Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ"
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)



На правах рукописи

БУДНИКОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНА

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
(по техническим наукам)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор Васильев А.Н.

Москва - 2020

Оглавление

Введение 8

1 СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ 15

1.1 Аналитический обзор объемов перерабатываемого материала 15

1.1.1 Необходимость сушки зерна 15

1.1.2 Потенциал снижения потерь при производстве зерновых 18

1.1.3 Виды и причины потерь зерна при хранении 21

1.2 Способы сушки зерна 25

1.2.1 Основы сушки 25

1.2.2 Классификация способов сушки 29

1.2.3 Выбор сушильного оборудования 31

1.2.4 Интенсифицирующие факторы 34

1.2.5 Критерий эффективности процесса сушки зерна 36

1.3 Энергетические затраты на сушку зерна 36

1.4 Оборудование для сушки с применением электрофизических воздействий 40

1.4.1 Ультразвук 40

1.4.2 Озон 43

1.4.3 Аэроионы 49

1.4.4 Инфракрасный нагрев 51

1.4.5 Радиочастотная сушка 55

1.4.6 СВЧ 57

1.5 Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов 68

1.5.1 Частотная зависимость диэлектрических свойств воды 69

1.5.2 Температурная зависимость диэлектрических свойств воды 70

1.5.3 Зависимость от плотности материала 71

1.6 Цель и задачи исследования 75

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- ВЛАГОПЕРЕНОСА 76

2.1 Механизм удаления влаги из зерна 76

2.2 Общие положения СВЧ нагрева 81

2.3 Интенсификация тепло-влагопереноса СВЧ-воздействием 84

2.4 Выводы по разделу 96

3 ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ СВЧ-КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНОВОЙ СЛОЙ 97

3.1 Параметры разрабатываемого оборудования 97

3.2 Существующие сведения о диэлектрических свойствах зерна 98

3.2.1 Общие сведения о диэлектриках 98

3.2.2 Диэлектрические свойства зерна 101

3.2.3 Глубина проникновения 104

3.3 Равномерность распределения электромагнитной волны в зерновом слое 107

3.4 Численный эксперимент по определению коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия 109

3.4.1 Постановка задачи для численного моделирования 109

3.4.2 Обоснование выбора программной среды для разработки компьютерной модели 111

3.5 Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с одним источником 113

3.5.1 Моделирование волновода 113

3.5.2 Моделирование зоны СВЧ-конвективной обработки зерна с одним источником 118

3.6 Разработка методики определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки 125

3.6.1 Общие сведения об измерении параметров ЭМП 126

3.6.2 Обоснование калориметрического датчика 132
3.6.3 Экспериментальная установка 144
3.6.4 Методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки 148
3.6.5 Экспериментальные исследования коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля 151
3.7 Исследование изменение коэффициента диэлектрических потерь зерна 156
3.7.1 Разработка метода косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя 157
3.7.2 Метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя 172
3.7.3 Результаты измерений 174
3.8 Исследование распределения СВЧ поля в продуктопроводе установки СВЧ-конветивной обработки зернового слоя 181
3.8.1 Модель СВЧ-конвективного воздействия на зерновой слой 181
3.8.2 Моделирование зернового слоя 185
3.8.3 Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с несколькими источниками СВЧ мощности, работающими одновременно 191
3.8.4 Экспериментальное исследование распространения электромагнитного поля в зерновом слое 209
3.9 Выводы по разделу 212
4 РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА 215
4.1 Разработка математической модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки и обработки зерна по критериям эффективности: минимум энергозатрат и максимум производительности 215
4.2 Исследование динамических свойств зернового слоя 217

4.3 Моделирование процессов управления 223
4.3.1 Моделирование управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке..... 223
4.3.2 Моделирование управления работой магнетронов и подачей теплоносителя при СВЧ – конвективной сушке зерна 225
4.4 Разработка алгоритмов функционирования 226
4.4.1 Разработка алгоритмов управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке 226
4.4.2 Разработка алгоритма управления подачей теплоносителя и регулирования его температурой при сушке зерна в универсальном электротехнологическм модуле для сушки и обработки зерна с учетом изменения движущих сил тепло– и влагопереноса при СВЧ воздействии..... 227
4.4.3 Разработка алгоритма функционирования систем подачи и выгрузки зерна универсального электротехнологического модуля..... 228
4.4.4 Разработка алгоритма управления работой магнетронов на основе полученных математических моделей процесса нагрева зерна в СВЧ поле универсального электротехнологического модуля..... 229
4.4.5 Разработка объединенного алгоритма функционирования универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна..... 229
4.5 Разработка компьютерной модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки и обработки зерна 231
4.6 Разработка управляющих программ 251
4.7 Лабораторные исследования эффективности работы универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна..... 252
4.7.1 Организация испытаний 252
4.7.2 Испытательный стенд 253
4.7.3 Разработка исходных требований на лабораторную установку..... 253

4.7.4 Разработка исходных требований на экспериментальную установку исследования автоматизированной системы управления СВЧ - конвективной сушкой зерна 254
4.7.5 Изготовление и пуско-наладка лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно (сыпучие материалы) с различной плотностью слоя 256
4.7.6 Система контроля показаний датчиков, выработки и вывода управляющих воздействий для лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно 257
4.7.7 Определение энергоэффективных режимов сушки зерна при СВЧ – конвективном воздействии 261
4.8 Дополнительные возможности совершенствования процессов обработки зерна с применением электрофизических воздействий 269
4.9 Выводы по разделу 274
5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЧ МОДУЛЯ 276
5.1 Производственные испытания 277
5.2 Оценка экономической эффективности внедрения разработки 284
5.2.1 Краткое описание проекта 284
5.2.2 Расчет экономической эффективности универсальных модульных конструкций для тепловой обработки зерна с использованием поля СВЧ 286
5.2.3 Формирование прогнозных денежных потоков и оценка показателей эффективности проекта 294
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 305
Список сокращений 308
Список литературы 309
Приложения 352
Приложение А – Сводные сведения об энергоемкости сушильного оборудования 353

Приложение Б – Патенты по теме исследования 362

Приложение В – Rational Quadratic GPR - модель 371

Приложение Г – Акты внедрения 374

Приложение Д – Договор о научно-техническом сотрудничестве 388

Приложение Е – Проект технических условий 389

Приложение Ж – Результаты испытаний на МИС 397

Приложение З – Результаты фитопатологической экспертизы 399

Введение

Актуальность. Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы предусмотрено увеличение валового сбора зерна к 2020 г. до 115 млн тонн по сравнению к 85,2 млн тонн в среднем за 2006-2010 гг., или на 46,7%. Увеличение производительности зерносушильного оборудования и снижение энергоёмкости процесса является важной задачей реализации Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы.

