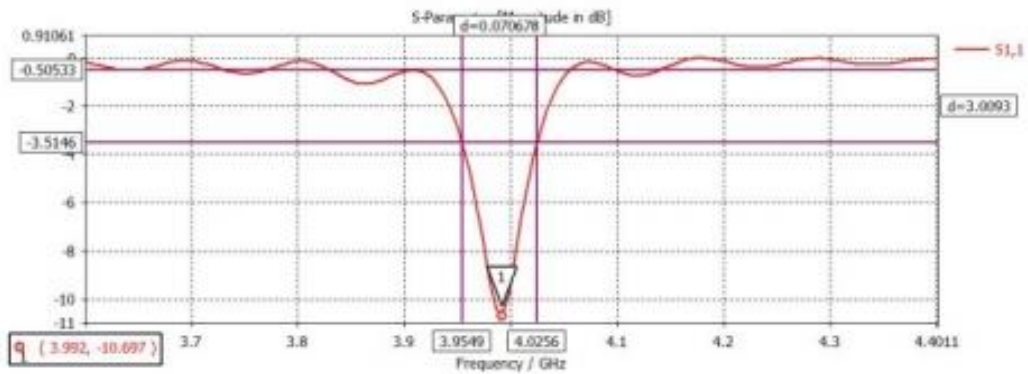


Рис. 3.3–Полоса пропускания датчика [66]

На рис. 3.4 показаны изменения резонансной частоты после того, как на датчик были помещены материалы с различными диэлектрическими свойствами. На графике видно, что чувствительность датчика может быть представлена в зависимости относительного сдвига резонансной частоты с диэлектрической проницаемостью объекта. Сделан вывод, что чем выше диэлектрическая проницаемость образцов, тем выше процент сдвига частоты, чем выше диэлектрическая проницаемость образцов, тем ниже резонансная частота.

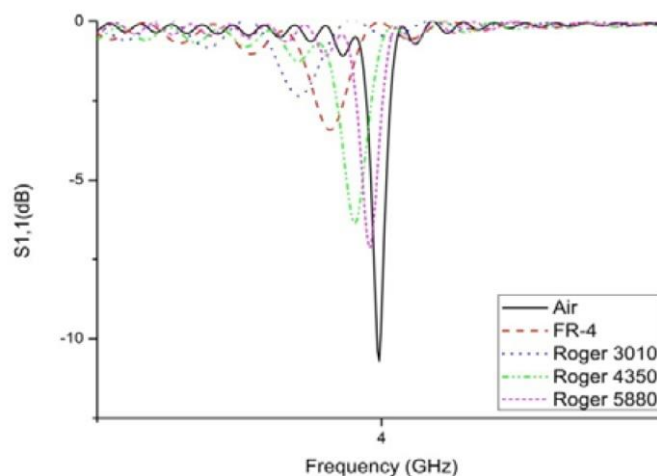


Рис. 3.4 – Сдвиг резонансной частоты при различных значениях диэлектрических свойств материалов [66]

Недостатками данного резонансного датчика на основе микрополосковой линии являются: возможность использования его только как лабораторный метод, невозможность полного погружения в жидкий или полутвердый материал. Исследуемый материал должен быть установлен на поверхность датчика ровно в измерительную область, т.к. контакт подводящей линии с исследуемым объектом внесет искажения в результат измерения.

В данной работе разрабатывается кольцевой резонаторный датчик на основе симметричной полосковой линии, отличающейся от микрополосковой (несимметричной) наличием двух экранирующих поверхностей. Определение характеристик материалов производится методом возмущения. Предлагаемый резонатор должен быть рассчитан на рабочую резонансную частоту 2.45 ГГц. Датчик планируется спроектировать и изготовить на подложке ФАФ-4Д.

Датчик предназначен для использования в технологической линии СВЧ обработки органических отходов животноводства. Разрабатываемый датчик должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости должно проводиться на частоте обработки $f_{\text{обр}}=2450 \pm 5\%$ МГц;
2. Диапазон изменения резонансной частоты датчика при изменении влажности объектов контроля в заданных пределах не должен превышать $f_{\text{обр}}=2450 \pm 5\%$ МГц;
3. Измерение должно проводиться в локальной точке объекта;
4. Возможность объединения с температурным датчиком для измерения температуры в точке измерения диэлектрической проницаемости.

3.3 Расчет кольцевого резонансного датчика на основе симметричной полосковой линии

Симметричная полосковая линия является одной из распространённых линий передачи СВЧ-диапазона. Данный вид полосковых линий выбран из-за отсутствия прямого контакта подводящей линии с исследуемым объектом для обеспечения локальности измерения. Основным типом волны симметричной полосковой линии является Т-волна. Все ее конструктивные параметры определяются на основе электростатического анализа [67]. Для проектирования кольцевого резонатора на основе симметричной полосковой линии используется принцип, который может быть использован для обеспечения возможности изменения комплексной диэлектрической проницаемости при размещении любого диэлектрического материала на поверхности подложки; вызвать изменения резонансной частоты.

Когда средняя длина окружности кольцевого резонатора становится равной целому числу длин волн в соответствующей линии передачи, то образуются резонансы. Данное условие можно выразит как:

$$2\pi r = n\lambda_g \text{ для } n=1,2,3\dots, \quad (3.2)$$

где n – порядковый номер резонанса, λ_g – длина волны в линии передачи, r – средний радиус кольцевого резонатора, численно равный среднему значению между внешним и внутренним радиусами кольцевого резонатора. Выражение (3.2) применимо для вариантов слабосвязанных резонаторов, когда влияющие на резонанс эффекты устройства связи не значительны.

Для симметричной полосковой линии длина волны λ_g связана с частотой следующим образом:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} \quad (3.3)$$

где c – скорость электромагнитных волн в вакууме, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика полосковой линии, f – резонансная частота.

С учетом (3.3) из (3.2) можно получить

$$r = \frac{nc}{2\pi f \sqrt{\varepsilon_r}} \text{ для } n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.4)$$

Для связи с объектом измерения в одной из экранирующих поверхностей симметричной полосковой линии в области расположения кольцевого резонатора необходимо реализовать щелевую апертуру, посредством которой часть электрического поля резонатора будет проникать в диэлектрический исследуемый объект. В этом случае резонансная частота согласно (3.4) в первом приближении будет определяться как

$$f = \frac{nc}{2\pi r \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_{eff}(\varepsilon_{test})})} \text{ для } n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.5)$$

где $\varepsilon_{eff}(\varepsilon_{test})$ эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость, зависящая от комплексной диэлектрической проницаемости ε_{test} объекта исследования, $\operatorname{Re}(\dots)$ - выделение вещественной части.

Нахождение зависимости $\varepsilon_{eff}(\varepsilon_{test})$ является сложной задачей, так как зависит от формы щелевой апертуры, поэтому нахождение зависимости резонансной частоты от ε_{test} проводится методами вычислительной электродинамики. К тому же в методе возмущения вместо (3.5) можно принять следующее выражение:

$$f = \frac{nc}{2\pi r \sqrt{\operatorname{Re}(\varepsilon_{eff}(\varepsilon_{test}))}} \text{ для } n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.6)$$

Нахождение параметров возбуждающей полосковой линии и кольцевой структуры, а именно толщины диэлектрика и ширины полосковых проводников, производится по классическим методикам, изложенным во многих источниках. Значения указанных параметров выбирались для обеспечения волнового сопротивления линий, равных 50 Ом.

Исходя из ширины центрального проводника симметричной полосковой линии w определяются внешний и внутренний радиусы кольцевого резонатора:

$$R_o = r + \frac{w}{2} \quad (3.7)$$

$$R_i = r - \frac{w}{2} \quad (3.8)$$

Добротность резонатора находится как:

$$Q = \frac{f}{BW} \quad (3.9)$$

где BW - полоса пропускания резонансной частоты.

Благодаря начальным математическим расчетам микроволнового датчика численный результат может быть использован для проектирования конструкции в программном обеспечении компьютерного моделирования CST Microwave Studio.

3.4 Компьютерное моделирование резонансного кольцевого датчика на основе симметричных полосковых линий

Модель двухпортового кольцевого резонаторного датчика на основе симметричной полосковой линии с основной резонансной частотой 2,45 ГГц разработана в программном продукте электромагнитного моделирования CST Microwave Studio. Основные геометрические размеры резонаторного датчика определены на основе математического анализа. Интересуемыми параметрами моделируемого датчика представлялись основная резонансная частота, добротность и значение коэффициента передачи на резонансной частоте (амплитуда резонанса) при различных физических размерах образцов, а также диэлектрической проницаемости при заданной влажности и температуре.

В качестве типа преобразовательного элемента датчика было предложено использовать ближнеполевые резонансные структуры в полосковом исполнении. По причине больших потерь в объекте измерения в конструкции датчика должен быть применен метод возмущения. Резонансная структура представляет собой кольцевой резонатор на основе симметричной полосковой линии. В верхнем экране симметричной полосковой линии введена кольцевая щель, внешним и внутренним диаметром меньше полоскового резонатора на 0,81 мм (Рис. 3.5а). Между верхним и нижним экраном симметричной полосковой линии расположен полосковый кольцевой резонатор с внешним диаметром 14 мм и шириной 1,62 мм [68]. На расстоянии 0,4 мм от полоскового кольцевого резонатора в одной горизонтальной плоскости расположен полосок шириной 1,62 мм, возбуждающий резонатор (Рис. 3.5б). Верхняя кольцевая щель расположена на одной оси с нижним полосковым кольцевым резонатором и имеет идентичные с ним размеры. Волновое сопротивление возбуждающей резонатор линии составляло 50 Ом. В качестве верхнего и нижнего диэлектриков симметричной полосковой линии выступали листы фторопласта толщиной 1 мм [69].

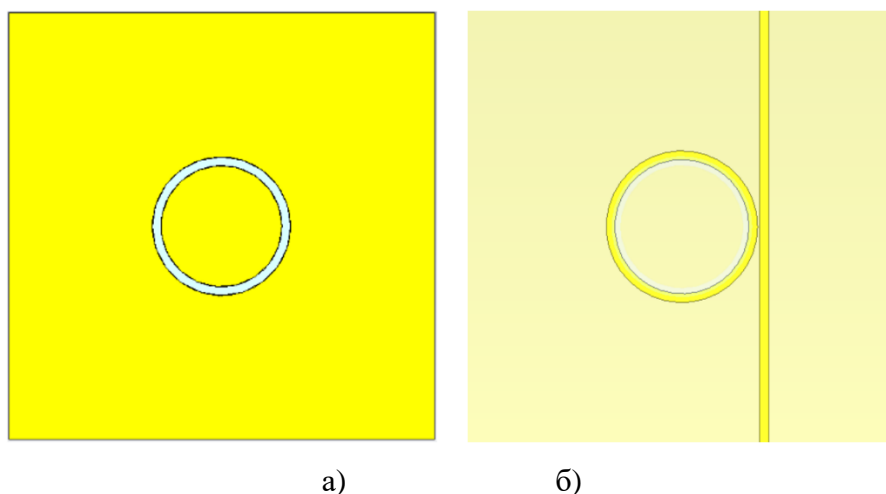


Рис. 3.5 – Симметричная полосковая линия: а) верхний экран, б) полосок и контур между экранами в диэлектрике [69]

Исследование резонансных характеристик датчика было проведено с помощью компьютерного электромагнитного моделирования. Моделируемый

датчик калибровался по ранее измеренным во второй главе значениям комплексной диэлектрической проницаемости птичьего помета и конского навоза для различной влажности. Исследуемый материал в компьютерной модели задавался как слой диэлектрика с соответствующими диэлектрическими параметрами, соприкасающийся с верхним экраном несимметричной полосковой линии [69].

Для применения разработанного резонаторного кольцевого датчика на основе симметричной полосковой линии в качестве сенсорной системы, измеряющей комплексную диэлектрическую проницаемость, необходимо изменить форму подводящей линии (полоска), для удобства подключения устройств съема информации об изменении частотных параметров датчика. На рис. 3.6 изображен резонаторный датчик с П-образным возбуждающим полоском.

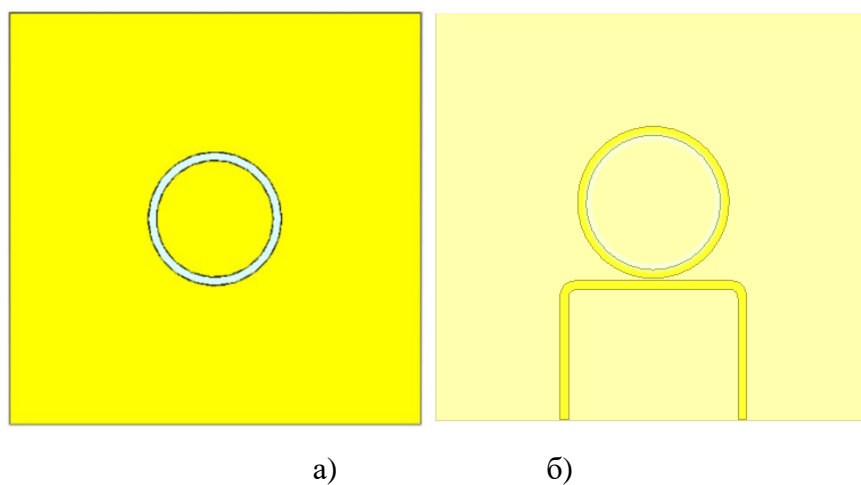


Рис. 3.6 – Симметричная полосковая линия: а) верхний экран, б) полосок (П-образный) и контур между экранами в диэлектрике

Датчик построен с использованием подложки ФАФ-4Д толщиной 2 мм и основываясь на результатах расчета параметров S_{11} и S_{21} , можно видеть, что датчик работает на частоте 2,48 ГГц [69].

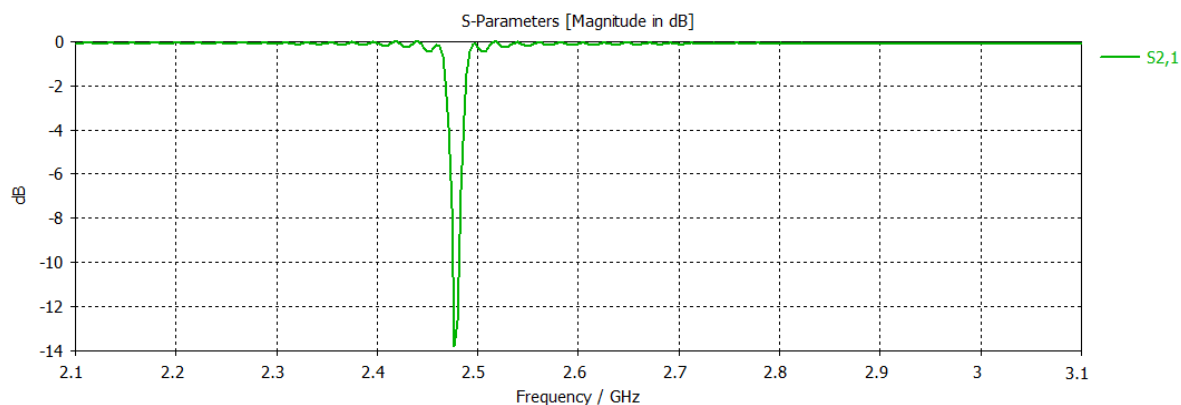


Рис. 3.7 – Коэффициент передачи и коэффициент отражения резонатора, показанного на рис. 3.6

Эффективность предлагаемого резонаторного датчика при использовании метода передачи оценивается путем анализа характеристики S₂₁. Резонансную частоту и полосу пропускания S₂₁ ненагруженного датчика по уровню половинной мощности можно оценить по рис. 3.7. Таким образом, резонансная частота составляет 2,48 ГГц, в то время как полоса пропускания - 0,016 ГГц. Добротность предлагаемого резонаторного датчика при моделировании составляет 155. Следовательно, предложенный резонатор более добротнее, чем рассматриваемый ранее резонатор на микрополосковой линии.

Локальная область измерения в испытуемом материале соответствует области максимального электрического поля, как показано на рис. 3.8 и рис. 3.9. Как можно наблюдать из распределения поля, только часть его находится в области расположения объекта, тем самым реализуется метод возмущения. Таким образом, предлагаемый датчик может проводить измерения материалов с потерями с точностью, достаточной для технологического контроля.