Экспорт зерна из России является наиболее прибыльной статьей российского сельскохозяйственного экспорта. В 2018 году экспорт зерна из России с учётом продуктов переработки составил около 50 млн тонн. При этом на экспорт злаковых культур пришлось около 33,176 млн тонн ($5,52 млрд) [242, 243, 264]. Наряду с ростом экспорта злаковых культур с 19 млн тонн в 2013 году до 43 млн тонн в 2017, спрос на данную продукцию остается стабильным. При этом особо остро встают вопросы потери зерновых на различных этапах производства и высокая энергоемкость процессов их тепловой обработки.

В зависимости от технического оснащения и общей организации технологических процессов в хозяйствах-производителях и на элеваторах потери зерновых оцениваются от 5 до 12%. При этом FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations – Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН) оценивает ежегодные потери зерна около 10% от общего производства с максимумом для некоторых менее развитых стран 30-50 процентов [264]. В зависимости от технологии почвообработки до 30% зерна уже после уборки может быть заражено микотоксинами, что не позволяет без специальной обработки использовать его ни в продовольственных, ни в кормовых целях. Энергоемкость сушки зерна, в зависимости от влажности и способа сушки достигает 12 МДж/кг исп.вл. при теоретическом минимуме порядка 2,5-2,7 МДж/кг исп.вл. Таким образом сушка и обеззараживание являются важными элементами технологической цепи послеуборочной

обработки и хранения зерна, а снижение энергоемкости указанных процессов является научной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение. Потребность в сушильном оборудовании, позволяющем проводить интенсивную энергосберегающую сушки, особенно остро стоит для центрального региона, отличающегося неблагоприятными погодными условиями во время уборки.

Энергоёмкость процесса сушки в общей энергоемкости производства зерна составляет не менее 20%. Поэтому ее снижение и увеличение производительности процесса сушки являются одними из основных направлений в научных исследованиях, направленных на повышение рентабельности производства зерна. В предлагаемой работе рассматриваются возможности использования электромагнитного поля сверхвысокой частоты для интенсификации сушки и обеззараживания зерна, а также возможности создания компьютерных моделей, позволяющих разрабатывать энергоэффективное зерносушильное оборудование и системы управления им.

Степень разработанности. Технологии и технические средства термообработки зерна, в том числе с применением электрофизических воздействий исследовались такими отечественными и зарубежными авторами, как: Бородин И.Ф., Троцкая Т.П., Анискин В.И., Голубкович А.В., Чижиков А.Г., Ксенз Н.В. (рециркуляционные режимы сушки, применение озоно-воздушных смесей), Дианов Л.В., Смелик В.А., Ширяев А.С., Бурков А.И. (увеличение активной поверхности зерна, рециркуляционные режимы сушки), Годлевский В.Е., Сулинов А.В., Росляков Ю.Ф., Прудильникова Т.Н. (исследование влияния газового состава агента сушки на скорость протекания процесса обезвоживания), Васильев А.Н., Кучумов Н.Н., Чебанько Н.И., Гумаргалиева К.З., Шабалкин В.А., Бастрон А.В. (исследование скоростных режимов подачи агента сушки, режимов реверсивной подачи воздуха), Бусарева Н.Н., Иванов Ю.В., Ефимов Н.Ф., Пименов Ю.Н. (предварительный нагрев зернового материала), Берзиньш Э.Р., Раецкис П.Ю., Аболтыньш А.Я., Судаев Е.М. (увеличение активной поверхности зерна, рециркуляционные режимы сушки), Лыков А.В., Рудобашта С.П., Вендин С.В., Мустафаев С.К., Пахомов В.И., Васильев А.Н., Новикова Г.В., Романов Д.М. (исследование электрофизических способов интенсификации и режимов СВЧ сушки зерна), Фомичев В.Т. и др.

Одним из перспективных направлений совершенствования и разработки зерносушильного оборудования, разрабатываемый такими учеными как Вендин С.В., Рудобашта С.П., Пахомов В.И., Васильев А.Н., Цугленок Н.В., Нельсон С.О., Кражевский С., Ванг В., Ранжбаран М. и другие. является применение микроволновых воздействий. При этом существуют некоторые сложности, усложняющие внедрение данного вида воздействий. К ним можно отнести сложность обеспечения равномерности нагрева, обеспечение масштабируемости установок, обеспечение требуемой производительности.Тема диссертационной работы, направленная на решение проблемы продовольственной безопасности за счет обеспечения сохранности урожая и рационального использования энергоресурсов и выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой стабилизации и развития инженерно-технической сферы АПК России на 2000-2006 гг. («Техника для продовольствия России»); Программой Фундаментальных и прикладных исследований по научному обеспечению развития АПК РФ на 2006-2010 гг. и 2011-2015 гг.; Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг.; гранта РФФИ 16-38-00450 мол_а 2016 г; международного гранта Республики Казахстан по программе 055 2015-2016 годы.

Цель диссертационной работы: разработать научные и методические принципы разработки оборудования СВЧ-конвективной сушки зерна, обеспечивающего снижение потерь урожая при его послеуборочной обработке за счет увеличения производительности, а также снижения энергоемкости процессов сушки зерна.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие ***задачи:***

1. Провести обзор и сравнительную оценку существующих способов электрофизической интенсификации процессов сушки зерна при послеуборочной обработке.

2. Определить требуемые условия применения микроволновой энергии для обеспечения интенсификации процессов тепло- влагопереноса.

3. Сформировать научно-обоснованные подходы к определению параметров установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

4. Разработать методику определения напряженности микроволнового поля в продуктопроводе установки СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерновым слоем.

5. Разработать метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя в зоне СВЧ-конвективной обработки.

6. Определить научно-обоснованные подходы к разработке режимов работы установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

7. Провести производственную проверку и оценить экономическую эффективность применения установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

Объектом исследования в диссертационной работе являются электротехнологические процессы СВЧ обработки зерна.

Предметом исследования диссертации является влияние электротехнологий и режимов работы электрооборудования на процессы тепловлагообмена при послеуборочной обработке зерна.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки, заполненной зерновым материалом.

2. Разработан порядок определения зависимости коэффициента равномерности распространения микроволнового поля от влажности зерна и плотности слоя обрабатываемого материала в зоне СВЧ-конвективной обработки.

3. Разработан метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя.

4. Определена зависимость коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя от влажности зерна и плотности слоя обрабатываемого материала.

5. Выявлена динамика нагрева вентилируемого зернового слоя в объеме зоны СВЧ-конвективной обработки.

6. Разработаны способы послеуборочной обработки зерна с применением электрофизических воздействий, подтверждённые патентами № 2501201 РФ, № 2501203 РФ, № 2502027 РФ, № 2505766 РФ, № 159476 РФ, № 179642 РФ, № 33398 РК.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанная методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки, заполненной зерновым материалом, дает возможность проектировать активную зону обеспечивающую требуемую равномерность нагрева, определить количество магнетронов и схему их размещения, определить количество зон и расстояние между ними.