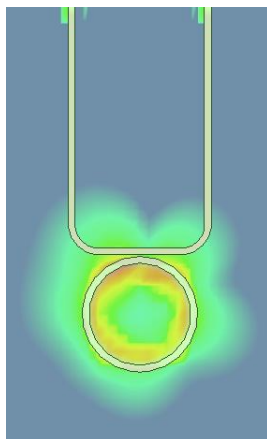


Рис. 3.8 – Модуль электрического поля при возбуждении кольцевого резонатора полосковой линией

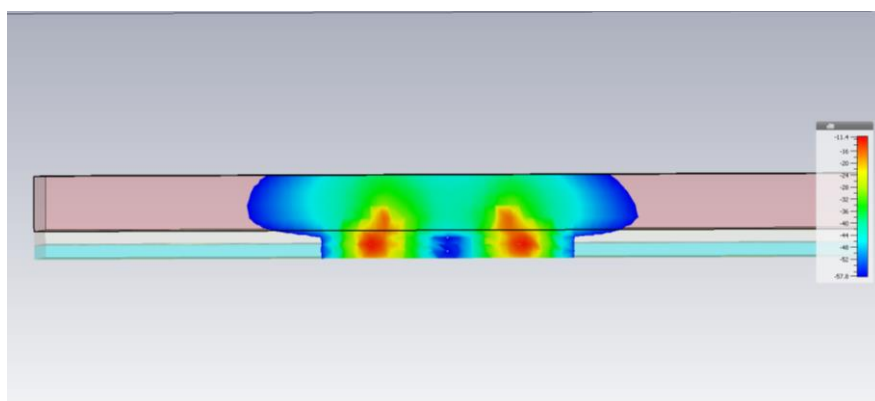
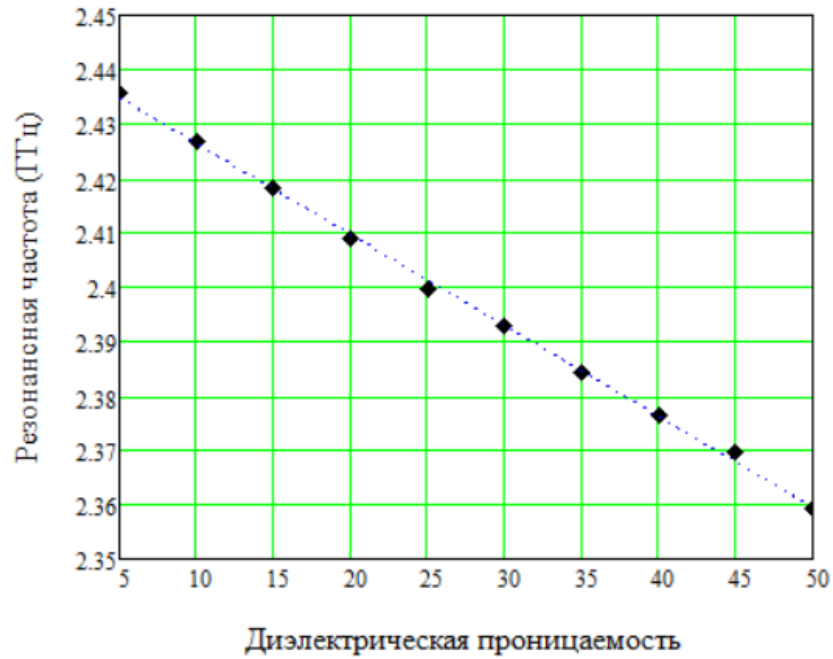
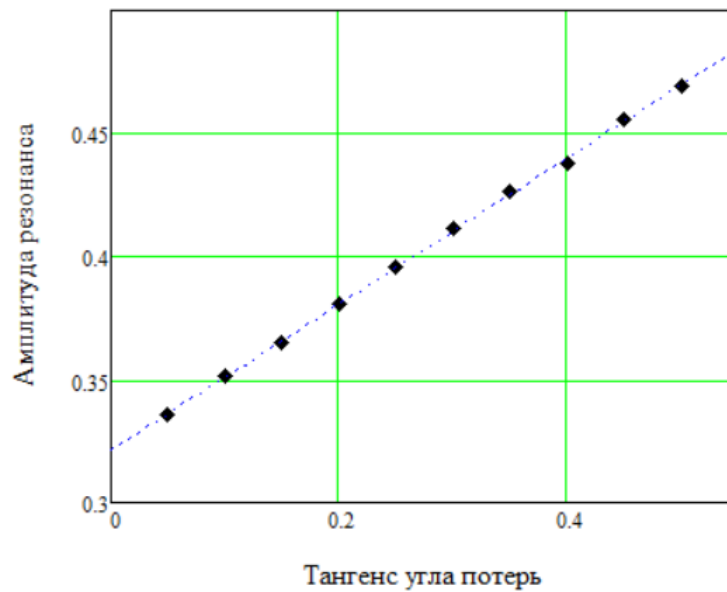


Рис. 3.9 – Модуль электрического поля в объекте измерения

Для калибровки датчика проведено компьютерное моделирование изменения резонансной кривой при различных значениях диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь объекта [15]. В результате были получены калибровочные прямые для сдвига резонансной частоты и амплитуды резонанса (рис. 3.10). Использование метода возмущения позволило получить линейные калибровочные кривые в заданном диапазоне изменения свойств тестируемого материала.



а)



б)

Рис. 3.10 – Калибровочные кривые

Результаты моделирования коэффициентов передачи при моделировании процесса измерения диэлектрической проницаемости куриного помета с влажностью 10% и 71% изображены на рис. 3.11 [69].

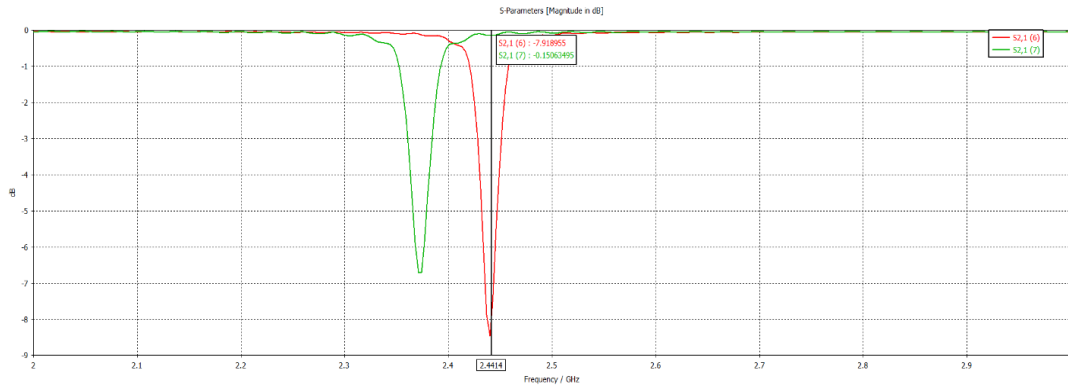


Рис. 3.11 – Моделирование коэффициентов передачи при моделировании процесса измерения диэлектрической проницаемости птичьего помета с влажностью 10% и 71% [69]

Как можно наблюдать на графике, сдвиг резонансной частоты составляет 70 МГц, что показывает возможность дальнейшего применения датчика в системе контроля и адаптивных контурах управления процессом конвейерной СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза [69].

Эффект локального измерения диэлектрической проницаемости, реализованный в разработанном датчике, позволяет строить на его основе квазираспределенные многосенсорные системы для более информативного определения свойств объектов технологического контроля. Пример квазираспределенного датчика на основе симметричной полосковой линии, показанный на рис. 3.11, состоит из трех отдельно возбуждаемых чувствительных зон, смещенных относительно центра по высоте, что позволяет измерять комплексную диэлектрическую проницаемость исследуемого объекта в трех точках.

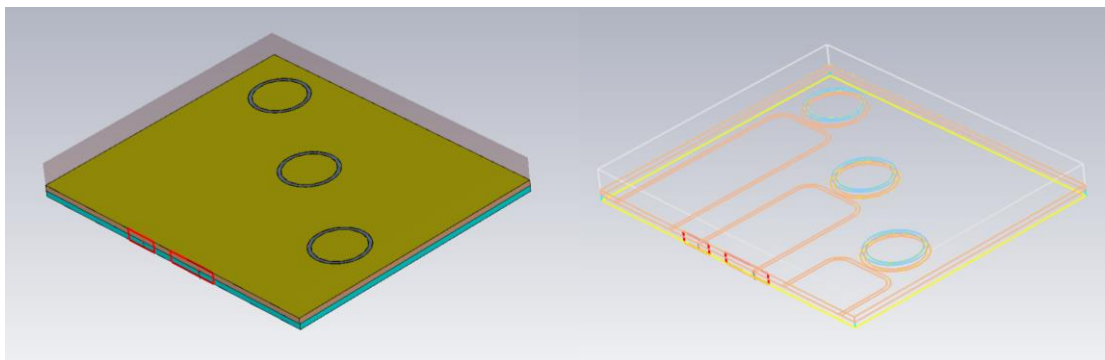


Рис. 3.11 – Квазираспределенный датчик

3.5 Изготовление экспериментального образца резонансного кольцевого датчика на основе симметричной полосковой линии

В результате математических расчетов и компьютерного моделирования были определены параметры разрабатываемого датчик для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов в процессе технологической обработки.

За основу (подложку) взят фольгированный армированный фторопластовый диэлектрик (ФАФ-4Д) ПО ГОСТ 21008 толщиной 1.5мм с двусторонней металлизацией. Основные параметры материала показаны в таблице 3.1. Методом химического травления получены щелевые и полосковые элементы двухслойной платы (рис. 3.12).



Рис. 3.12 – Двухслойная структура датчика

Таблица 3.1 – Характеристика ФАФ-4Д [67]

Наименование	Марка	Состав		Способ металлизации поверхности	ϵ_r	$\text{tg}\delta$	Характерные особенности
		Связующее	Наполнитель				
Листы из фторопласта-4Д	ФАФ-4Д	Суспензия на основе фторопласта4Д	Стеклоткань марки Э-0,1	Армированные Листы из фторопласта-	$2,5\pm 0,20$	до 1×10^{-3}	1.Предназначены для изготовления СВЧ-плат повышенной

фольги ро- ванные армиро ванные				4Д фольгиро ванные армиро- ванные ФАФ-4Д Сус- пензия на основе фто- ропласта4 Д Стеклотка нь марки Э-0,1 Фольгиро вание прессован ием фольгой толщиной 0,035 или 0,050 мкм		точности боль- ших габаритов, работающих в условиях повы- шенных темпе- ратур и механи- ческих нагрузок. 2. Имеют высо- кую механиче- скую прочность и теплостой- кость. 3. Стойки к действию агрессивных сред и органиче- ских раствори- телей. 4. Перед лакированием и склеиванием требуется спе- циальная обра- ботка поверхно- сти. 5. Обладают стабильностью размеров при изготовлении плат. 6. Допускает все вида механической обработки. Тем- пература пайки до 260 °С.
---	--	--	--	--	--	---

Внешний вид собранного датчика со стороны чувствительных участков, со стороны датчиков температуры и со стороны разъемов для подключения анализатора показаны на рис. 3.13.

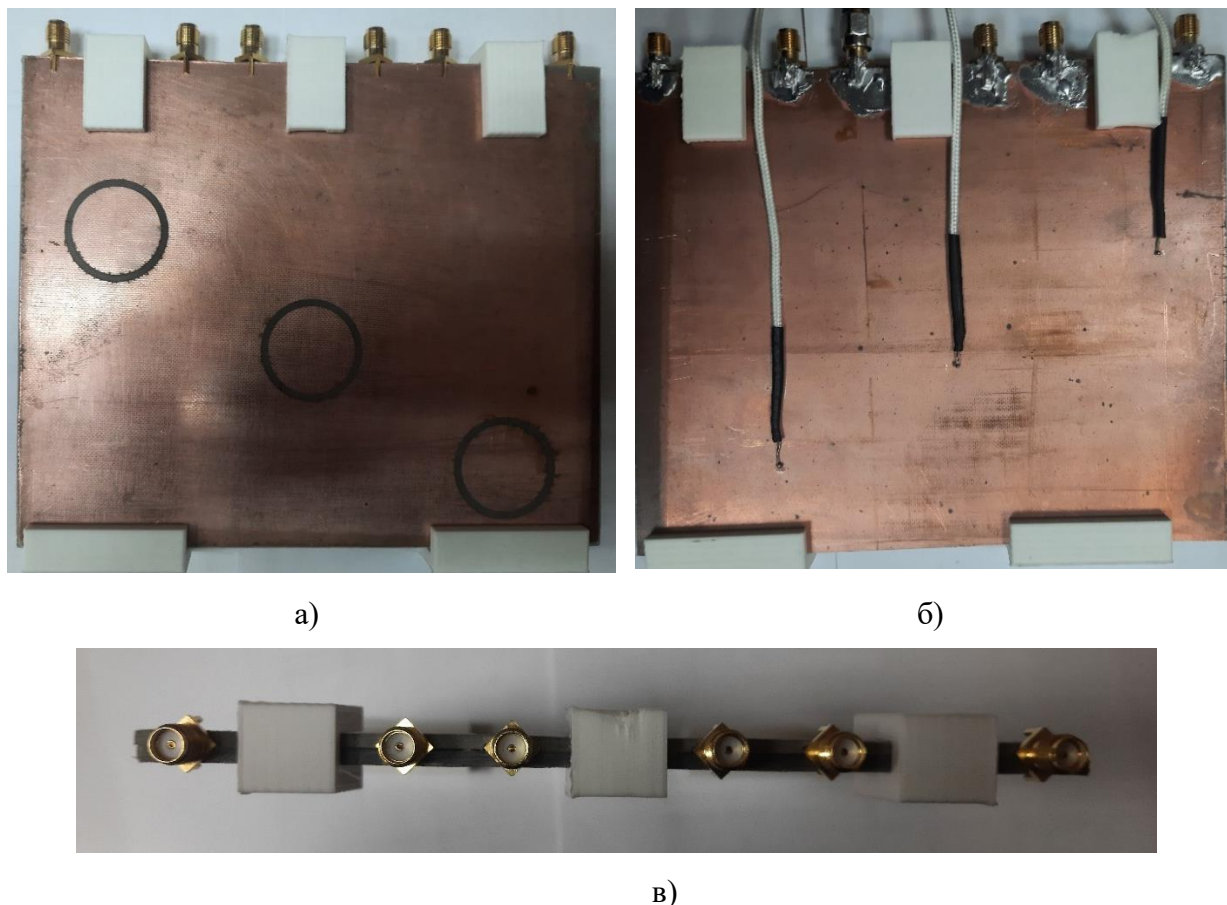


Рис. 3.13 – Разработанный датчик измерения резонансной частоты и температуры: а) вид со стороны чувствительных участков; б) вид со стороны датчиков температуры; в) вид со стороны разъемов для подключения анализатора

Температура измеряется с помощью термопар, установленных на задней стенке (экране) в трех точках по высоте.

На рис. 3.14 показана экспериментальная установка для измерения частотных характеристик разработанного датчика. Изменения резонансной частоты исследуемого резонатора контролировались с помощью векторного анализатора цепей R&SFSH8.

Результаты измерения датчика без тестируемого образца демонстрируются на рис 3.15. Существует отклонение, которое наблюдается между моделируемыми и измеряемыми результатами. Измеренная резонансная частота немного смещена относительно полученных в результате моделирования, и величина потерь выше, чем в результатах моделирования.

Такая ситуация возникает из-за погрешностей изготовления резонаторного датчика.

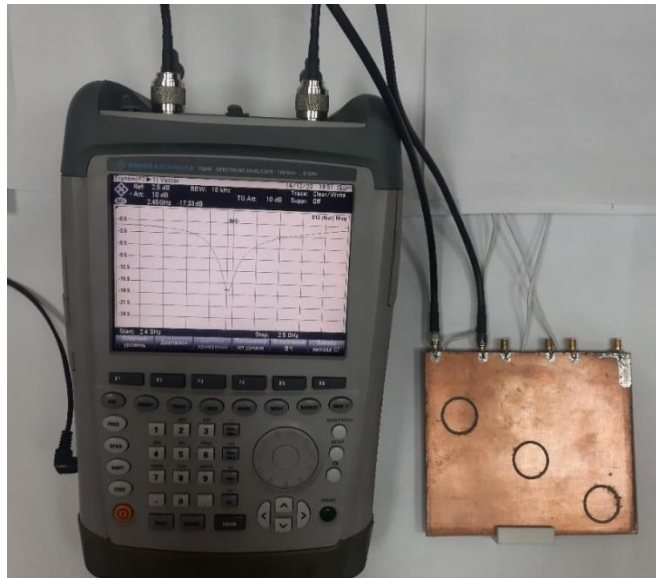


Рис. 3.14 – Измерение частотных характеристик датчика

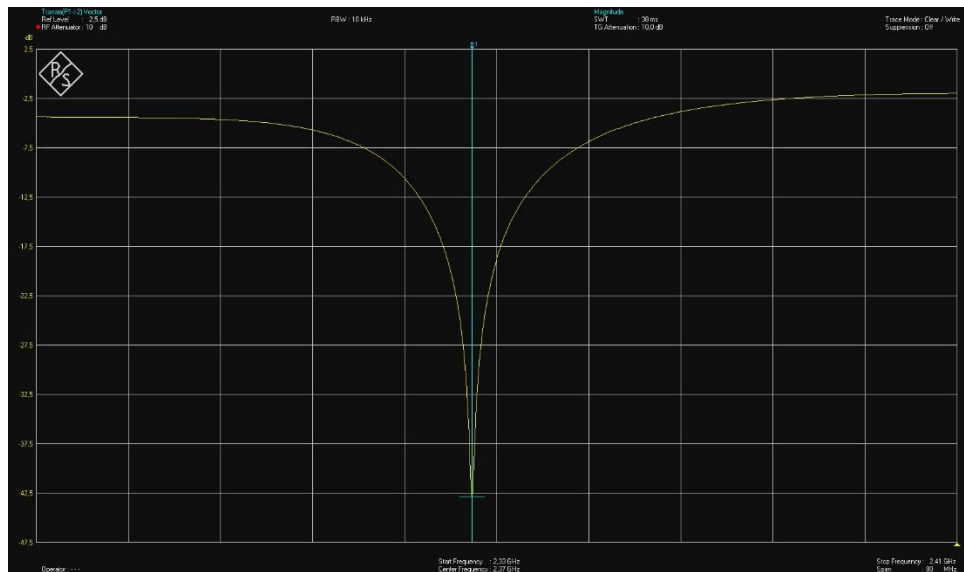


Рис 3.15 – Резонансная характеристика ненагруженного датчика

Разработанный датчик был экспериментально верифицирован для измерения диэлектрической проницаемости и влажности конского навоза.



Рис. 3.16 – Экспериментальное измерение комплексной диэлектрической проницаемости и температуры конского навоза

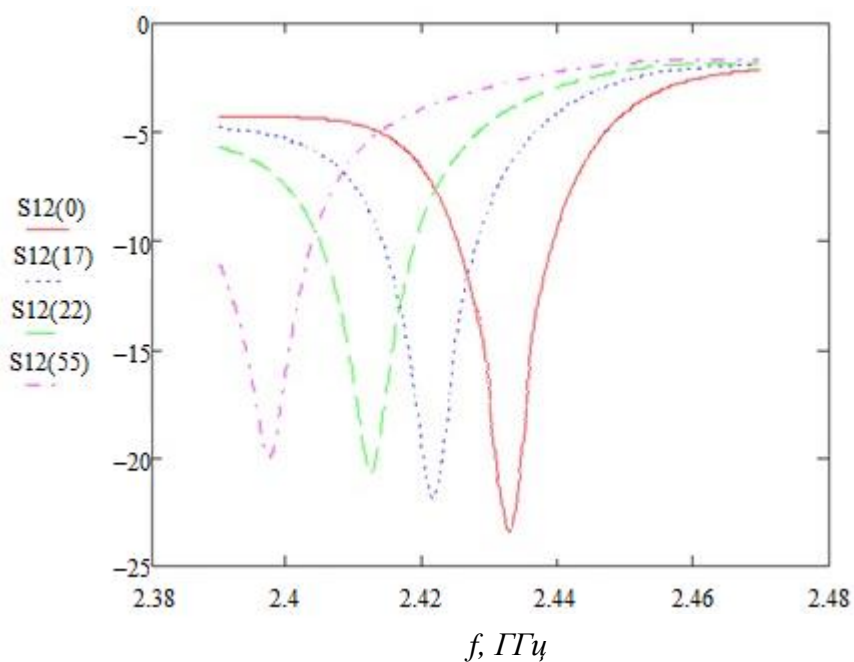


Рис. 3.17 – Результаты измерения коэффициента передачи датчика при различном содержании влаги в образце

Результат, показанный на рис. 3.17, иллюстрирует, что производительность изготовленного резонаторного датчика находится в хорошем согласии с датчиком при моделировании. Используя измеренные данные, можно смоделировать зависимость между сдвигом резонансной частоты и диэлектрической проницаемостью с помощью полинома второго порядка.

Основываясь на экспериментальных зависимостях диэлектрической проницаемости от влажности конского навоза и птичьего помета, а также результатов компьютерного моделирования резонансного датчика были получены следующие аппроксимационные выражения для определения влажности конского навоза и птичьего помета ,

$$\varphi_1 = 1,27\Delta f + 0,32, \varphi_2 = \sqrt{116,6\Delta f + 535,2} - 23,2, \quad (3.10)$$

где влажность выражена в %, сдвиг резонансной частоты Δf датчика - в МГц.

Для ухудшения адгезии используемых материалов в процессе обработки, датчик был покрыт слоем полидиорганосилоксанами. Толщина слоя составила 10 мкм.

3.6 Оценка точности измерения диэлектрической проницаемости и влажности

Разработанный в настоящей главе резонаторный датчик использует ближнеполевой метод измерения, недостатком которого является чувствительность к области контакта с тестируемым образцом. В условиях технологической линии контакт может изменяться, тем самым влияя на достоверность измерений. Учитывая высокую добротность резонатора, равную 155 для ненагруженного датчика, что позволяет с высокой точностью контролировать сдвиг частоты, не идеальность контакта с поверхностью объекта измерения является основным источником погрешности. Результаты статистического моделирования в программе электромагнитного моделирования и натурные эксперименты показали, что границы погрешности в определении диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ составляют 3-5%, тангенса угла диэлектрических потерь $\Delta\tg\delta=5-10\%$ для куриного помета и $\Delta\epsilon=5-10\%$ и $\Delta\tg\delta=10-15\%$ для конского навоза.

Определение влажности удобнее проводить по значениям ϵ , так как она имеет меньшую погрешность по сравнению с $\tg\delta$. Используя калибровочные

данные, полученные с помощью измерения коаксиальным пробником, можно получить оценки для погрешности измерения влажности: 3% для куриного помета и 5% для конского навоза.

3.7 Принципы построения датчиков температуры при СВЧ-обработке

Методы измерения температуры при СВЧ-обработке можно классифицировать следующим образом:

1. Бесконтактные;
2. Контактные.

Бесконтактные методы измерения температуры предполагают использование пирометра или инфракрасного термометра и телевизионных камер видимого, ближнего и дальнего ИК-диапазонов. К недостаткам бесконтактных методов измерения температуры можно отнести контроль распределений температуры только на поверхности материалов, а также сложность осуществления высокого пространственного разрешения.

К контактными методам измерения температуры относят:

1. Дискретные датчики, в которых чувствительными элементами являются медные термометры сопротивления, терморезисторы, полупроводниковые элементы и т.д. Недостатком такого метода является то, что процесс измерения температуры осуществляется, либо в паузах работы источника микроволновых полей, либо после его отключения, а также низкая точность измерения температуры.

2. Волоконно-оптические методы измерения температуры. Благодаря известным преимуществам, таким как невосприимчивость к электромагнитным полям и помехам, высокая точность измерений, возможность мультиплексирования, малые габариты и вес, волоконно-оптические датчики (ВОД) находят все более широкое применение в различных областях, в том числе они нашли применение и в рассматриваемой

области. Однако при всех описанных преимуществах ВОД, высокая стоимость и сложность конструкции традиционных методов опроса ВОД является основным ограничением для широкого внедрения таких систем [103].

В настоящее время на кафедре «Радиофотоники и микроволновых технологий» КНИТУ-КАИ ведется активное исследование в области адресных волоконных брэгговских решеток (АВБР) объединенных в многосенсорную систему. Применение АВБР позволяет повысить чувствительность измерения за счет обработки сигнала на частоте биений компонент двухчастотного сигнала, равной разностной частоте между ними, а также позволяет на порядок понизить стоимость схемы опроса [103, 104]. На рис. 3.18 представлена структурная схема многосенсорной системы измерения температуры, на основе АВБР.



Рис. 3.18 – Структурная схема многосенсорной системы измерения температуры, на основе АВБР

Возможность объединения датчиков на основе АВБР в многосенсорную систему заключается в том, что в каждом волоконно-оптическом датчике

внесены два симметричных фазовых π -сдвига, расстояние между которыми отличается на определенную величину у каждого из датчиков.

При изменении температуры с помощью волоконно-оптических датчиков изменяется центральная длина волны λ_B , что вызвано изменением ее периода вследствие температурного расширения материала оптического волокна $\delta\Lambda/\delta T$ и изменением показателя преломления под действием температуры $\delta n_{eff}/\delta T$. Изменение центральной длины волны $\Delta\lambda_B$ запишется в виде:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + n_{eff} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (3.11)$$

где ΔT – изменение температуры. Относительная погрешность измерения может достигать $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Использование адресных волоконных брэгговских структур совместно с резонансными датчиками позволяет создать многосенсорную систему контроля влажности и температуры. При этом показания каждого датчика влажности сгруппированы с показаниями определенного датчика температуры, что свидетельствует о месте расположения зоны контроля и позволяет визуализировать распределения поля температур и влажности обрабатываемой среды.

3.8 Выводы по главе

В данной главе предложен датчик для использования в технологической линии СВЧ обработки органических отходов животноводства. Конструктивно датчик представляет собой кольцевой резонатор в симметричной полосковой линии, связанный с объектом измерения посредством кольцевой щели в одном из экранов. Датчик позволяет измерять комплексную диэлектрическую проницаемость для дальнейшего использования в системе автоматизированного управления микроволновой технологической установкой. Используя данные из второй главы о диэлектрической

проницаемости, производится определение влажности материала в процессе обработки. Таким образом датчик одновременно решает две технологические задачи. Добротность разработанного датчика равна 155, что почти в 3 раза выше, чем у рассмотренного существующего датчика. Использование симметричной полосковой линии и достигнутая добротность для ненагруженного резонатора позволило реализовать локальное измерение диэлектрических параметров и влажности объекта с высокой точностью.

Разработанный датчик обладает следующими характеристиками:

1. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости проводится в диапазоне от 2370 до 2450 МГц;
2. Область контроля составляет 15-20 мм;
3. Погрешность измерения диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ составляют 3-5% и тангенса угла диэлектрических потерь $\Delta\text{tg}\delta$ составляет 5-10% для куриного помета и $\Delta\epsilon=5-10\%$ и $\Delta\text{tg}\delta=10-15\%$ для конского навоза;

Погрешности измерения влажности: 3% для куриного помета и 5% для конского навоза.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СВЧ-УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА И КОНСКОГО НАВОЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЕНСОРНОЙ СЕТИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ

Переработка органических отходов животноводства, изготовление высокого качества различных удобрений, кормов или топливных брикетов из птичьего помета и конского навоза, ускорение процессов, требуют усовершенствование старых и разработку новых технологий с возможностью полных автоматизированных технологических процессов, с применением высокотехнологичного оборудования контроля и управления, не требующего присутствия обслуживающего персонала. Вместе с этим существует целый ряд нерешенных проблем: отсутствие энергоэффективных и быстрых технологических решений обработки органических отходов животноводства; отсутствие прогнозирования технологических параметров птичьего помета и конского навоза на большинстве стадий обработки; принимаемые меры по обеспечению экологической безопасности либо экономически невыгодны, либо малоэффективны [76].

4.1 Структурная схема адаптивной системы управления работой СВЧ установки

На рис. 4.1 обобщенная структурная схема адаптивной системы управления СВЧ установкой с включенной в ее структуру многосенсорной системой контроля температуры и влажности обрабатываемой среды, состоящая из [78-79, 81]:

1. Микроволновую камеру открытого или закрытого типа, выполненной в виде волновода различной формы;
2. Устройство излучателей электромагнитного поля, которое может быть выполнено за счет использования систем излучателей различного типа, таких как щелевые, рупорные и т.д.;
3. Источник питания камеры микроволновой обработки;
4. Устройство измерения диэлектрических свойств и температуры птичьего помета и конского навоза;
5. Блок математического моделирования, в котором выполняется расчет параметров диэлектрика по выбранной математической модели и измеренным значениям параметров диэлектрика, параметрам камеры СВЧ нагрева и параметрам электромагнитного поля);
6. Блок корректировки параметров математической модели на основе полученных данных с блока 4.

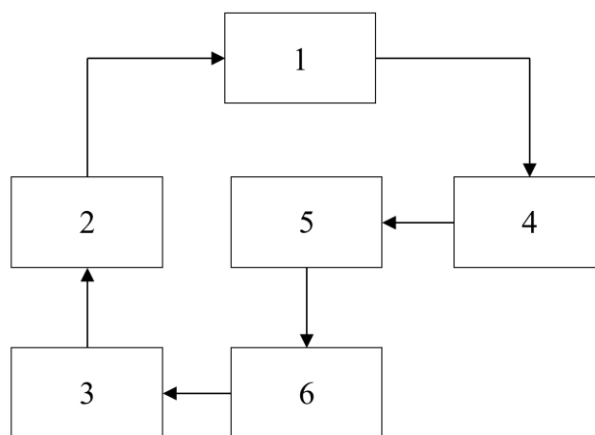


Рис. 4.1 – Структурная схема адаптивной системы управления работой СВЧ установки

В настоящее время средства автоматики и управления легко доступны и надежны, а также имеют низкую стоимость. Главная трудность разработки систем управления заключается в том, что такие параметры диэлектрика как диэлектрическая проницаемость, коэффициент теплопроводности, коэффициент затухания, равномерность тепловыделения и т.д., зависят от температуры и влагосодержания обрабатываемого объекта. Поэтому контроль изменения температуры и влагосодержания, а в дальнейшем автоматическая подстройка является главной задачей СВЧ комплекса для получения качественной продукции [79].

4.2. Конструкция предлагаемой СВЧ-конвейерной установки для обработки птичьего помета и конского навоза

На рис. 4.2 изображена структурная схема конвейерной установки для СВЧ обработки птичьего помета и навоза с адаптивной системой контроля и управления процессом

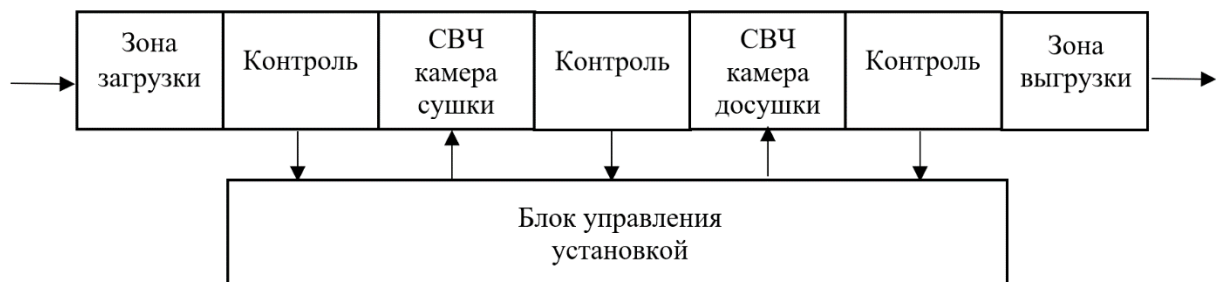


Рис.4.2 – Структурная схема конвейерной установки для СВЧ обработки птичьего помета и навоза с адаптивной системой контроля и управления процессом

В зону загрузки 1 подается измельченный и перемешанный до состояния однородности птичий помет и навоз; в зоне контроля 2 системой датчиков измеряются значения влажности и температуры птичьего помета и навоза, и, на основе полученных данных, осуществляется расчет температуры диэлектрика по выбранной математической модели и измеренным значениям

параметров диэлектрика, параметрам камеры СВЧ нагрева и параметрам электромагнитного поля; в зоне 3 происходит СВЧ обработка птичьего помета или навоза [81]. Далее процессы контроля и обработки повторяются. После второй камеры СВЧ сушки производится выходной контроль параметров объекта обработки.

На рис. 4.3 представлен алгоритм контроля и управления СВЧ установкой для обработки птичьего помета и навоза.

Шаг 1. Загрузка органических отходов в СВЧ установку,

Шаг 2. Измерение начальных значений комплексной диэлектрической проницаемости ε , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и температуры T_0 птичьего помета и навоза [15],

Шаг 3. Вычисление влажности $\varphi(\varepsilon)$,

Шаг 4. Если полученное значение влажности $\varphi(\varepsilon)$ выполняет требуемое условие ($\varphi(\varepsilon) \approx 10 - 15\%$), в этом случае обрабатываемый материал больше не подвергается нагреву. Если полученное значение не выполняет условие – Шаг 5,

Шаг 5. Если полученное значение влажности $\varphi(\varepsilon)$ выполняет требуемое условие $\varphi(\varepsilon) < 10 - 15\%$, в этом случае в обрабатываемом материале повышается влажность системой увлажнения. Если полученное значение не выполняет условие – Шаг 6,

Шаг 6. Математическое моделирование процесса обработки,

Шаг 7. СВЧ-обработка,

Шаг 8. Повторное измерение. Шаг 2.