2. Полученные зависимости коэффициента равномерности распространения микроволнового поля от влажности зерна и плотности слоя обрабатываемого материала в зоне СВЧ-конвективной обработки позволяют разрабатывать оборудование СВЧ-конвективной обработки и системы управления ими.

3. Предложенный метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя позволяет расширить имеющиеся сведения о электрофизических свойствах сельскохозяйственных материалов.

4. Полученные зависимости коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя от влажности зерна и плотности слоя позволяют разрабатывать оборудование для контроля влажности зернового материала в процессе СВЧ-конвективной сушки.

5. Выявленная динамика нагрева зерна в объеме зоны СВЧ-конвективной обработки позволяет разрабатывать алгоритмы управления технологическим оборудованием при СВЧ-конвективной обработке.

6. Результаты исследований режимов работы оборудования позволяют создавать системы управления сушкой зерна в СВЧ-конвективных установках по критериям минимальной энергоемкости и максимальной производительности.

Методология и методы исследования. Научные исследования проводились с использованием математических аппаратов электродинамики, теории электромагнитного поля и электрических цепей, а также графоаналитических методов. Обработка экспериментальных данных выполнена с использованием компьютерных программ Microsoft Excel, Matlab, трехмерного моделирования конструктивного

исполнения СВЧ установок в программе SolidWorks, а также в системе электродинамического моделирования поля CST Studio Suite.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для повышения эффективности применения микроволновой мощности в процессах сушки зерна влагосъем необходимо осуществлять непосредственно в процессе СВЧ-воздействия.

2. Для определения параметров установок СВЧ-конвективной сушки зерна необходимо руководствоваться зависимостями диэлектрических свойств обрабатываемых материалов от исходных, текущих и конечных параметров влажности зерна и плотности слоя, изменяющихся в процессе сушки.

3. Предложенная методика позволяет определить напряженность микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия нескольких источников микроволновой мощности, заполненной зерновым слоем.

4. Предлагаемый метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь позволяет производить определение фактора диэлектрических потерь зернового слоя, а полученные данные могут быть представлены функциональной зависимостью от влажности зерна и плотности его слоя.

5. Режимы работы оборудования СВЧ-конвективной сушки, разработанные по критерию минимальной энергоемкости, позволяют обеспечить снижение энергетических затрат на осуществление сушки, а по критерию максимальной производительности снизить потери зерна за счет увеличения производительности оборудования.

Степень достоверности основных положений и выводов подтверждена: результатами экспериментальных исследований процесса комбинированной СВЧ-конвективной обработки зерна, положительными результатами испытаний предложенных установок в производственных условиях; использованием современных методик, ГОСТов, приборов и оборудования; сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Апробация работы и публикации.

Основные положения диссертации доложены на всероссийских и международных научных и научно-практических конференциях проводимых ФГОУ ВПО АЧГАА в 2005 - 2007 годах и ФГОУ ВПО СтГАУ в 2006 году, ГНУ ВИЭСХ 2008-2016, ГНУ ВИМ 2011-2016, ГНУ ГОСНИТИ 2013, ГНУ СЗНИИМЭСХ 2013, ГНУ ВНИИМЖ 2014-2016, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ 2016-2020, ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина 2012, МПА 2013, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства 2012-2015, Мичуринский госагроуниверситет 2014, ВЦ НУБіП України 2015, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем 2015-2019, ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ 2018, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ 2016, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева 2018, ФГБОУ ВО Донской ГАУ 2018-2020, Intelligent Systems and Computing 2018-2020.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 138 печатных работ, в том числе 22 в изданиях из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК РФ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 10 в международных базах цитирования (WoS, Scopus, Springer), 9 патентов на изобретения и полезные модели, 3 монографии. Объем публикаций 89,96 п.л., из которых доля авторского вклада – 37,84 п.л.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 405 страницах машинописного текста, включает 52 таблицы и 134 рисунка. Список цитируемой литературы представлен 368 источниками.

1 СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Аналитический обзор объемов перерабатываемого материала

1.1.1 Необходимость сушки зерна

Экспорт зерна из России является наиболее прибыльной статьей российского сельскохозяйственного экспорта. В 2018 году экспорт зерна из России с учётом продуктов переработки составил около 50 млн тонн. При этом на экспорт злаковых культур пришлось около 33,176 млн тонн ($5,52 млрд) [242, 243, 264]. Наряду с ростом экспорта злаковых культур с 19 млн тонн в 2013 году до 43 млн тонн в 2017, спрос на данную продукцию остается стабильным. При этом особо остро встают вопросы потери зерновых на различных этапах производства и высокая энергоемкость процессов их тепловой обработки.

Валовый сбор зерновых в России к 2017 году по данным Федеральной службы государственной статистики достиг 135,4 миллиона тонн. Динамика повышения объема валового сбора и его структура представлены на рисунке 1.1 [243]. На рисунке 1.2 [243] приведены данные о ресурсах и использованию зерна (без продуктов переработки) по Российской федерации (данные за 2019 год предварительные) на последние 10 лет по данным Росстата.

Многие исследователи и хозяйственники отмечают существенные потери выращенного и собранного зерна в процессе хранения из-за повышенного содержания влаги. Влажность зерна является одним из основных факторов, определяющих возможность и сроки его безопасного хранения с сохранением продовольственных, кормовых и посевных качеств. Во многих районах страны природно-климатические условия предопределяют уборку значительной части урожая зерновых, масличных и других культур с повышенной влажностью, при которой не может быть обеспечена их длительная сохранность [17-18, 41, 105, 169, 171, 175, 250, 251, 253, 271, 277, 290, 310]. При этом достигнуты значительные результаты в разработке зерносушильного оборудования, в том числе с использованием электрофизических способов интенсификации тепло- влагопереноса.

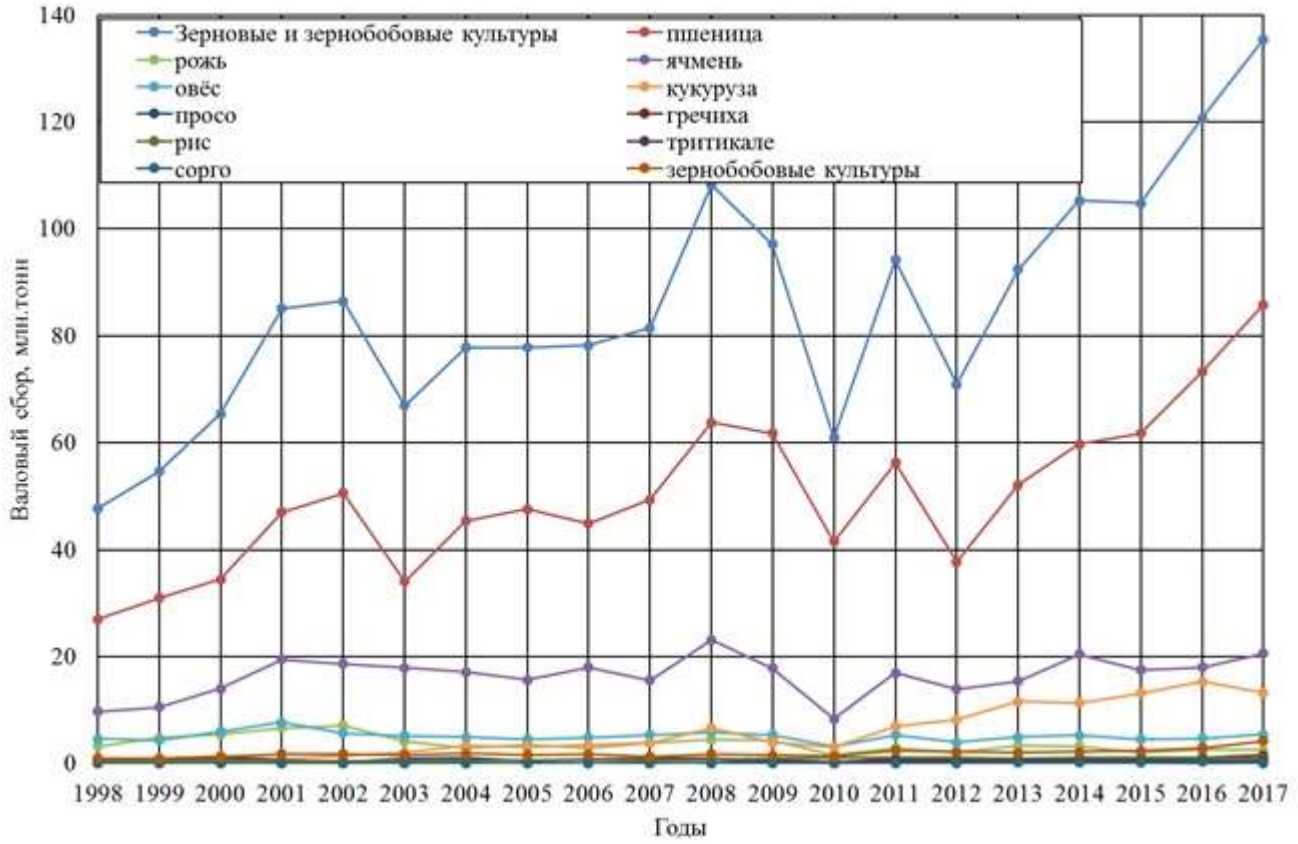


Рисунок 1.1 – Валовые сборы сельскохозяйственных культур по РФ [243]

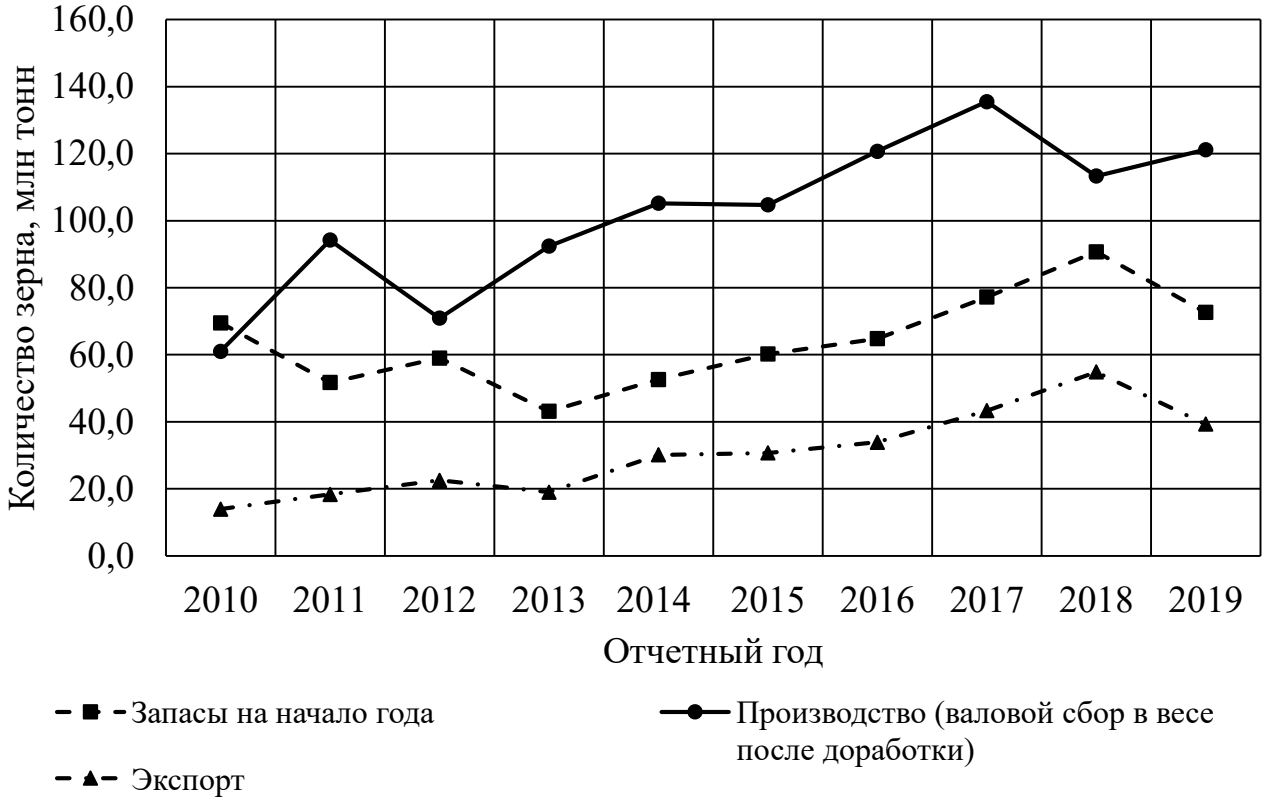


Рисунок 1.2 – Ресурсы и использование зерна (без продуктов переработки) по Российской федерации (данные за 2019 год предварительные) [243]

Таким образом, необходимость сушки зерновых сельскохозяйственных материалов обуславливается требованием обеспечения их качества и сроков безопасного хранения. Сушка, как один из основных технологических этапов переработки зерна, прежде всего характерен для центральных и северных регионов страны, отличающихся неудовлетворительными погодными условиями. Несмотря на то, что основными, по объему, производителями зерновых в РФ являются южные регионы, сушке в России подвергается порядка 40–60% валового сбора зерновых. Таким образом, суммарный зерносушильный парк страны должен обеспечивать сушку 65–75% валового сбора зерна, так как в некоторых районах использование зерносушильных средств требуется не ежегодно, а лишь раз в 2–3 года. Исходя из вышесказанного, зерносушильной техникой должны быть оснащены 2/3 хозяйств [169].