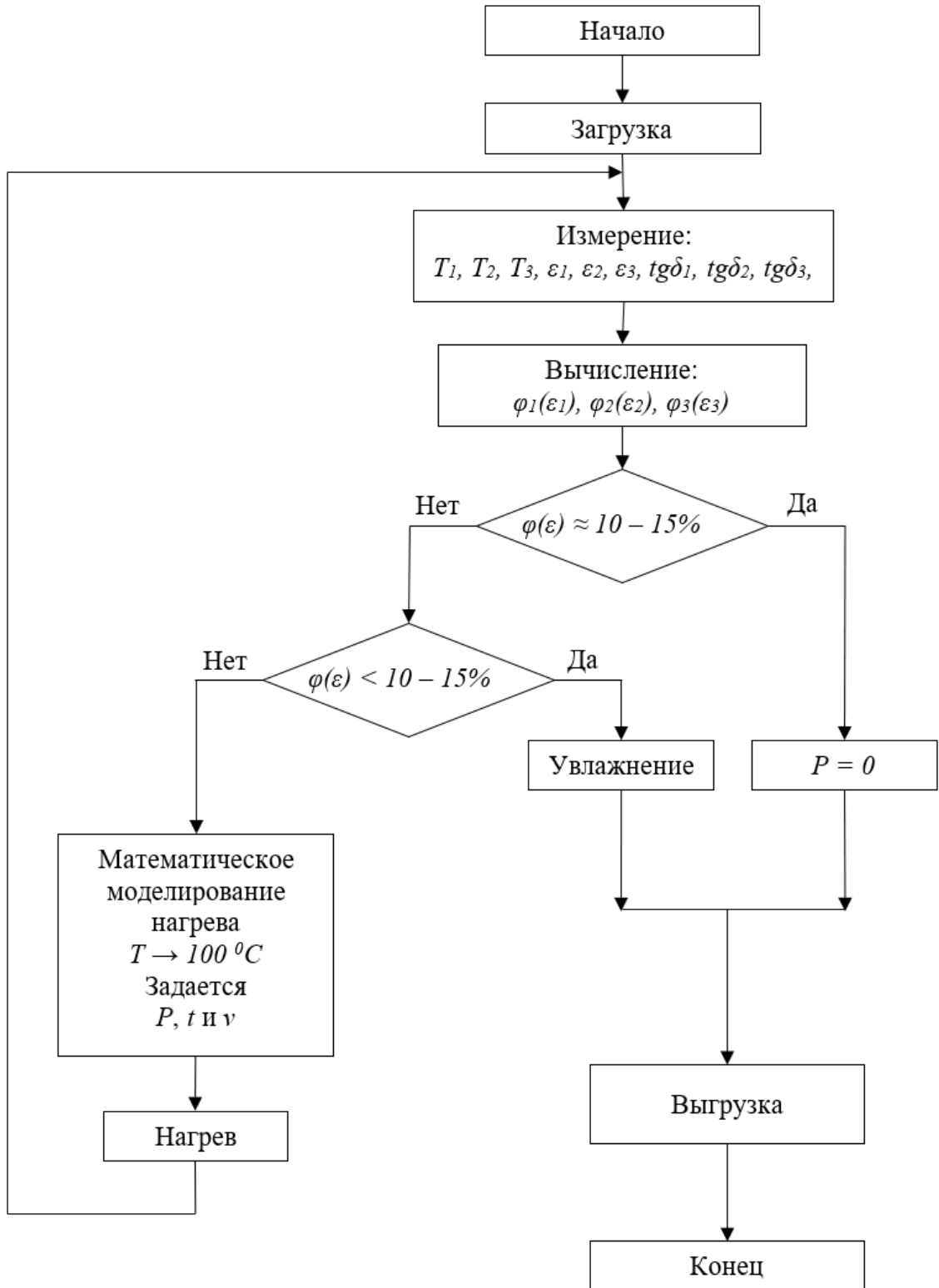


Рис. 4.3 – Алгоритм контроля и управления СВЧ установкой для обработки птичьего помета и конского навоза

4.3 Разработка камеры СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза

Основной задачей при проектировании СВЧ камеры для обработки являлась равномерность нагрева птичьего помета и конского навоза. разработана шестирупорная излучающая система, рассчитанная на частоту 2,45 ГГц (Рис. 4.4). Шесть рупоров возбуждаются тремя волноводами, каждый из которых подключается к отдельному СВЧ генератору. Волноводы настроены и согласованы положением короткозамкнутой стенки и расположением точек возбуждения рупоров. Результаты моделирования коэффициента отражения от возбуждающих волноводов и коэффициента развязки между излучателями представлены на рис. 4.5 На частоте 2,45 ГГц коэффициент отражения не больше -10 дБ и коэффициент развязки между излучателями не больше -30 дБ, что приемлемо для работы магнетронов промышленного применения [69].

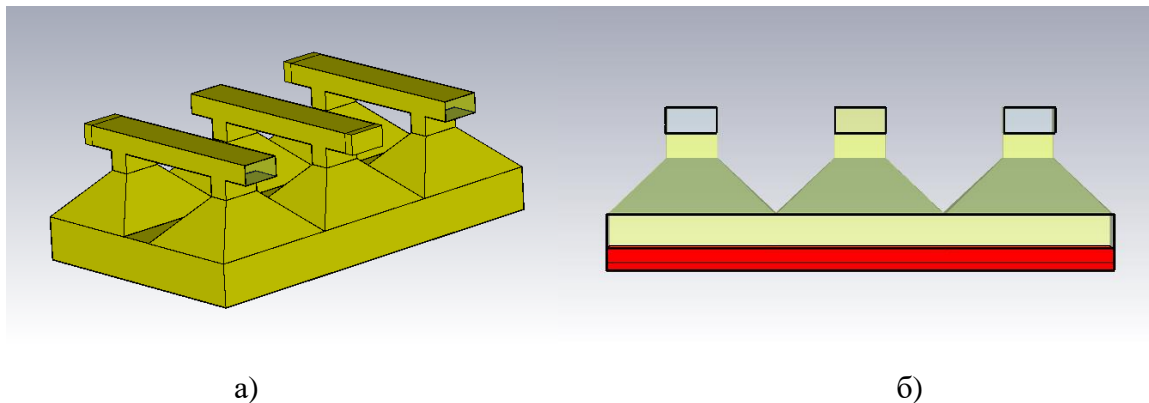
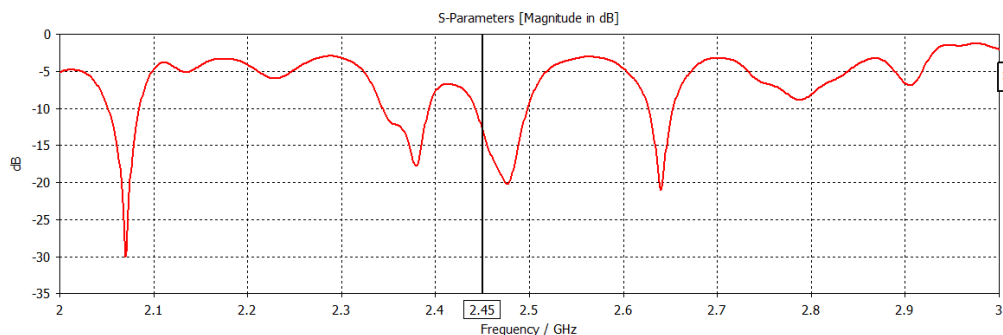
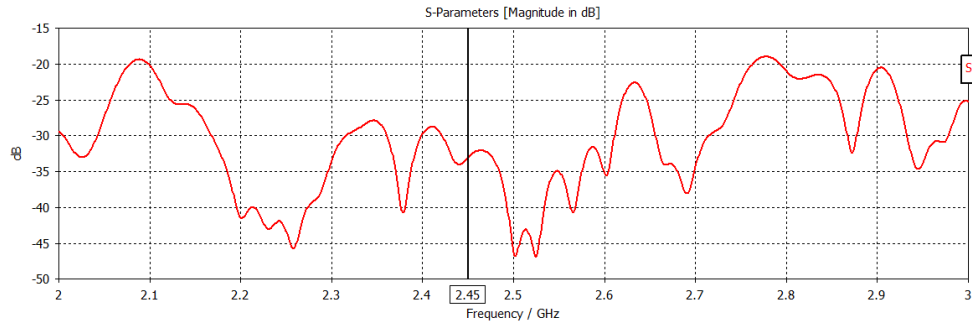


Рис. 4.4 – Внешний вид СВЧ камеры (а) и вид в разрезе с нагреваемым объектом (б) [69]



а)



б)

Рис. 4.5 – Коэффициент отражения излучателей (а) и коэффициент развязки между излучателями (б) на частоте 2,45 ГГц [69]

На рис. 4.6 показано распределение плотности мощности потерь в объекте нагрева, расположенного в СВЧ камере обработки. В качестве объекта нагрева моделировался материал с электромагнитными параметрами, характерными для куриного помета с влажностью 70%. Из результатов моделирования можно наблюдать неравномерность нагрева по толщине слоя, что говорит о необходимости контроля диэлектрических свойств объекта нагрева в процессе обработки [69].

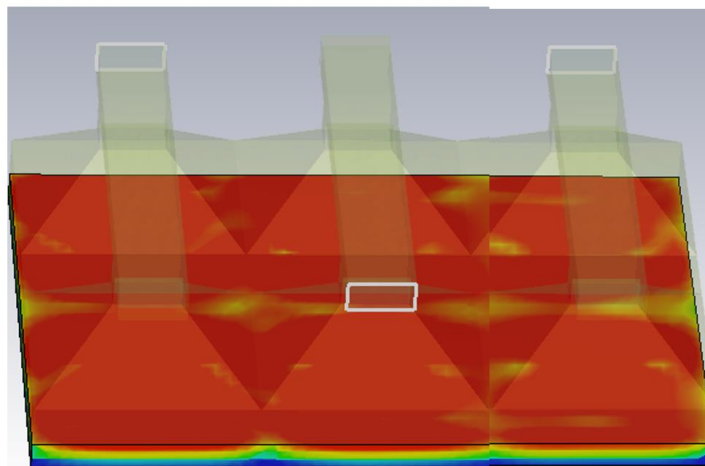
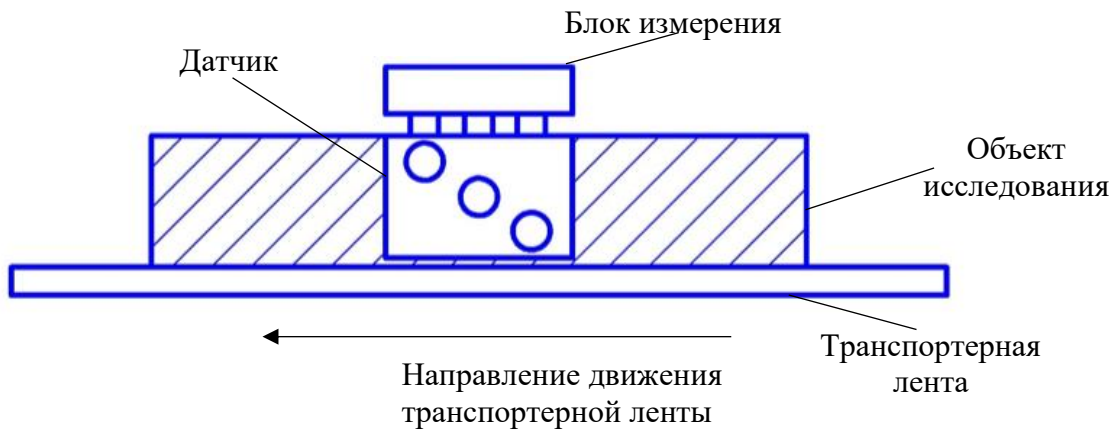


Рис. 4.6 – Распределение плотности мощности потерь в объекте нагрева

4.4 Разработка системы измерения влажности и температуры птичьего помета и навоза в процессе СВЧ обработки

В третьей главе диссертационной работы разработан резонансный кольцевой датчик на основе симметричной полосковой линии.

Предлагается использовать данный датчик для определения температуры и влажности объекта в процессе СВЧ обработки с возможностью моментального формирования сигнала обратной связи для системы управления. На рис.4.7 изображен многосенсорный датчик влажности и температуры, установленный вертикально в исследуемом объекте и измеряющий комплексную диэлектрическую проницаемость с последующим вычислением значения влажности по данным, полученным во второй главе. Температура измеряется термоэлектрическим методом с помощью термопар, расположенных на обратной стороне резонансного планарно-кольцевого датчика.



а)

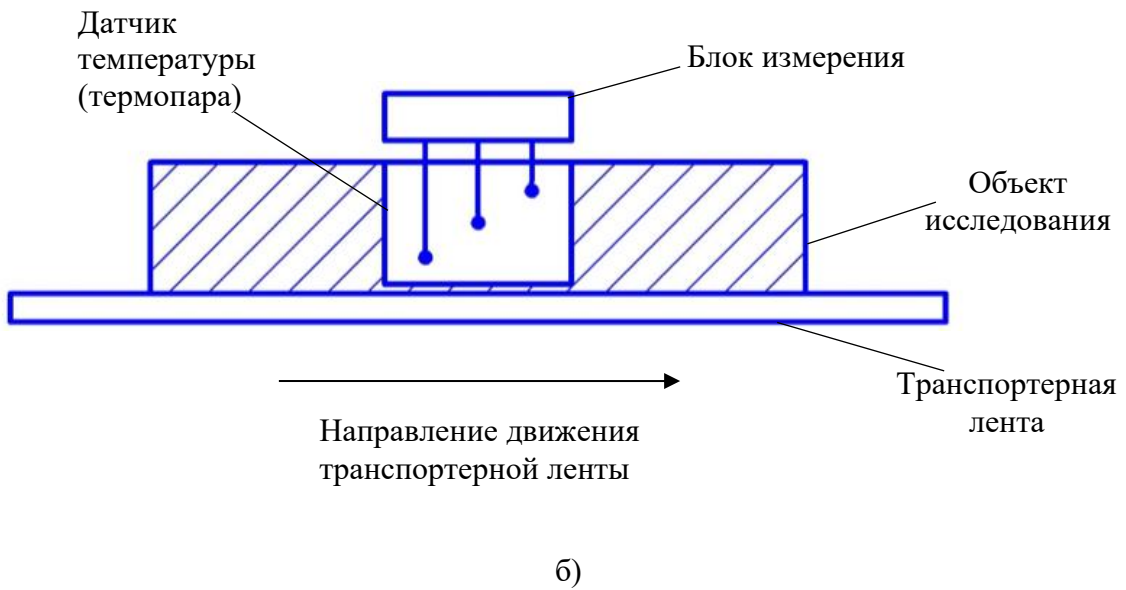


Рис.4.7 –Многосенсорный датчик влажности и температуры (термопара), установленный вертикально в исследуемом объекте

На рис. 4.8. изображен вариант многосенсорного датчика влажности и волоконно оптического датчика (ВОД) температуры.

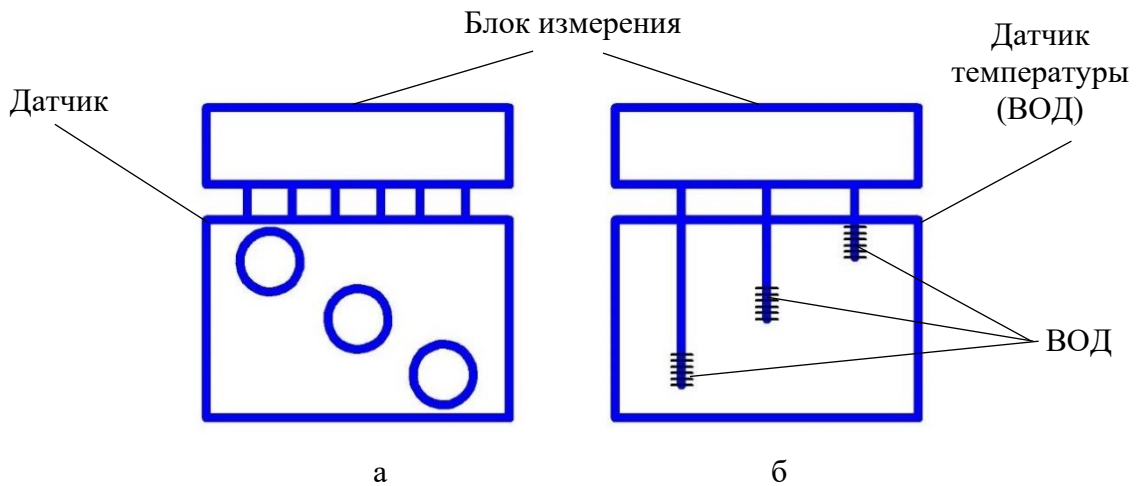


Рис. 4.8 – Многосенсорный датчик влажности и температуры (ВОД).