В технологии послеуборочной обработки и хранения зерновых именно сушка является основным процессом, определяющим сохранность и стоимость убранного урожая. Сушка оказывает положительное влияние на выход и качество продуктов переработки зерна. Сушка действует угнетающе на вредителей и микрофлору зерна, позволяет в некоторых случаях улучшить технологические свойства дефектного зерна (поврежденного клопом-черепашкой, морозобойного, проросшего и т.д.) [169, 181, 193, 207, 210, 226, 241, 338, 363].

При этом оборудование и технологические приемы сушки определяют качественные показатели урожая. Сушилка в хозяйствах – это не только установка для доведения зерна до безопасной влажности для его хранения, но также инструмент управления процессами уборки, послеуборочной обработки и предпродажной подготовки урожая [8, 10-12, 169, 181-183, 192].

Зерносушильный парк сельскохозяйственных производителей в нашей стране на настоящий момент морально и физически изношен на 80–90%. Проблемы его восстановления и развития, определяются рядом следующих факторов [169]:

– высокая стоимость услуг элеваторов на сушку зерновых вынуждает производителей сельскохозяйственной продукции развивают собственную техноло-

гическую базу переработки и хранения урожая, повышая качество сохранности зерна, что увеличивает потребность в качественной (энергосберегающей, экологичной, доступной) сушильной технике;

- требования потребителей продукции растениеводства определяют необходимость повышения качественных показателей хранимого урожая;
- появление мелких производителей зерна (валовой сбор до 500 т зерна) и крупных (сбор более 10 000 т зерна) хозяйств обуславливает потребность в сушильном оборудовании различной производительности, стоимости и периода эксплуатации;
- увеличение разнообразия выращиваемых культур;
- повышение интенсивности поступления зерна с поля вследствие внедрения современной, высокопроизводительной уборочной техники;
- многообразие почвенно-климатических условий;
- большое количество поставщиков различных типов сушильного оборудования.

Указанные факторы говорят об актуальности разработки и внедрения нового энергоэффективного оборудования для сушки и переработки зерновых. Также интерес представляет возможность совершенствования существующей техники за счет применения различных интенсифицирующих воздействий.

1.1.2 Потенциал снижения потерь при производстве зерновых

Развитие техники и технологии производства продукции растениеводства позволило снизить риски продовольственной безопасности. Несмотря на это, такие факторы как низкий уровень энерговооруженности сельского хозяйства, высокая энергоемкость технологических процессов, низкий технологический уровень применяемого оборудования не позволяют полностью реализовать потенциал отдельных сельскохозяйственных производителей. Важно, что действие этих ограничивающих факторов сохраняется и сегодня [23, 185, 197, 239, 275].

Потенциал роста объемов производства зерновые культур в Российской федерации сохраняется за счет потенциально больших объемов пахотных земель. Однако остаются трудности, такие как возможность привлечения инвестиций, необходимых для внедрения передового технологического оборудования, оптимизации технологических процессов и в общем для ускоренного роста АПК.

В общем, сокращение потерь зерновых культур на различных стадиях производства, в том числе при переработке и хранении может рассматриваться как один из возможных путей решения проблемы продовольственной безопасности.

Общемировые потери, обусловленные недостаточным уровнем применяемых агротехнологий, неэффективным использованием минеральных удобрений, недостаточным уровнем мелиорации, по различным источникам колеблются от 10 до 40%. Потери, обуславливаемые нехваткой техники, неблагоприятными погодными условиями, агрономическими ошибками и прочими причинами, происходящими в процессе уборки в среднем, составляют 10% урожая.

По данным Автономной некоммерческой организации «Международный независимый институт аграрной политики» (АНО МНИАП) для настоящего уровня технологического развития потенциал урожайности, потерь и потребления зерновых может быть представлен в виде диаграммы – рисунок 1.3[239].

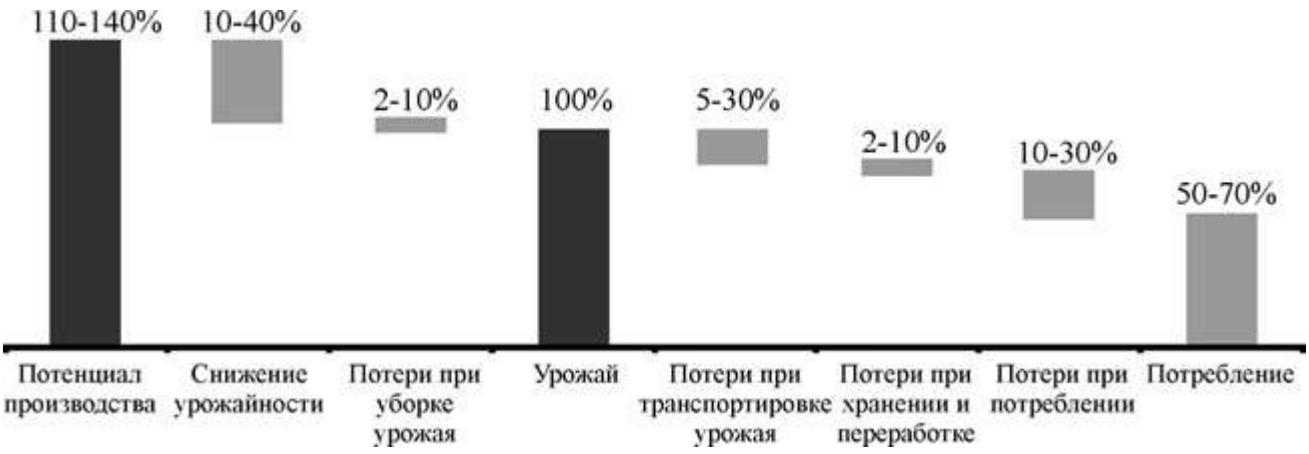


Рисунок 1.3 – Потенциал урожайности, производства, потерь и потребления зерновых в среднем по миру [239]

Значительны потери при потреблении готовой продукции: хлеб портится при неправильном хранении в торговых сетях и у конечного потребителя (нерационально используется, выбрасывается). В мировой практике суммарно эти потери могут составлять от 10% до 30%. При учете остальных потерь, потребителем используется от 50 до 70% собранного урожая [280].

Состояние предприятий – сельхозпроизводителей в России вносят некоторые особенности и отличия от общемировой картины. Так диаграмма потерь и потребления зерновых возможность потенциал урожайности, потерь и может быть представлен в виде диаграммы – рисунок 1.4[239]. Прежде всего, наша страна имеет существенно больший потенциал роста урожайности: за счет расширения использования средств повышения плодородия, внедрения более эффективных агротехнологий и оборудования.

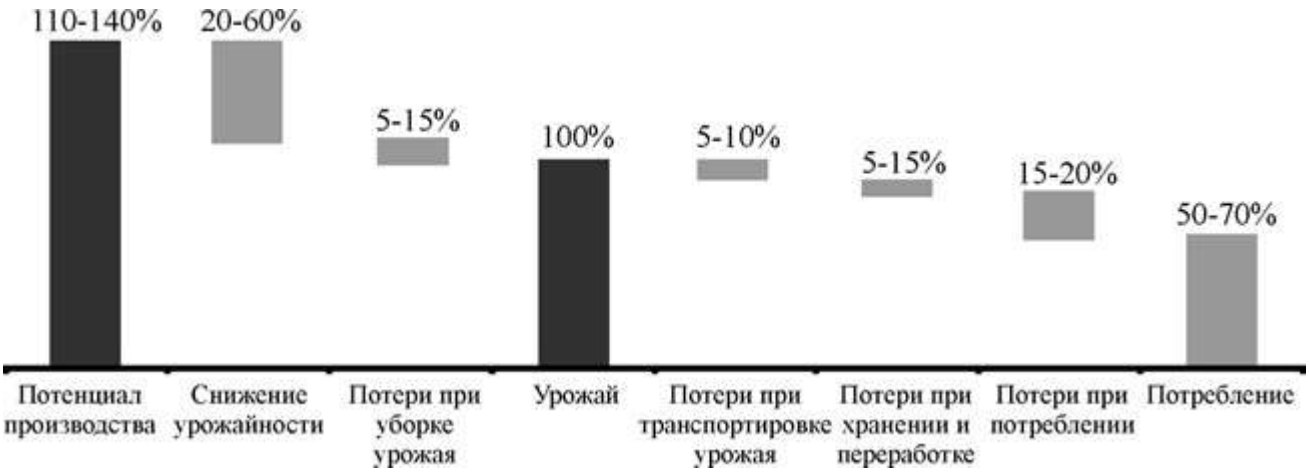


Рисунок 1.4 – Потенциал урожайности, производства, потерь и потребления зерновых в РФ [239]

Рост урожайности может составить 20% - 60%. Также значительный потенциал есть для снижения потерь при уборке урожая – на 5% - 15%. По данным Минсельхоза России, главная причина этих потерь – дефицит сельхозтехники. Потери при хранении и переработке также значительно превосходят средние показатели по общемировым данным. Потенциально эти проблемы можно снизить за счет внедрения нового оборудования и организации процессов переработки и хранения (раз-

витие сети элеваторов и зерносушильного оборудования, уменьшение объемов хранения зерна на складах и на зернотоках, применение продвинутым технологий сушки зерна).

1.1.3 Виды и причины потерь зерна при хранении

Классификацию потерь зерна при хранении можно представить в виде таблицы 1.1 [203-205, 265].

Таблица 1.1 – Виды и причины потерь зерна при хранении [203-205, 265].

Виды потерь	Классификация потерь	Причины потерь
Потери в массе	Биологические	Дыхание, являющееся характерным признаком жизнедеятельности зерна
		Прорастание зерна
		Развитие микроорганизмов
		Самосогревание
		Уничтожение насекомыми и клещами
		Уничтожение грызунами
		Уничтожение птицами
	Механические	Травмы (при транспортировании и погрузочно-разгрузочных работах), приводящие к дроблению либо скалыванию частиц зерна
		Распыл (в результате истирания при многократном перемещении и трении отдельных зерен друг о друга и о поверхности рабочих органов транспортирующих машин)
		Просыпи (при транспортировании и погрузочно-разгрузочных работах)
Потери в качестве	Биологические	Дыхание (сопровождается выделением теплоты и, как следствие, повышением температуры, изменением химического состава, технологических достоинств)
		Развитие микроорганизмов (сопровождается активизацией дыхания зерна, накоплением токсинов, снижением технологических и семенных достоинств либо оно может стать вообще непригодным для переработки)
		Загрязнение продуктами жизнедеятельности грызунов и птиц
	Механические	Травмы

В настоящее время в России существует общая направленность аграрного производства на снижение потерь зерновых на всех этапах жизненного цикла – от производства до потребления, а также повышение сборов урожая. Однако уменьшение потерь требует значительных инвестиций. В перспективе инновационные технологии последних лет, в том числе интернет вещей, блокчейн и BigData могут

стать хорошим инструментом для решения проблемы снижения потерь зерновых, развития техники для первичной переработки и хранения зерна.

В процессе хранения зерновых, не достигших кондиционной влажности, одним из наиболее опасных является развитие микроорганизмов. Так поражение зерна микроорганизмами грибной и бактериальной этиологии способствует ухудшению качества зерна, его технологических показателей, потерям сухого вещества, загрязнению высокотоксичными и канцерогенными продуктами метаболизма микроскопических грибов – микотоксинами [18, 111, 157, 210, 255, 261, 346].

Оценка качественных показателей зерновых, убираемых на территории России [111, 219] (таблица 1.2), свидетельствует от том, что 5-15% убираемого урожая не может быть использовано как в пищевых, так и в кормовых целях.

Таблица 1.2 - Оценка качества зерна, убираемого в России [111, 219]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Объём исследованного зерна, млн т	12,4	20,6	21,0	31,9	19,1	58,8	78,1	72,1	95,1	105,1	112,1
Объём зерна не соответствующего требованиям по показателю заражённости, млн т	2,4	2,6	1,6	6,3	5,1	8,0	2,3	3,4	5,2	7,4	6,1

Проводимые исследования, в том числе специалистами ФГБУ «Россельхозцентр», показывают обострение проблемы, вызванной заражённостью зерна фузариозом [111].

Заражение зерна может происходить в процессе созревания, уборки, транспортировки, послеуборочной обработки, а также в процессе хранения. При этом внешние условия, такие как высокая относительная влажность (более 71%), а также высокая (выше 15 °С) температура наружного воздуха. За время хранения (от 3 до

6 мес.) в неблагоприятных условиях поверхностное заражение зерна токсикогенными грибами может увеличиться в 35 - 40 раз, внутри семенное - в 3 - 4 раза [111, 276].

Основу сохранения инфекций различных болезней сельскохозяйственных культур составляет некачественный семенной фонд. Так семенами передается более 60% заболеваний сельскохозяйственных культур.

При этом области поражения, вызываемые различными возбудителями, отличаются. Поражению могут подвергаться как оболочки семян, так и эндосперм или зародыш зерновки. В первом случае инфекция называется поверхностной, во втором – глубинной [111]. Болезни, вызываемые несовершенными грибами - факультативными паразитами или сапрофитами, проявляются в основном на ослабленных растениях [111, 267, 276, 327, 329-334].

Сохранению факторов риска, способствующих заражению зерна в процессе выращивания, являются: сокращение объемов протравливаемого семенного зерна; нарушение культуры севооборота; неверный выбор предшественника.

В случае благоприятных условий уборки, поддержании требуемых условий хранения (кондиционная влажность зерна, температура менее 10 °С) не будет наблюдаться развитие плесеней хранения. При этом преобладающими инфекциями будут возбудители полевой микрофлоры [111].

Нарушение условий хранения пагубно влияет на состояние зерновой массы. Так, даже при превышении влажности хранимого зерна на 1-2 % выше кондиционной начинается активный рост плесневых грибов и резкое сокращение времени безопасного хранения продукта. Температура хранимой зерновой массы также существенно влияет на развитие патогенной микрофлоры.