На рис. 4.9 изображена структурная схема многосенсорной системы контроля влажности и температуры.

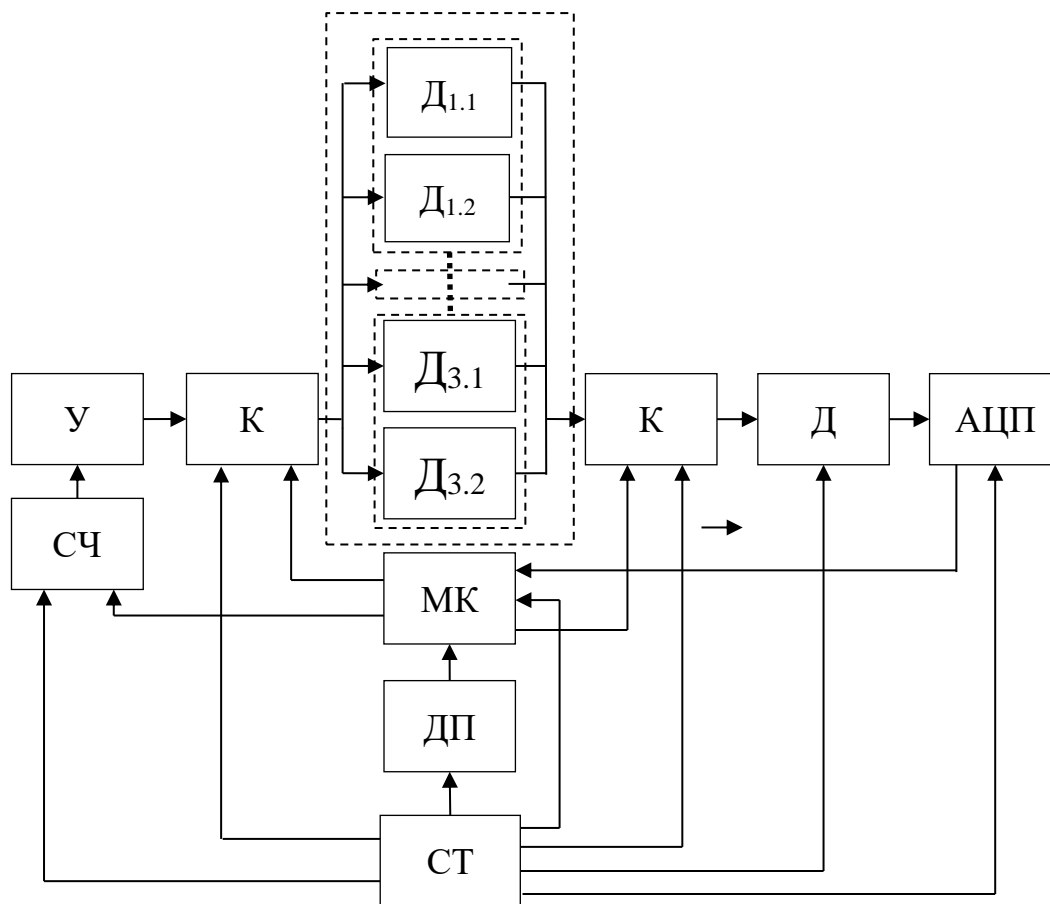


Рис. 4.9 – Структурная схема адаптивной системы управления СВЧ технологической линии

СТ – стабилизатор, МК-микроконтроллер, СЧ – синтезатор частоты, У – усилитель, К – ключ, $Д_{1.1}$ – резонансный кольцевой датчик на основе симметричной полосковой линии, $Д_{1.2}$ – датчик температуры, Д – детектор, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ДП – детектор перехода через ноль.

В качестве защитного покрытия наибольшее распространение получили полисилоксаны - кремнийорганические полимеры, основой которых является цепь из чередующихся атомов кремния и кислорода. Диэлектрические характеристики: тангенс угла диэлектрических потерь $(1-2)10^{-3}$, диэлектрическая проницаемость 3–3,5. При толщине слоя 10 мкм данное покрытие не влияет на точность измерения [22, 89].

4.4.1 Конструкция секции обработки и контроля конвейерной СВЧ установки для обработки птичьего помета и конского навоза

Максимальный достоверный контроль распределения температур в обрабатываемой среде ограниченным числом датчиков заключается в размещении минимально возможного числа датчиков при заданной точности контроля. Под контролем понимается формирование текущего состояния температурного поля в виде непрерывных функций пространственных координат.

В диссертации В.И. Анфиногентова [28] положение точек контроля определялось методом перебора из условия максимума количества информации. Если значения температурного поля в точках контроля распределены по нормальному закону, то количество информации, содержащееся в этих значениях пропорционально определителю корреляционной матрицы этих значений. Однако, значение определителя корреляционной матрицы увеличивается при увеличении диагональных элементов матрицы и уменьшении по модулю недиагональных элементов матрицы. Это обстоятельство может быть использовано для построения итерационного алгоритма, суть которого состоит в определении координат точек контроля в последовательном дополнении имеющейся совокупности точек контроля новой точкой контроля, положение которой соответствует максимуму нормы вектора.

Нельзя гарантировать, что определенной таким образом совокупности контрольных точек соответствует максимальное значение определителя корреляционной матрицей значений случайного поля в точках контроля, однако предложенный алгоритм определения координат точек контроля способствует этому, уменьшая по модулю значения недиагональных элементов корреляционной матрицы по сравнению с диагональными элементами [28].

На рис. 4.10 Схематический вид конструкции конвейерной установки по обработке птичьего помета и конского навоза со встроенными СВЧ камерой и системой контроля.

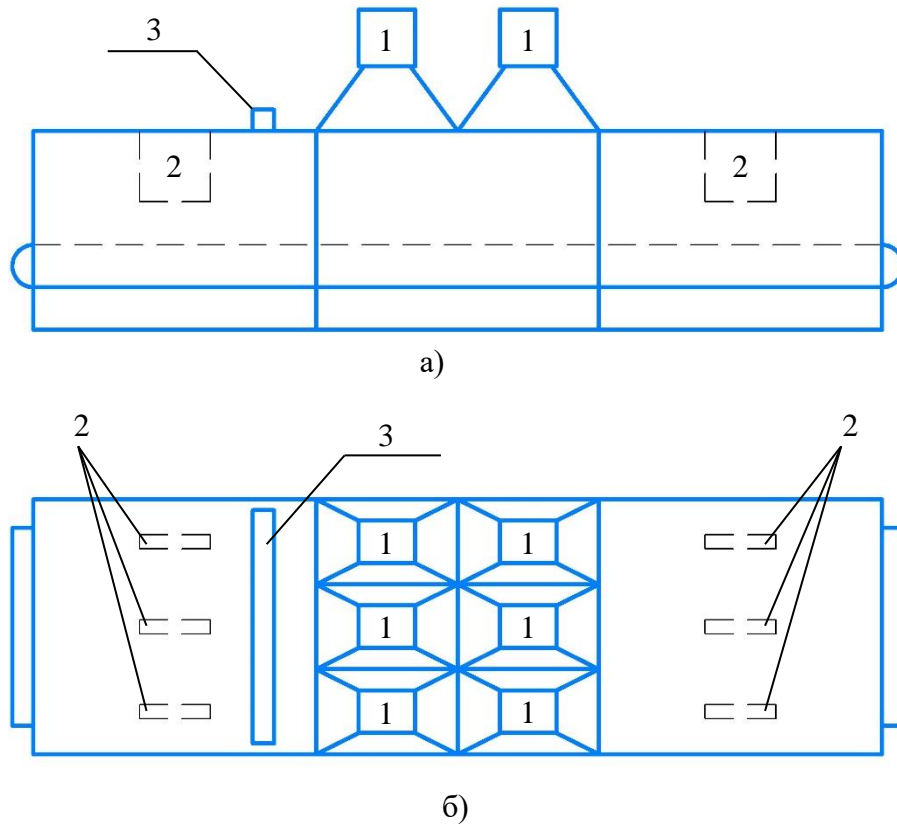


Рис. 4.10 – Схематический вид секций СВЧ-обработки и контроля:

а) вид сбоку, б) вид сверху

- 1 – Источник СВЧ энергии – генератор,
- 2 – Резонансные датчики контроля влажности и температуры,
- 3 – СВЧ-фильтр и вентиляционная система.

На рис. 4.11 изображен схематичный вид конвейерной транспортерной ленты с расположением датчиков контроля влажности и температуры. Транспортерная лента и валы выполнены из радиопрозрачного материала. Данная транспортерная лента имеет модульную конструкцию (на шарнирах) и три желоба для предотвращения вытекания обрабатываемой среды в случае высокого содержания влаги.

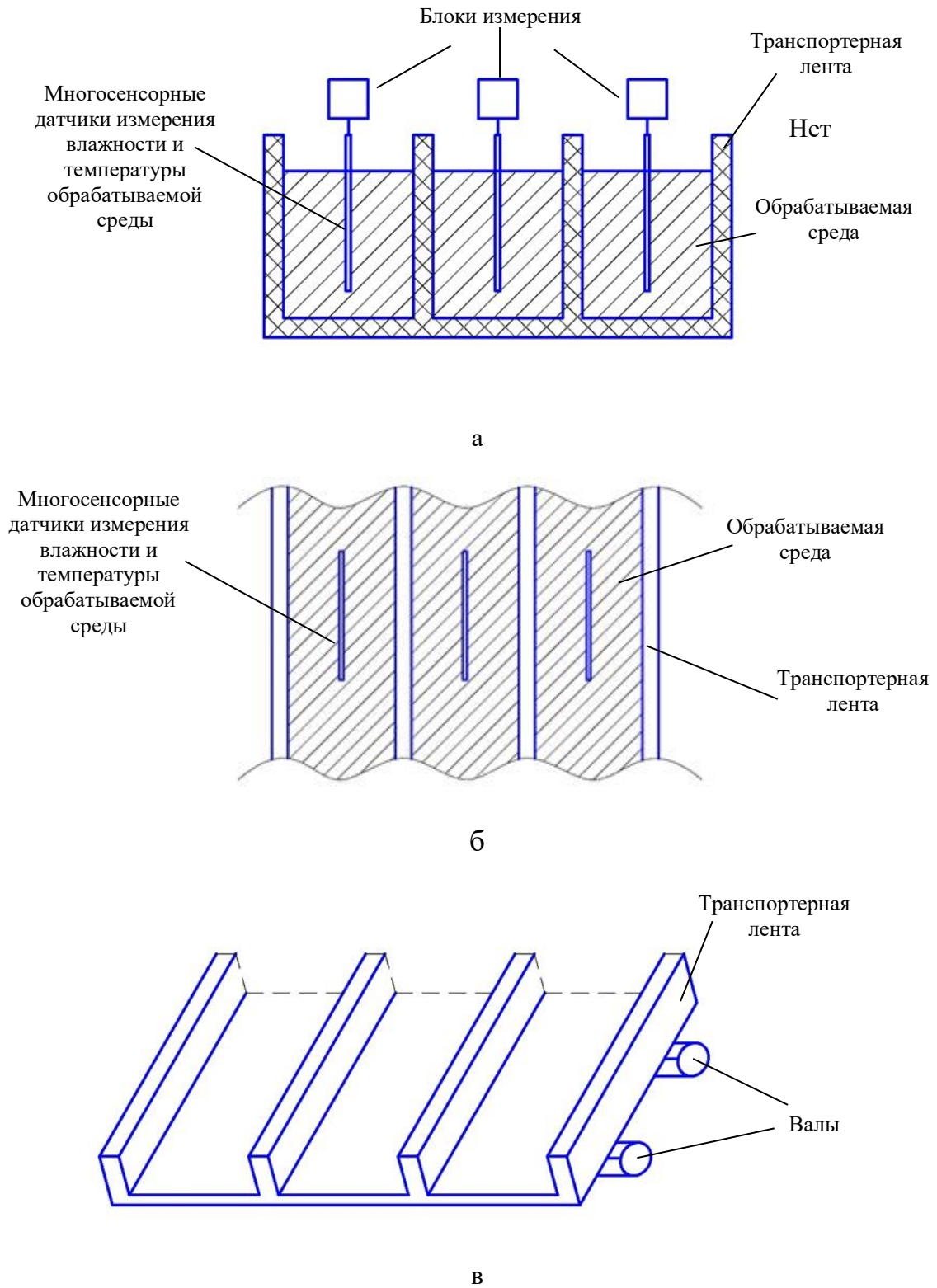


Рис. 4.11 – Конструкция транспортерной ленты

4.4.2 Конвейерная СВЧ-установка по обработке птичьего помета и конского навоза

На рис. 4.12 представлен схематический вид конструкции конвейерной установки по обработке птичьего помета и конского навоза со встроенными СВЧ камерой и системой контроля.

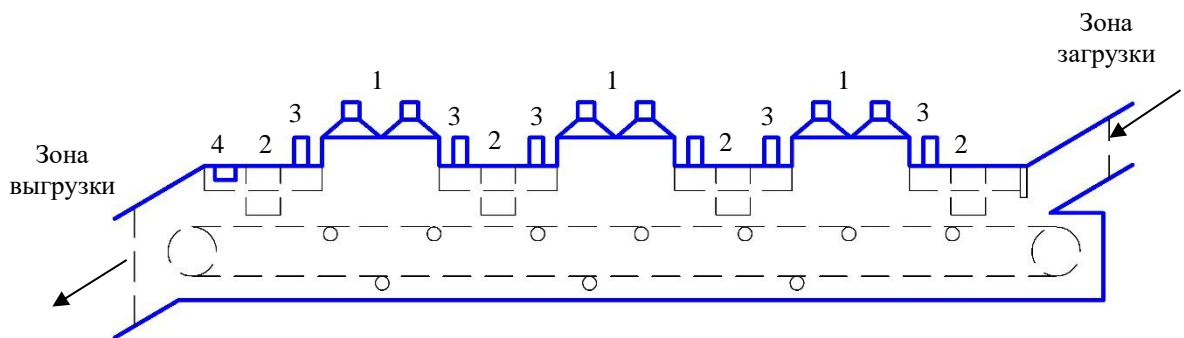


Рис. 4.12 – Схематический вид конструкции конвейерной установки по обработке птичьего помета и конского навоза со встроенными СВЧ камерой и системой контроля

1. Зона СВЧ обработки,
2. Зона измерения комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь, температуры,
3. СВЧ-фильтры и встроенная система удаления испаряющейся влаги (вытяжка),
4. Система увлажнения.

Длина и ширина одной секции 600 мм и 1000 мм, соответственно. Ширина транспортерной ленты 900 мм. Расстояние от зоны загрузки до зоны выгрузки 4 м. Скорость движения ленты 0,0033 м/с (3,3 мм/с). Время обработки от загрузки до выгрузки 20 мин. При толщине слоя обрабатываемой среды 80 мм и влажности 70 % производительность конвейерной СВЧ-установки 0,9 м³/час (\approx 800 кг/ч).

4.5 Адаптивная система. Нейросетевая модель

На рис. 4.13 изображена структурная схема адаптивной системы управления СВЧ технологической линии обработки органических отходов животноводства. Центральное место в схеме занимает подсистема автоматического управления (ПАУ), состоящая из контроллера управления и блока математической обработки с моделью технологического процесса. ПАУ формирует набор управляющих воздействий (УВ), которые состоят из сигналов управления для подсистемы излучения (ПИ) и дополнительных управляющих воздействий.

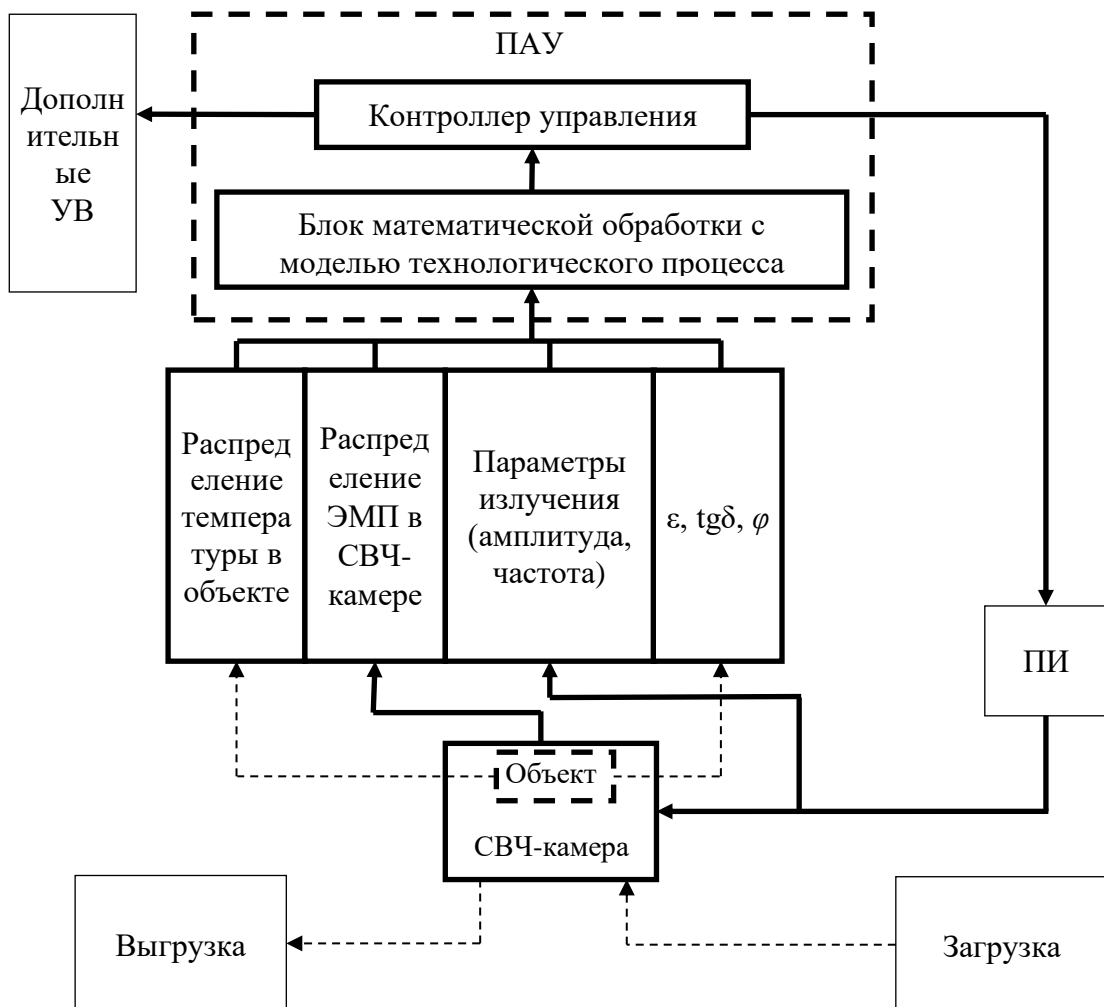


Рис. 4.13 – Структурная схема адаптивной системы управления СВЧ технологической линии

Блок математической обработки с моделью технологического процесса выполняет функцию определения величин управляющих воздействий для технологической линии СВЧ обработки, с учетом измеренных входных и текущих параметров процесса, для обеспечения заданных критериев обработки или требуемых выходных параметров процесса. В качестве последних могут выступать: средняя влажность продукта на выходе установки, равномерность температуры по объекту на выходе секции СВЧ сушки, заданное значение температуры в объекте на выходе секции СВЧ сушки, минимальные время обработки и энергозатраты. В качестве управляющих воздействий для ПИ служат мощность СВЧ генераторов и время работы СВЧ генераторов, к дополнительным УВ относятся скорость движения транспортной ленты, включение и выключение впрыска влажного воздуха, включение и выключение вытяжки. Входными и текущими параметрами процесса выступают начальная влажность и температура объекта, диэлектрическая проницаемость, влажность и температура в локальных точках объекта, определенные в секциях контроля.

Блок математической обработки с моделью технологического процесса построен на основе нейросетевой модели, обученной на основе результатов математического моделирования СВЧ нагрева диэлектрика, разработанной во второй главе. Обучающая выборка генерируется при различных комбинациях диэлектрических параметров и температуры трех слоев плоскостойкого диэлектрика.

Назначение нейронной сети заключается в выработке значений управляющих воздействий, обеспечивающих заданные требования и условия, используя значения входных и текущих параметров процесса. По определению нейронная сеть должна решать задачу оптимизации. Оптимизатор на нейронной сети предлагается построить следующим образом: генерация обучающих векторов производится с помощью математической модели СВЧ нагрева плоскостойкого диэлектрика с заданными параметрами

и несколькими независимыми переменными, результаты моделирования которой используются в генетическом алгоритме, позволяющем найти оптимальный набор независимых переменных для обеспечения заданных критериев оптимизации. Схема для формирования обучающей выборки показана на рис. 4.14. На вход математической модели подаются два набора параметров модели. Один из них изменяется для формирования различных обучающих векторов, второй – не изменяется. В первый набор входят начальные диэлектрические проницаемости и температуры слоев, во второй – количество слоев, толщина слоев, расстояние до короткозамкнутой стенки, термодинамические параметры объекта или их зависимости от температуры, а также температурные зависимости диэлектрических проницаемостей и зависимости влажности от диэлектрической проницаемости и температуры [105]. Помимо параметров математической модели выбираются независимые переменные, например, мощность СВЧ генератора, время нагрева и скорость передвижения ленты.

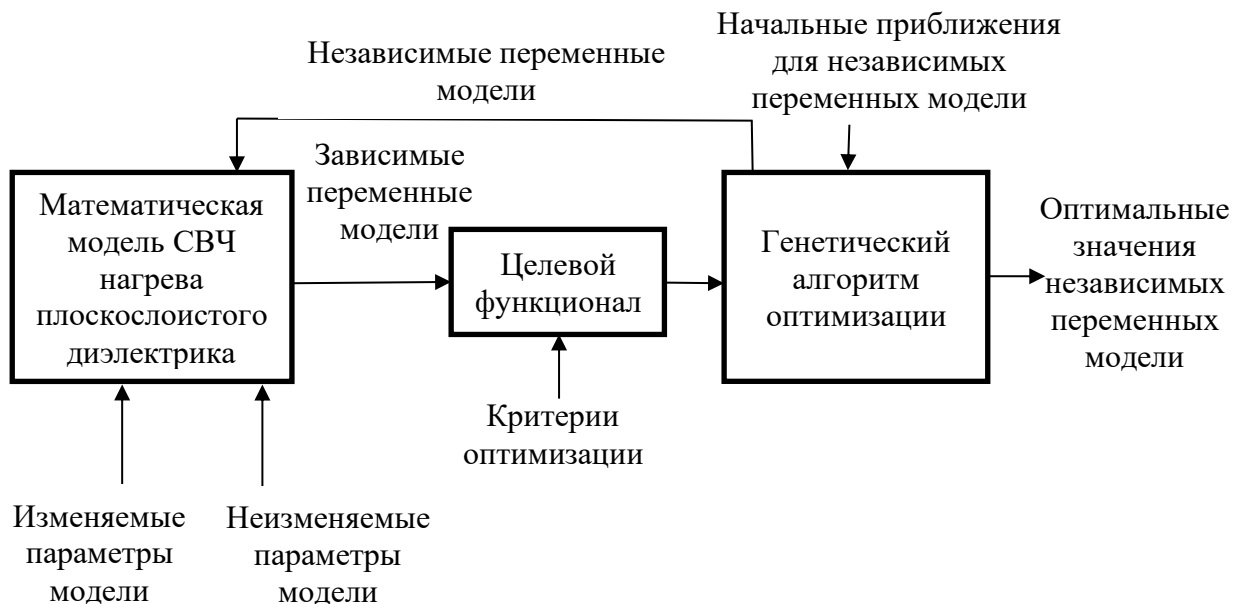


Рис. 4.14 – Формирование обучающей выборки для нейронной сети

На выходе математической модели СВЧ нагрева плоскостойкого диэлектрика получаются значения зависимых переменных, которыми выступают средняя температура и среднее значение влажности в каждом слое в заданный момент времени. Из зависимых переменных в соответствии с критериями оптимизации формируется целевой функционал, значение которого будет минимизироваться с помощью генетического алгоритма оптимизации. Целевой функционал представляет собой взвешенную сумму минимизируемых функций от зависимых переменных модели.

Генетический алгоритм относится к стохастическим методам глобальной оптимизации [90,91], который используется в данной схеме для минимизации значения целевого функционала при заданных критериях оптимизации и параметров математической модели. Формирование обучающей выборки происходит следующим образом: выбирается комбинация изменяемых параметров модели, которые будут в дальнейшем выступать в качестве входных сигналов нейронной сети, и согласно сформированному целевому функционалу с помощью генетического алгоритма производится поиск оптимальных значений независимых переменных, которые в дальнейшем будут выступать в качестве выходных значений нейронной сети. Далее операция повторяется заданное количество раз для других комбинаций изменяемых параметров. Значения неизменяемых параметров для всех обучающих векторов остается одинаковым.

Образованные на этапе генерации обучающей выборки векторы входных и соответствующих выходных параметров используются для обучения искусственной нейронной сети. Нейронная сеть выполняет задачу многомерной аппроксимации для определения оптимальных значений управляющих воздействий при заданных входных и текущих параметрах процесса. Пример построения нейронной сети показан на рис. 4.15.

Нейронная сеть состоит из 12 входных нейронов, на которые подаются числовые значения диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла

диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, влажности и температуры для трех слоев объекта обработки, полученные в секции контроля установки [15]. Помимо входного слоя имеется один скрытый слой, количество нейронов в котором подбирается на этапе симуляции сети, и выходной слой, состоящий из трех нейронов, на выходах которых формируются управляющие воздействия: мощность генератора СВЧ, время работы генератора СВЧ и скорость движения транспортной ленты.

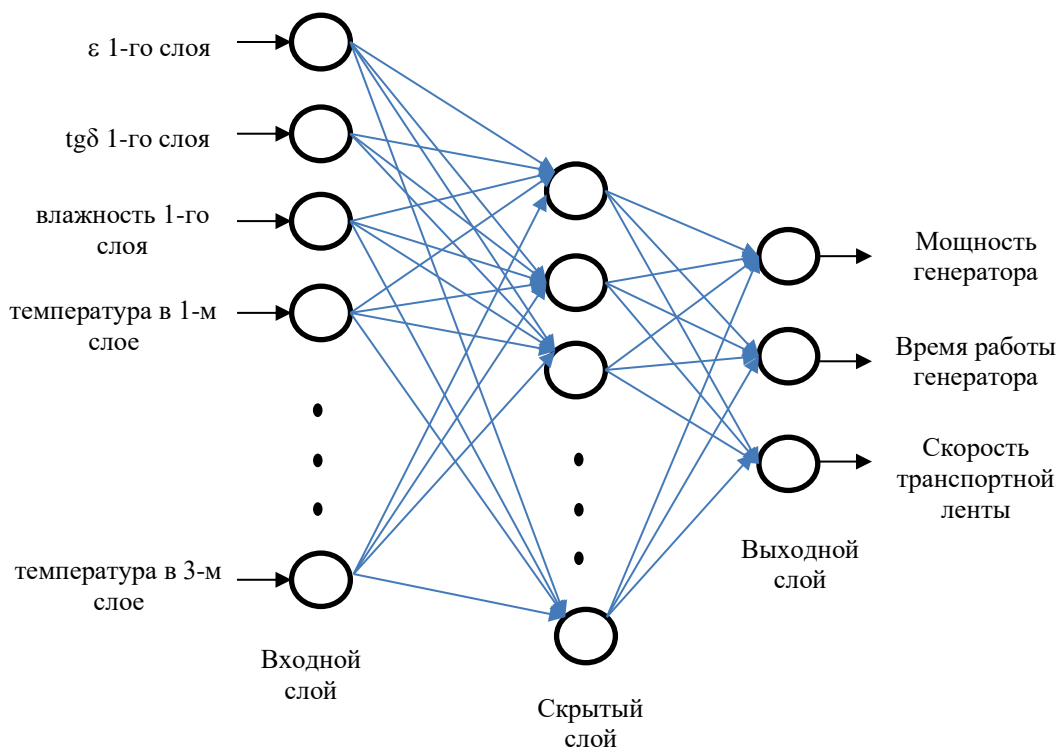


Рис. 4.15 – Нейронная сеть для определения управляющих воздействий СВЧ технологической линии обработки органических отходов животноводства

Нейронная сеть обучается на наборе векторов, полученных методом математического моделирования СВЧ нагрева, с помощью метода обратного распространения ошибки [92]. Применение нейронной сети в схеме ПАУ позволяет сократить вычислительные и временные затраты на расчет оптимальных значений управляющих воздействий за счет того, что основные вычислительные операции проводятся на этапе формирования обучающей выборки и обучения сети, а не во время процесса обработки. Данный факт

позволяет использовать предложенный подход в реальном времени. Еще одним достоинством применения нейронной сети в качестве оптимизатора является возможность уточнения модели на результатах опытных исследований модели, в этом случае возможно добавление к управляющим воздействиям таких процессов как управление вытяжкой, впрыском влажного воздуха, дополнительными источниками нагрева, например, горячим воздухом и др.

4.6 Система сквозного цифрового проектирования. Цифровой двойник

Четвертая промышленная революция (Industry 4.0) – переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени и в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия [83].

Система сквозного цифрового проектирования может применяться во множествах отраслях, поэтому ее называют сквозным. К примерам отраслей можно отнести образование, медицину, строительство и т.д.

Уменьшение времени периода от разработки до конечного продукта, является главной задачей на сегодняшний день, поскольку это позволит в значительной степени сократить количество неточностей при изготовлении и соответственно, на порядок уменьшит финансовые и производственные затраты. Системы сквозного цифрового проектирования включают в себя системы компьютерного моделирования, а также обладает возможностью быстрой реализации конструкторских и технологических решений. Принцип работы системы сквозного проектирования заключается в применении 3D моделей на всех этапах технологической подготовки, благодаря чему появляется возможность полностью избавиться от появления всевозможных ошибок. Применение системы сквозного цифрового проектирования

позволяет повысить качество конечного продукта, уменьшить его стоимость [84].

На сегодняшний день правительство РФ активно поддерживает развитие сквозных технологий в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика РФ», которое направлено на повышение технологического развития отечественных разработок, а также на обеспечение способности конкурировать с существующими компаниями на мировом рынке [85].

В рамках программы "Цифровая экономика Российской Федерации": был представлен перечень основных сквозных цифровых технологий [86, 108]:

1. Большие данные;
2. Нейротехнологии и искусственный интеллект;
3. Системы распределенного реестра;
4. Квантовые технологии;
5. Новые производственные технологии;
6. Промышленный интернет;
7. Компоненты робототехники и сенсорики;
8. Технологии беспроводной связи;
9. Технологии виртуальной и дополненной реальностей.

Новые производственные технологии подразделяются на цифровое проектирование и управление жизненным циклом изделия, технологии "умного" производства и технологии манипулирования [87].

Технология «Цифровой двойник» представляет собой совокупность сложных математических моделей, которые максимально соответствуют реальным объектам и системам с точностью $\pm 5\%$. В данной технологии объекты и системы описываются 3д нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Многоуровневая

матрица целевых показателей является обязательным элементом разработки и применения цифровых двойников [87, 88].

Непрерывная переработка отходов входит в приоритетные отрасли для внедрения.

Используя преимущества «цифрового двойника» в переработке органических отходов животноводства в топливные брикеты, можно обнаружить дефект дизайна в виртуальном мире и быстро внести изменения, которые улучшат дизайн, избегая проверки и тестирования. Затем проверенный дизайн продукта передаётся в виртуальную фабрику для производства. От ввода сырья до выпуска готовой продукции весь процесс производства управляется и оптимизируется с помощью «цифрового двойника». Виртуальный цех или фабрика включают модели операторов, материалов, оборудования, инструментов и т.д. Прежде чем приступить к производству продукции, рассчитываются производственные ресурсы и мощности, и разрабатывается производственный план, чтобы предопределить производственный процесс. Виртуальная фабрика моделирует и оценивает различные производственные стратегии до тех пор, пока не будет определена одна удовлетворительная стратегия производства. На этапе фактического производства, мониторинг и корректировка производственного процесса в реальном времени осуществляются посредством виртуально-физического взаимодействия. Виртуальные модели постоянно перестраиваются на основе данных, полученных из физического мира. Таким образом, возникшие проблемы в реальном мире могут быть заранее предопределены и с помощью симуляции будет найдено оптимальное решение в виртуальном мире. Производственный процесс настраивается для достижения оптимального производства в соответствии с моделированием в виртуальном мире. «Цифровой двойник» используется для постоянного мониторинга состояния реального физического продукта [83].

На рис. 4.16 показана схема цепочки создания продукта, дополненная диаграммой процесса разработки слоя диагностического мониторинга с одновременной ее интеграцией в производственную цепь [106].



Рис. 4.16 – Сквозная система проектирования системы производства с параллельной разработкой слоя диагностики мониторинга

CPS – процессор системы связи, НК - неразрушающий контроль NDT (Non-Destructive Testing), СМ – средства мониторинга.

Сообразно предложенной схеме на этапе разработки продукта должна быть создана его физическая цифровая модель (близнец) и определены ее контролируемые параметры [106].