Интервал температур от 22 до 35 °С является оптимальным для их жизнедеятельности в зерне. Жизненные процессы патогенной микрофлоры находятся в активном состоянии в широком диапазоне температур (от 10 до 40 °С). Особую опасность представляет ситуация, когда влажность зерна повышается на 1-2%, а температура находится в пределах от 10 до 22 °С. Тогда активное размножение плесне-

вых грибов сменяется вялым плесневением, что означает медленное нарастание инфекции, сопровождающееся внедрением микрофлоры во внутренние ткани зерновки. Если такие условия длятся более 10-15 дней - семенное зерно теряет посевные качества, а продовольственное становится токсичным, содержание клейковины снижается на 28-52%, качество ее претерпевает существенные изменения [111]. Указанное развитие жизнедеятельности патогенной микрофлоры ведет к таким последствиям, как потери сухого вещества, снижение товарной ценности зерна.

Поражение зерна и комбикормов различными видами грибов значительно влияет на их качественные показатели и ограничивает использование вплоть до исключения зараженной партии, а также вызывает болезни и падеж сельскохозяйственных животных и птицы. Помимо потерь урожая и изменения химического состава, грибы загрязняют зерно токсинами [111, 155, 162, 276, 329, 330].

Наиболее опасны токсины представителей родов Fusarium, Aspergillus, Penicillium. Большинство штаммов фузариумов в Европейской части России продуцируют вомитоксин, дезоксиниваленон – ДОН, и зеараленон, в Сибири и на Дальнем Востоке наиболее опасный фузариотоксин Т-2. Виды родов Penicillium (P. expansum, P. urticae, P. cyclopium) и Aspergillus (A. flavus, A. parasiticus) вырабатывают афлатоксины, токсический эффект которых и степень накапливания в организме многократно превышает Т-2 фузариотоксин [111, 158].

Существуют различные методы обеззараживания зерновой массы в процессе послеуборочной обработки. Юсупова Г.Г. дает следующую классификацию методов обеззараживания (рисунок 1.5) [276].



Рисунок 1.5 - Классификация методов обеззараживания зерна и продуктов переработки [276]

При этом сушка до кондиционной влажности является основным технологическим приемом, применяемым практически для всего объема зерна, идущего на хранение. В случае соблюдения условий хранения зерно кондиционной влажности может храниться без потери качества.

1.2 Способы сушки зерна

1.2.1 Основы сушки

Сушка зерна предполагает продувание обрабатываемого слоя агентом сушки с низкой относительной влажностью, что приводит к испарению влаги в зерне, а затем ее удалению. Поскольку способы сушки могут иметь большое влияние на качество зерна или семян, важно понять некоторые основы сушки зерна.

Влагоудаление. В зерне влажность присутствует в двух состояниях: на поверхности зерна, «поверхностная влажность» и внутри ядра, «внутренняя влажность». Поверхностная влажность легко испаряется при воздействии горячим воздухом. Внутренняя влажность испаряется намного медленнее, потому что она сначала должна перейти от ядра к внешней поверхности. В результате поверхностная

влажность и внутренняя влажность испаряются с различной скоростью. Это приводит к разделению процесса сушки на периоды в зависимости от скорости сушки. Скорость сушки определяется тем, как быстро снижается влагосодержание в зерне. Обычно выражается в процентах влаги, удаляемой в час.

Кривая сушки (рисунок 1.6 [201, 205]), показывает, как изменяется влажность зерна ($W_з$) и температура зерна ($T_з$) в процессе сушки. Как видно по диаграмме, скорость сушки не постоянна, а изменяется со временем. Температура зерна также изменяется со временем.

Из представленных графиков видно, что по времени сушку можно разделить на 3 периода:

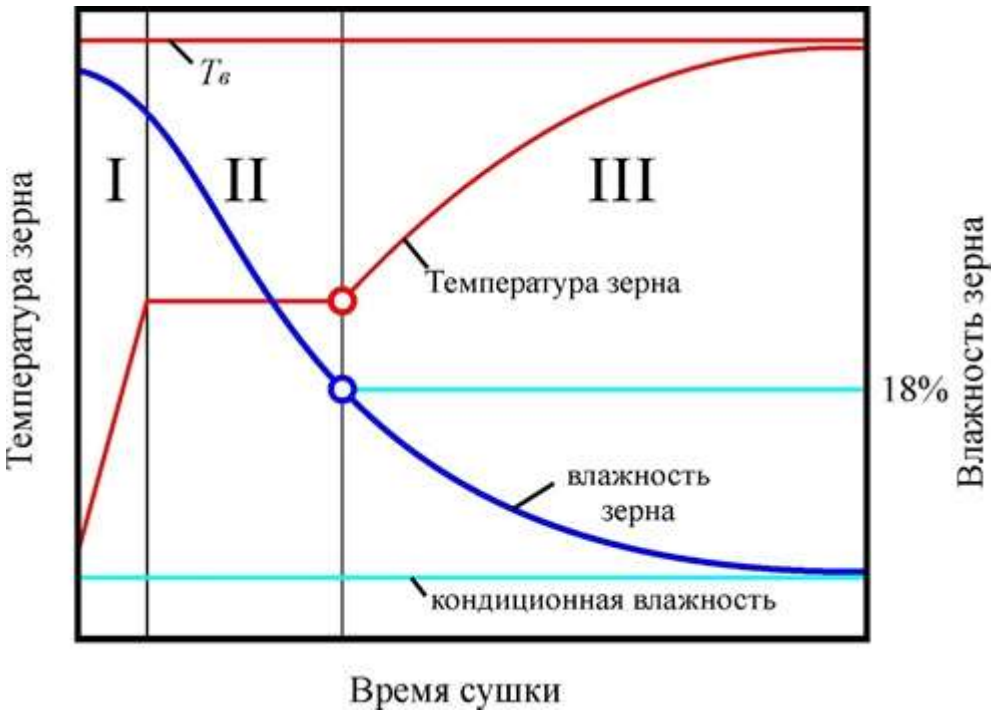


Рисунок 1.6 – Периоды сушки [201, 205]

Период предварительного нагрева (I – скорость сушки близка к 0): когда влажное зерно подвергается воздействию горячего воздуха, изначально наблюдается только очень незначительное изменение влагосодержания. Это происходит потому, что все тепло, передаваемое сушильном агентом, идет на нагрев зерна до температуры сушки.

Период постоянной скорости сушки (II – скорость сушки постоянна во времени): в этом периоде зерно находится при температуре сушки, а влага начинает испаряться с его поверхности. В течение этого периода все тепло от агента сушки используется идет на испарение поверхностной влаги, и количество влаги, удаляемой из зерна, является постоянным во времени. Поэтому он называется периодом постоянной скорости. В этот период температура зерна также постоянна.