На основе этой модели определяются необходимые методы и средства тестирования и создается цифровая модель самой системы управления, которая учитывает характеристики используемых измерительных и испытательных инструментов (включая интеллектуальные измерительные датчики). Воплощением такой модели должна стать интеллектуальная система неразрушающего контроля, интегрируемая непосредственно в производственную линию (киберфизическая система) [106].

В конце цепочки создания продукта должна представлять собой систему самодиагностики на основе датчиков с функциями самоконтроля и самокалибровки [106].

Рассмотренная технология контроля производства является общей для всех средств и методов измерения и тестирования, которые реализуют общие принципы построения современного «умного» производства [106].

4.7 Выводы по главе

1. Разработана структурная схема адаптивной системы управления работы СВЧ установки. Главной задачей является автоматическая подстройка параметров электродинамического воздействия на обрабатываемы среды, основываясь на контроле изменений температуры и влагосодержания.

2. Разработана структурная схема системы СВЧ обработки органических отходов и сформулирован пошаговый алгоритм работы системы применительно к конвейерному типу СВЧ-установки.

3. Проведено компьютерное моделирование конвейерной секции СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза с равномерным распределением плотности мощности потерь в объекте нагрева.

4. Проведена локализация датчиков в конвейерной секции контроля СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза из условия получения максимума количества информации в этих точках. Показан схематичный вид конвейерной транспортной ленты с расположением датчиков контроля влажности и температуры. Предложена конструкция конвейерной СВЧ-установки для обработки органических отходов животноводства, включающей разработанную СВЧ-камеру для обработки и объединенный датчик контроля влажности и температуры органических отходов животноводства. Рассчитанная производительность установки при влажности обрабатываемой среды 70% равна 0,9 м³/час (\approx 800 кг/ч).

5. Разработана система адаптивного контроля и управления процессами обработки органических отходов животноводства, использующая

нейросетевые алгоритмы для определения управляющих воздействий СВЧ технологической линии обработки органических отходов животноводства.

б. Даны рекомендации по использованию технологии сквозного цифрового проектирования производства, позволяющие полностью смоделировать производственный процесс предложенной системы и оптимизировать технологический процесс производства, что позволит повысить качество выходного продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы достигнута ее основная цель – разработана система контроля температуры и влажности органических отходов птицеводства и коневодства, являющаяся ключевой для контроля качества технологических процессов их СВЧ-обработки, с возможностью организации адаптивного управления их протеканием на основе информации, полученной с СВЧ-датчиков влажности резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений, сгруппированных с волоконно-оптическими датчиками температуры, обладающими свойствами адресности, организованных в единую многосенсорную сеть.

Следует отметить решения более частных задач.

1. Проведен системный анализ характеристик существующих и перспективных технологий обработки и переработки органических отходов птицеводства и коневодства, который позволил определить пути улучшения качества выходной продукции, основанные на использовании энергии ЭМП СВЧ-диапазона, адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия с получением для него информации с волоконно-оптических и СВЧ-датчиков температуры и влажности с улучшенными метрологическими и функциональными характеристиками.

2. На основе полученных результатов экспериментальных измерений вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса

угла диэлектрических потерь птичьего помета и конского навоза на частотах 915 и 2450 МГц разработана одномерная многослойная математическая модель СВЧ нагрева и сушки птичьего помета и конского навоза, позволяющая определить уровень воздействия на них энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом изменяющихся температурной и влажностной зависимости диэлектрических свойств обрабатываемого материала и сформулировать рекомендации для обеспечения наиболее эффективных режимов электродинамического воздействия и адаптивного управления им.

3. Разработаны принципы построения резонансных планарно-кольцевого СВЧ-датчика влажности на основе симметричной полосковой линии, отличающегося от существующих повышенной добротностью, отсутствием физического влияния обрабатываемой среды на погрешность измерений в зоне фидерных линий, и сгруппированных в зоне контроля с волоконно-оптическими датчиками температуры на основе адресных волоконных брэгговских структур, с адресными частотами, лежащими в диапазоне резонансных частот датчиков влажности, что позволяет при синхронном опросе использовать единые принципы сбора и детектирования информации и визуализировать поля распределения температур и влажностей в указанной зоне, с привязкой координат по адресу датчика температуры.

4. На базе разработанных моделей процессов СВЧ-обработки и принципов измерений СВЧ-датчиков влажности и волоконно-оптических датчиков температуры разработана структура многосенсорной системы контроля температуры и влажности, встроенная в адаптивный СВЧ-комплекс для реализации процессов СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства и алгоритмы управления им для достижения высокого качества выходной продукции.

Экспериментально создана конвейерная СВЧ-установка закрытого типа для обработки органических отходов птицеводства и коневодства,

включающая одну зону обработки, состоящую из разработанной СВЧ-камеры и трех сгруппированных датчиков контроля влажности и температуры, для которой сформулирован пошаговый алгоритм работы системы применительно к конвейерному типу СВЧ-установки и алгоритмы адаптивного управления мощностью СВЧ-генераторов.

Исследования показали, что относительная погрешность измерения влажности составила $\pm 3\%$ для куриного помета и $\pm 5\%$ для конского навоза. Относительная погрешность измерения температуры составляет $\pm 1\%$, что обеспечивается физикой работы и структурой адресных волоконно-оптических датчиков. Данные значения удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СВЧ-установкам, обеспечивающим выходную влажность органических отходов производства в 10-15%, достаточную для создания из них топливных брикетов.

Резонансная частота ненагруженного СВЧ-датчика составляет 2,48 ГГц. Сдвиг резонансной частоты при измерении свойств материалов с различным содержанием влаги составляет 70 МГц, что показывает возможность его применения в системе контроля и адаптивных контурах управления процессом конвейерной СВЧ-обработки птичьего помета и конского навоза. Добротность разработанного датчика равна 155, что почти в 3 раза выше, чем у рассмотренного в гл. 3 существующего датчика. Адресные частоты волоконно-оптических датчиков уникальны и лежат в диапазоне 2.9-3 ГГц. Принадлежность резонансных и адресных частот одному частотному диапазону 2.5-3 ГГц, позволили использовать для сбора информации с них общие детекторы и измерительные преобразователи. Рассчитанная производительность разработанной конвейерной установки СВЧ-обработки при начальной влажности обрабатываемой среды 70% равна 0,9 м³/час (≈ 800 кг/ч). Полученные результаты внедрены в научно-исследовательский процесс КНИТУ-КАИ и использованы в рамках работ с ООО «Санитарная экология» по созданию установки для сушки конского навоза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горетов, И.Н. Финансовый механизм управления региональными птицеводческими кластерами: автореферат и дис. д-р. экон. наук: 08.00.10: 2010 / Горетов Игорь Николаевич. – Казань. – 2010. – 330 с.
2. Федоренко, И.Я. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве: учебное пособие / И.Я. Федоренко, В.В. Садов. – Санкт-Петербург: Лань, 2012. – 304 с.
3. Кузнецов, А.Ф. Современные производственные технологии содержания сельскохозяйственных животных: учебное пособие / А.Ф. Кузнецов, Н.А. Михайлов, П.С. Карцев. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 456 с.
4. Переработка помета на птицефабриках –AgroXXI. URL: <https://www.agroxxi.ru/gazeta-zaschita-rastenii/zrast/pererabotka-pometa-na-pticefabrikah.html> (дата обращения: 16.11.2020)
5. Морозов, Г.А. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин, А.Р. Насыбуллин, А.С. Султанов // «Вестник марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы», 2011 – №3(13) – С. 13 – 24.
6. Ларина, О.М. Экспериментальные исследования особенностей пиролитической переработки органических отходов жизнедеятельности в

синтез-газ: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.14.01: 2017 / Ларина Ольга Михайловна. – Казань. – 2017. – 156 с.

7. Брюханов, А.Ю. Утилизация навоза/помета на животноводческих фермах для обеспечения экологической безопасности территории, наземных и подземных водных объектов в Ленинградской области: монография / А.Ю. Брюханов, Д.А. Максимов, Э.В. Васильев, и др. // Изд-во Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. – Санкт-Петербург. – 2012 – С. 237.

8. Букета, В.Я. Изготовление топливных брикетов на основе безотходных технологий/ В.Я. Букета, В.Ю.Русаков // «Инновационные тенденции развития российской науки», Материалы XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, 10-11 апреля 2018 г. 2018 – Ч.1 – С. 109 – 111.

9. Насыбуллин, А.Р. Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.12.07: 2012 / Насыбуллин Айдар Ревкатович. – Казань. – 2012. – 143 с.

10. Лаптева, И.Г. Переработка и использование птичьего помета / И.Г. Лаптева, О.К. Мотовилов // Труды XIII международной научно-практической конференции «Пища. Экология. Качество», 18–19 марта 2016 г. – 2016 –С. 185 – 189.

11. Измерение влажности в потоке. URL: <https://www.pce-instruments.com/f/t/ru/potochnoe-izmerenie-vlazhnosti.htm> (дата обращения: 16.11.2020)

12. Бирюков, К.Н. Способы переработки и утилизации навоза и помета в современных условиях ведения животноводства (научно-производственный анализ) / К.Н. Бирюков // «Вестник российского государственного аграрного заочного университета», 2008 – №5(10) – С. 100 – 101.

13. Лопата, Ф.Ф. Ветеринарно-санитарное состояние навоза различных видов сельскохозяйственных животных: автореферат и дис. канд. ветеринар. наук: 16.00.06: 2008 / Лопата Федор Федорович. – Москва. – 2008. – 183 с.
14. Брюханов, А.Ю. Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: автореферат и дис. д-р техн. наук: 05.20.01: 2016 / Брюханов Александр Юрьевич. – Санкт-Петербург. – 2016. – 440 с.
15. Смирнов, С.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов / С.В. Смирнов, В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Н.Е. Стахова // «Вестник НЦБЖД», 2020 – №3(45) – С. 142 – 149.
16. Саржан, П.К. Параметрический анализ вариантов технологических процессов при производстве печатных плат / П.К. Саржан // Материалы II Всероссийской студенческой конференции «Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России». 2016. С. 80-82.
17. Нефедов, В.Н. Сверхвысокочастотные устройства для высокоэффективной термообработки материалов больших площадей: автореферат и дис. д-р. техн. наук: 05.12.07: 2001 / Нефедов Владимир Николаевич. – Казань. – 2001. – 252 с.
18. Суслин, М.А. Микроволновый контроль авиационных ГСМ: с использованием радиотехнических методов расчета цепей с распределенными параметрами / М.А. Суслин. - Москва: Машиностроение-1, 2006 (Тамбов: ИПЦ Тамбов. гос. техн. ун-та). - 120 с.
19. Решетникова, И.В. Биофизика интенсификации выделения энергии из биомассы / С.Д. Батанов, И.Г. Пospelова, А.В. Прокопьев, Н.А. Алексеева, И.В. Возмищев // «Современные проблемы науки и образования», 2014 – №2 – С. 116 – 123.

20. Федоренко, И.Я. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве: учебное пособие / И. Я. Федоренко, В. В. Садов. — Санкт-Петербург: Лань, 2012. — 304 с.

21. Крапивницкая, Т.О. СВЧ пиролиз торфа: моделирование и экспериментальные результаты / А.А. Богдашов, Д.Л. Ворожцов, М.Ю. Глявин, А.Н. Денисенко, Н.Ю. Песков, Л.Л. Семенычева // «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2018 – Т. 1 – С. 314 – 318.

22. Сапунов, В.В. Совершенствование технологии изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.02.07: 2015 / Сапунов Валерий Викторович. – Ульяновск. – 2015. – 221 с.

23. Тахаув, А.А. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектрика с учетом фазовых переходов: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.13.18: 2011 / Тахаув Айдар Асгатович. – Казань. – 2011. – 127 с.

24. Обзор существующих датчиков влажности материалов URL: <https://www.pce-instruments.com/russia/?action=Contact> (дата обращения: 16.11.2020)

25. Смирнов, С.В. Исследование перспективных методов автоматического контроля влажности сыпучих и кусковых материалов на основе анализа современных промышленных влагомеров / С.В. Смирнов, Аринова Н.В. // Материалы международной молодежной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)», 2019 – Т.5 – С. 529 – 533.

26. Раулов, Д.А. Исследование перспективных методов автоматического контроля влажности сыпучих и кусковых материалов на основе анализа современных промышленных влагомеров / Д.А. Раулов, Аринова Н.В. // «Евразийское научное объединение», 2017 – №12(34) – С. 59 – 62.

27. Гришина, Е.М. Обзор методов физического и математического моделирования СВЧ нагрева / Е.М. Гришина // «Научная дискуссия: инновации в современном мире», 2016 – №5-1(48) – С. 22 – 25.
28. Анфиногентов, В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков: автореферат и дис. д-р. техн. наук: 05.12.07: 2006 / Анфиногентов, Владимир Иванович. – Казань. – 2006. – 340 с.
29. Рикенглаз, Л.Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями / Л.Э. Рикенглаз // Инж. физ. журн., 1974 – Т.27 - №6 – С.1061-1068.
30. Морозов, Г.А. Моделирование СВЧ нагрева слоистых диэлектрических сред. Радиоэлектронные устройства и системы / Г.А. Морозов, Л.И. Пономарев, С.В. Родин // Межвуз. сб., 1996 – С. 117 – 123.
31. Анфиногентов, В.И. Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // «Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева», 2002 – №3 – С. 21 – 22.
32. Некрасов, П.Б. К теории адиабатического нагрева СВЧ полем диэлектрика с коэффициентом затухания, зависящим от температуры / П.Б. Некрасов, П.Э. Рикенглаз // «ЖТФ», 1973 – Т.43 – №4 – С. 694 – 697.
33. Рикенглаз, П.Э. К теории распространения СВЧ электромагнитных полей в диэлектриках с малыми потерями / П.Э. Рикенглаз // «ЖТФ», 1974 – Т.44 – №6 – С. 1125 – 1128.
34. W. C. Chew. Waves and Fields in Inhomogeneous Media. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
35. J. R. Cannon. The One-Dimensional Heat Equation. California: Addison-Wesley, 1984.
36. Даутов, О.Ш. Математические модели процессов микроволновой обработки продуктов сельскохозяйственного производства / О.Ш. Даутов, Г.А. Морозов, Ю.Е. Седельников и др. // «Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева», 1996 – №4.

37. W. Li, M. A. Ebdian, T. L. White, R. G. Grubb, and D. Foster, "Heat and mass transfer—In a contaminated porous concrete slab with variable dielectric properties," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 37, no. 6, pp. 1013-1027, Apr. 1994.

38. Архангельский, Ю.С. СВЧ электротермические установки лучевого типа: Пособие для специалистов СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый; Сарат. гос. техн. ун-т, - Саратов :2000. –С. 122.

39. L. E. Lagos, W. Li, M. A. Ebdian, T. L. White, R. G. Grubb, and D. Foster. "Heat transfer within a concrete slab with a finite microwave heating source," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 38, no. 5, pp. 887-897, Mar. 1995.

40. C. T. Choi and A. Konrad. "Finite element modeling of the RF heating process," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, pp. 4227-4230, Sept. 1991.

41. K. D. Paulsen, D. R. Lynch, and J. W. Strohbehn. "Three dimensional finite boundary and hybrid element solution of the Maxwell equation for lossy dielectric media," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, pp. 682-693.

42. A. Sekkak, L. Pichon, and A. Razeq. "3-D FEM magnetothermal analysis in microwave ovens," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, pp. 3347-3350, Sept. 1994.

43. J. Clemens and C. Saltiel, "Numerical modeling of materials processing in microwave furnaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 39, no. 8, pp. 1665-1675, 1996.

44. M. F. Iskander, R. L. Smith, O. Andrade, H. Kimery, and L. Walsh. "FDTD simulation of microwave sintering of ceramics in multimode cavities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 793-799, May 1994.

45. Афанасьев, А.М. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при воздействии интенсивного СВЧ излучения на влагосодержащие объекты слоистой структуры: автореферат и дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18: 2002 / Афанасьев Анатолий Михайлович. – Казань. – 2002. – 176 с.

46. Балакирев, В.А., СВЧ-метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и трубопроводах / В.А. Балакирев, Г.В. Сотников, Ю.В. Ткач, Т.Ю. Яценко // «Электромагнит. явления», 1998 – Т.1 – №4 – С. 552 – 561.

47. Саяхов, Ф.Л., Тепломассоперенос в системе скважина-пласт при электромагнитном воздействии на массивные нефтяные залежи / Ф.Л.Саяхов, Ковалева Л.А., Насыров Н.М. // «Известия высших учебных заведений. Нефть и газ», 1998 – №4 – С. 47 – 55

48. Потапова, О.В. Исследование методов сфокусированной апертуры для повышения эффективности СВЧ-технологических установок открытого типа: автореферат и дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.05: 1998 / Потапова Ольга Владимировна. – Казань. – 1998. – 185 с.

49. Степанов, В.В. Применение многоэлементного возбуждения для повышения равномерности распределения СВЧ энергии в частично заполненных СВЧ камерах / В.В. Степанов // Материалы 10-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника И телекоммуникационные технологии», г. Севастополь – 11-15 сентября 2000 г. – С. 589 – 590.

50. Копусов, В.Н. К вопросу создания многомагнетронного микроволнового оборудования для современных технологий / В.Н. Копусов, Н.В. Швыркин // Материалы 11-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника И телекоммуникационные технологии», г. Севастополь – 10-14 сентября 2001 г. – С. 652 – 653.

51. Анфиногентов, В.И., Моделирование СВЧ нагрева диэлектрика движущимся излучателем / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Научно-практический сборник. «Электронное приборостроение», 2003– №1 – С. 552 – 561.

52. Анфиногентов, В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков: автореферат и дис. д-р. техн. наук: 05.12.07: 2006 / Анфиногентов, Владимир Иванович. – Казань. – 2006. – 340 с.

53. Морозов, Г.А. Развитие научной школы «Микроволновых технологий, процессов и комплексов в научно-исследовательском институте «Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем» / Г.А. Морозов, Ю.Е. Седельников, О.Г. Морозов, В.И. Анфиногентов // Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2017», 12-14 апреля 2017 г., Казань. – С. 33 – 52.

54. Лапочкин, М.С. Разработка и исследование СВЧ-устройств для плавления снежно-ледяной массы: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.12.07: 2013 / Лапочкин, Марат Сириневич. – Казань. – 2013. – 153 с.

55. Kuek Chee Yaw “Measurement of Dielectric Material Properties” application note, Rohde-Schwarz 2012.

56. W.J. Ellison and J-M. Moreau, “Open-Ended Coaxial Probe: Model Limitations,” IEEE Trans. Instrumentation & Measurement, Vol. 57, No. 9, Sept. 2008.

57. Денисов, Д.В. Измерение параметров материалов / Д.В. Денисов, К.С. Сухоева, Д.А. Максимов, К.А. Санникова // «Труды северо-кавказского филиала московского технического университета связи и информатики», 2017 – №1 – С. 170 – 175.

58. Арефьев, Р.В. Исследование концентрационной зависимости динамической вязкости водного раствора этанола / Р.В. Арефьев, Л.М. Монастырский // «Современные наукоемкие технологии», 2016 – №12-3 – С. 454 – 458.

59. Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Заметки по применению. URL: <https://docplayer.ru/26094823-Osnovy-izmereniya-dielektricheskikh-svoystv-materialov-zametki-po-primeneniyu.html> (дата обращения 16.11.2020)

60. Петухова, Н.А. Установки для измерения параметров диэлектриков / Н.А. Петухова // «Инновации в науке», 2015 – №44 – С. 51 – 56.

61. Фархутдинов, Р.В. Средства контроля диэлектрических параметров жидких сред на основе брэгговских СВЧ структур в коаксиальном волноводе: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.11.13: 2018 / Фархутдинов Рафаэль Вазирович. – Казань. – 2018. – 111 с.

62. Насыбуллин, А.Р. Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.12.07: 2012 / Насыбуллин Айдар Ревкатович. – Казань. – 2012. – 143 с.

63. Галимов, М.Р. Микроволновые методы и средства повышения эффективности мониторинга обводненности водонефтяных эмульсий: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.11.13: 2005 / Галимов Марат Разифович. – Казань. – 2005. – 184 с.

64. Насыбуллин, А.Р. Термодеструкция полистирола в электромагнитном поле СВЧ диапазона / А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, М.П. Данилаев, Р.Э. Самошин // «Вопросы электротехнологии», 2014 – №3 (4) – С. 14 – 19.

65. Анфиногентов, В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева вязких жидкостей в трубопроводе / В.И. Анфиногентов, С.Р. Ганиева // «Вестник казанского технологического университета», 2014 – №2, Т. 17 – С. 123 – 126.

66. Rammah Alahnom Microwave Planar Sensor for Permittivity Determination of Dielectric Materials / RammahAlahnom, Natasha Binti Abd Hamid, Zahriladha Zakaria, Tole Sutikno, AmyrulAzuanMohdBahar // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. - Vol. 11. - No. 1. - pp. 362–371.

67. Дмитриенко, Г.В. Проектирование полосковых устройств СВЧ : Учеб. пособие / Г.В. Дмитриенко; М-во образования Рос. Федерации. Ульян. гос. техн. ун-т. - Ульяновск : УлГТУ, 2001. - 129 с.
68. Беляев, Б.А. Исследования материалов на сверхвысоких частотах микрополосковыми датчиками / Б.А. Беляев, Н.А. Дрокин, А.А. Лексиков // «Известия высших учебных заведений. Физика», 2006 – №9 – Т. 49 – С. 45 – 53.
69. Смирнов, С.В. Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства / С.В. Смирнов, Морозов Г.А., Морозов О.Г. и др. // «Международный научно-исследовательский журнал», 2020 – №11 (101) – Ч. 1 – С. 67 – 73.
70. Chen LF, Ong CK, Neo CP, Varadan V V., Varadan VK, "Microwave Electronics Measurement and MAterial Characterization", John Wiley & Sons Ltd; 1971. 0-470 p.
71. Kajfez D, "Q-factor measurement with a scalar network analyser", IEE Proc-Microw Antennas Propag. 1995;142(5):369–72.
72. Boybay MS, Ramahi OM, "Material Characterization Using Complementary Split-Ring Resonators", IEEE Trans InstrumMeas [Internet]. 2012 Nov;61(11):3039–46.
73. Rusni IM, Ismail A, Alhawari ARH, Hamidon MN, Yusof NA. "An Aligned-Gap and Centered-Gap Rectangular Multiple Split Ring Resonator for dielectric sensing applications", Sensors (Basel) [Internet]. 2014 Jan [cited 2015 Nov 12]; 14(7):13134–48.
74. Lee C, Yang C. "Complementary Split-Ring Resonators for Measuring Dielectric Constants and Loss Tangents", IEEE MicrowWirel Components Lett. 2014;24(8):563–5.
75. Alahnomi RA, Zakaria Z, Ruslan E, MohdBahar. AA, Ab Rashid SR, "High sensitive microwave sensor based on symmetrical split ring resonator for

material characterization", *MicrowOpt Technol Lett* [Internet]. 2016 Sep;58(9):2106–10.

76. 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 – №4 – Т. 15 – С. 59 – 66.

77. Краснянский, М.Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М.Н. Краснянский, А.И. Попов, А.Д. Обухов // «Вестник тамбовского государственного технического университета», 2017 – №2 – Т.23 – С. 196 – 208.

78. Патент 2381470 Российская Федерация, G01M 7/00. Способ мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений и система мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений (варианты) / Шахраманьян, А.М., Шахраманьян М.А.; заявитель и патентообладатель Шахраманьян, А.М., Шахраманьян М.А. - № 2008106992/28; заявл. 26.02.2008, опубл.: 10.02.2010.

79. Федюшко, Ю.М. Математический анализ процесса свч нагрева технологическими комплексами / Ю.М. Федюшко, А.Ю. Федюшко // «Науковий вісник нубіп україни. серія: техніка та енергетикаапк», 2016 – №242 – С. 250 – 255.

80. Краснянский, М.Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М.Н. Краснянский, А.И. Попов, А.Д. Обухов // «Вестник тамбовского государственного технического университета», 2017 – №2 – Т.23 – С. 196 – 208.

81. Дунаева, Т.Ю. Алгоритм термообработки диэлектриков в СВЧ ЭТУ / Т.Ю. Дунаева // «Актуальные проблемы энергетики АПК», 2017 – С. 62 – 65.

82. 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 – №4 – Т.15 – С. 59 – 66.

83. Кокорев, Д.С. Применение "цифровых двойников" в производственных процессах / Д.С. Кокорев, Н.П. Посмаков // «Colloquium-Journal», 2019 – №26-2 (50) – С. 68 – 74.

84. Гончаров, К.О. Внедрение технологии сквозного цифрового проектирования в рамках научно-исследовательской работы студентов и аспирантов / К.О. Гончаров, А.Д. Романов, А.Л. Кулагин, Е.А. Романова // «Современные проблемы науки и образования», 2014 – №6 – С. 325.

85. Федеральный проект от 01.11.2018 «Цифровые технологии».

86. Данилькевич, М.А. Перспективы развития информационных технологий в государственном и муниципальном управлении / М.А. Данилькевич // «Экономика и предпринимательство», 2019 – №8 (109) – С. 466-471.

87. Боровков, А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // «Цифровая трансформация экономики и промышленности», 2019 – С. 234-245.

88. Елин, В.М. Технология цифрового двойника. Понятие и особенности подхода к организационно-правовому обеспечению комплексной безопасности / В.М. Елин // «Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Право», 2020 – Т. 20 – № 3 – С. 68-75.

89. Городов, В.В. Синтез и свойства карбоксилсодержащих полидиметилсилоксанов: автореферат и дис. канд. хим. наук: 02.00.06: 2018 / Городов Вадим Валерьевич. – Москва. – 2018. – 159 с.

90. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы: учебник / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.

91. Sumathi, S. Computational intelligence paradigms: theory & applications using MATLAB / S. Sumathi, S. Paneerselvam. NY : CRC Press, 2010. 821 с.

92. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. Москва : Горячая линия-Телеком, 2017. 496 с.
93. Smirnov, S.V. Optimization of microwave heating of dielectrics taking into account errors in amplitudes of the excitation electromagnetic field emitters / S.V. Smirnov, V.I. Anfinogentov, G.A. Morozov et al. // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – 2017. – pp. 435-438.
94. Smirnov, S.V. Modeling and optimization of microwave heating in cylindrical volumes / S.V. Smirnov, G.A. Morozov, V.I. Anfinogentov et al. // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – 2017. – pp. 68-73.
95. Смирнов, С.В. Микроволновые технологии переработки отходов коневодческих предприятий / С.В. Смирнов, А.Р. Насыбуллин Р.В. Фархутдинов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы: МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 18-20 апреля 2019. – 2019. – С.207-210.
96. Смирнов, С.В. Метод контроля влажности / С.В. Смирнов, Г.А. Морозов, А.Р. Насыбуллин // Физика и технические приложения волновых процессов: XVII МНТК, 17-20 ноября 2020. – 2020. – С. 191-192.
97. Смирнов, С.В. Применение микроволновых технологий для утилизации отходов животноводства / С.В. Смирнов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы: МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 16-18 апреля 2020. – 2020. – С.117-119.
98. Савосина, Н.В. Правовое регулирование административной ответственности военнослужащих в Российской Федерации: автореферат и дис. канд. юр. наук: 12.00.14: 2009 Савосина Наталья Владимировна. – Казань. – 2011. – 24 с.
99. Антоненко, Д.А. Использование сложных компостов на основе отходов в системе органического земледелия / Д.А. Антоненко, Ю.Ю. Никифорова, О.А. Мельник // «Современная наука: актуальные проблемы

теории и практики. серия: естественные и технические науки», 2019 – № 11 – С. 7-11.

100. Мишуров, Н.П. Инновационные технологии подготовки птичьего помета к использованию / Н.П. Мишуров // Вестник всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, 2015 – № 4(20) – С. 106-114.

101. Крапивницкая, Т.О. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа/ Т.О.Крапивницкая, А.А. Богдашова, А.Н. Денисенко и др.// Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2019 – Т.9 – № 4(31) – С. 750-758.

102. Лапочкин, М.С. Повышение эффективности таяния снежно-ледяной массы при комбинированном энергетическом воздействии микроволнового и ультразвукового полей / М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов // Известия самарского научного центра российской академии наук, 2012 – Т.14 – № 1-3 – С. 894-899.

103. Артемьев, В.И. Волоконно-оптическая многосенсорная система контроля износа и усилия прижима токоприемников электроподвижного состава на основе адресных волоконных брэгговских структур: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.11.13: 2019 / Артемьев Вадим Игоревич. – Казань. – 2019. – 153 с.

104. Сахабутдинов, А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: автореферат и дис. д-р. техн. наук: 05.11.07: 2018 / Сахабутдинов Айрат Жавдатович. – Казань. – 2018. – 467 с.

105. Лаврентьев, В.А. Влияние СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства эпоксидного компаунда: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.09.10: 2009 / Лаврентьев Владимир Александрович. – Казань. – 2009. – 174 с.

106. Мисбахов, Р.Ш. Радиофотонные адресные сенсорные системы на трехкомпонентных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения задач интеллектуальной энергетики: автореферат и дис. д-р. техн. наук: 05.11.07: 2018 / Мисбахов Ринат Шаукатович. – Казань. – 2020. – 601 с.

107. Драбкина, Е.В. Оценка эффективности применения различных видов топлива для теплоснабжения индивидуального жилого дома/ Е.В. Драбкина, В.В. Шиянов // ВЕЛЕС, 2017 – № 6-2 – С. 58-63.

108. Ровных, Е.А. Цифровая экономика. инструменты стимулирования производства инновационных товаров/ Е.А. Ровных // Ежемесячный научно-практический журнал «Компетентность», 2017 – № 9-10(150-151) – С. 4-13.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

На правах рукописи

СМИРНОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**МНОГОСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СВЧ-ОБРАБОТКИ
ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПРИЛОЖЕНИЕ

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Морозов Геннадий Александрович

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности
КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева,

д.т.н., профессор

С.А. Михайлов

2021 г.



А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта КНИТУ-КАИ
Смирнова Сергея Викторовича

Комиссия в составе:

- Надеев А.Ф. – директор ИРЭТ, профессор каф. РТС, д.ф.-м.н. – сопредседатель комиссии;
- Нуреев И.И. – зам. директора НИИ ПРЭФЖС, профессор, д.т.н. – сопредседатель комиссии;
- Файзуллин Р.Р. – председатель НТС ИРЭТ, зав. каф. НТВЭ, профессор, д.т.н. – зам. председателя комиссии;
- Ильин Г.И. – профессор каф. РЭКУ, профессор, д.т.н. – член комиссии;
- Сахабутдинов А.Ж. – профессор каф. РФМТ, доцент, д.т.н. – член комиссии,

составила настоящий акт о том, что в период с 2016 г. по настоящее время в научно-исследовательский процесс ИРЭТ КНИТУ-КАИ внедрены следующие разработки, в которых используются результаты диссертационной работы Смирнова С.В.:


- математические модели СВЧ нагрева органических отходов животноводства, определяющие воздействие на них энергии электромагнитного поля

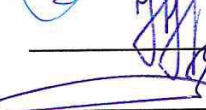
СВЧ-диапазона, с учетом температурной и частотной зависимости их диэлектрических свойств, изменяющихся в процессе СВЧ-обработки.

- компьютерные модели резонансного планарно-кольцевого СВЧ-датчика на основе симметричной полосковой линии для измерения влажности с повышенной добротностью и отсутствием физического влияния обрабатываемой среды на погрешность измерений в зоне фидерных линий.

- структурная схема и алгоритм работы системы СВЧ обработки органических отходов животноводства, а также структурная схема адаптивной системы управления работы СВЧ установки.

Сопредседатели комиссии





Надеев А.Ф.

Нуреев И.И.

Заместитель председателя комиссии



Файзуллин Р.Р.

Члены комиссии





Ильин Г.И.

Сахабутдинов А.Ж.



УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ООО «Санитарная экология»
 Н.Ш. Ахтимьянов
 «21» 01 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
 соискателя степени кандидата технических наук
Смирнова Сергея Викторовича

Комиссия в составе:

- Н.Ш. Ахтимьянов – Н.Ш. Ахтимьянов – председатель комиссии;
- В.Б. Пигунич – В.Б. Пигунич – зам. председателя комиссии;
- А.М. Потинев – А.М. Потинев – член комиссии;
- Н.И. Базанов – Н.И. Базанов – член комиссии,

составила настоящий акт о том, что при выполнении инициативных разработок совместно с НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева применялись следующие научно-технические разработки, в которых используются результаты диссертационной работы Смирнова С.В. на тему «Многосенсорная система контроля температуры и влажности для реализации процессов микроволновой обработки органических отходов животноводства»:

- метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости органических отходов животноводства с использованием коаксиального пробника;
- результаты исследований СВЧ резонансных датчиков на основе симметричной полосковой линии для контроля температуры и влажности;
- практические рекомендации по построению конструкций СВЧ датчиков контроля температуры и влажности органических отходов животноводства.

Комиссия отмечает, что результаты диссертационной работы Смирнова

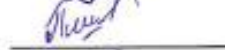
С.В. широко использовались в разработке микроволновых устройств измерительного контроля параметров материалов.

Председатель комиссии



Н.М. Ахмедов

Заместитель председателя комиссии



В.Б. Пичугин

Члены комиссии



А.М. Погорелов



Н.У. Багенов