Период убывающей скорости сушки (III – скорость сушки уменьшается со временем): в процессе данного периода требуется время, для переноса влаги на поверхность, а скорость ее испарения больше не постоянна. В результате скорость сушки снижается, а часть тепла от сушильного агента нагревает зерно. Для пшеницы, ячменя, тритикале, овса, риса период падающей скорости обычно начинается с 17-18% влажности.

Ориентируясь на эту влажность 18% и руководствуясь характеристикой кривой сушки, можно сделать несколько рекомендаций в отношении процедур сушки зерна, а также разработке сушильного оборудования. Эти руководящие принципы могут использоваться независимо от того, высушено ли зерно естественным образом или с помощью зерносушилок.

При влажности зерна выше 18% скорость сушки может быть увеличена путем обеспечения более высокой температуры (в пределах допустимого уровня) или снижения влагосодержания сушильного агента без существенных изменений температуры зерна. При влажности зерна ниже 18% увеличение температуры сушилки в воздухе не увеличит скорость сушки, однако увеличит температуру зерна и потенциально может ему повредить. Для интенсификации сушки на этом этапе возможно применение электрофизических воздействий.

В случае сушки зерна семенного назначения, температура агента сушки не должна превышать 43ºС, независимо от влажности зерна, чтобы избежать перегрева зерна и предотвратить губительное действие на зародыш.

Равномерность сушки. В течении всего процесса сушки сохраняется изменчивость влажности отдельных зерен. Особенно сильно это проявляется в сушилках

с неподвижным слоем зерна, так как на входе агента сушки происходит более интенсивный тепло-влагопренос. Для получения высоких качественных показателей зерна или семян следует избегать неравномерности сушки. Во всем объеме сушильной камеры должна быть одинаковая скорость сушки; допустимая неравномерность сушки ±% (при конечной влажности 14%), а допустимая неравномерность нагрева зерна 3-4°С [127, 154, 174, 180, 189, 195]. Съем влаги за один проход через сушилку не должен превышать 6% для большинства злаковых и 3-4% для бобовых, а также кукурузы, риса проса и гречихи. При несоблюдении этого требования зерна сморщиваются или растрескиваются [237, 246, 271, 296].

Частое перелопачивание при сушке естественным способом, перемешивание зерна в сушилках с неподвижным слоем или циркуляция в рециркуляционных сушильных камерах повышают равномерность сушки, минимизируют повторное увлажнение высушенных зерен и тем самым поддерживают качество зерна.

Отлежка. При прекращении воздействия на зерно сушильным агентом или другими факторами, происходит перераспределение влаги как внутри зернового слоя, так и внутри отдельных зерен из-за диффузии. При этом скорость влагообмена различна и определяется совокупностью многих факторов. После возобновления сушки, скорость сушки становится выше по сравнению с непрерывной сушкой. Процесс прерывания периодически называется отлежкой. Таким образом, отлежка также обеспечивает минимизацию градиентов влажности в зерновом объеме, которые возникают при сушке в некоторых типах сушилок.

Рекомендуется поддерживать качество зерна, включая период отлежки, чтобы обеспечить перераспределение внутренней влаги в зерне. В современных рефрижераторных зернохранилищах зерно не непрерывно высушивается, а проходит цикл сушки с последующим отлежкой. Это повышает скорость сушки, качество зерна и снижает энергетические затраты.

1.2.2 Классификация способов сушки

На основе применения представленных технологических приемов и представленных этапах сушки, приводят различные варианты классификации способов сушки [164, 201, 330, 353].

Непосредственный выбор зависит от физического состояния сырья, его химического состава, требуемых свойств конечного продукта и экономичности процесса.

По способу воздействия сушильного агента:

– естественная сушка — сушка на открытом воздухе при естественном освещении, без влияния человека на факторы, интенсифицирующие процесс (температуры продукта и сушильного агента (воздуха), давление, скорость движения сушильного агента, влажность и т.д.). Используется для сушки плодов, ягод, грибов, рыбы в регионах с подходящими климатическими условиями;

– искусственная сушка — производится в специальных аппаратах (сушильных установках), с принудительным изменением факторов, влияющих на интенсивность процесса (температура, давление влажность, геометрические размеры объекта сушки и т.д.).

По давлению в рабочей камере:

– атмосферная — сушильным агентом является, как правило, атмосферный воздух с отклонением давления в сушильной камере не выше 49 МПа.

– вакуумная — сушка производится в вакууме.

– под избыточным давлением.

По способу подвода тепла к влажному материалу сушилки классифицируются на:

– конвективные — тепловая энергия передается конвекцией;

– кондуктивные (контактные) — тепловая энергия передается с помощью теплопроводности;

– волновые:

– терморадиационные — тепловая энергия передается с помощью термоизлучения;

– высокочастотные — тепловая энергия преобразуется из электрической внутри высушиваемого материала;

– акустические

– комбинированные — передача тепла осуществляется с помощью комбинаций вышеупомянутых способов.

В зависимости от направления движения высушиваемого материала и сушильного агента:

– прямоточные — направление движения высушиваемого материала и сушильного агента совпадает;

– противоточные — направление движения высушиваемого материала и сушильного агента противоположное;

– перекресточные — направление движения высушиваемого материала перпендикулярно направлению сушильного агента.

По виду сушильного агента:

– аппараты, использующие нагретый воздух;

– установки, использующие дымовые или инертные газы;

– установки, используемые смесь воздуха с дымовыми газами;

– установки, используемые перегретый или насыщенный пар;

– установки, использующие жидкий теплоноситель;

– установки, использующие электрической ток.

По способу нагрева сушильного агента:

– установки с паровыми калориферами;

– установки с огневыми калориферами;

– установки с топками на жидком топливе;

– установки с топками на газовом топливе.

По кратности использования сушильного агента:

– с однократным использованием нагретого воздуха;

– с многократным использованием нагретого воздуха.

По виду объекта сушки:

– для твердых материалов (крупных, мелких, пылевидных);

– для гибких материалов (нитей, плёнок, тканей, нетканых материалов);

– для жидких материалов;

– для пастообразных продуктов.

По режиму работы:

– периодического действия;

– непрерывного действия.

По гидродинамическому режиму:

Различают сушилки с неподвижным, взвешенным и перемешиваемым слоем материала.

По конструкции:

Камерные, шнековые, пневматические трубные, тарельчатые, роторные, барабанные, ленточные, шахтные, вихревые, кипящего слоя, аэрофонтанные, вальцовые, вибрационные, распылительные и т.д.

В отношении сушки сельскохозяйственной продукции применяются практически все из представленных способов сушки.

1.2.3 Выбор сушильного оборудования

Ввиду огромного выбора типов сушилок, которые возможно использовать для большинства продуктов, выбор лучшего типа – это сложная задача, которую не следует воспринимать легкомысленно и не следует оставлять полностью поставщикам сушильного оборудования, которые обычно специализируются только на нескольких типах сушилок. Пользователь должен проявлять активную роль и использовать опыт поставщиков, а также масштабные средства сбора данных и выбора, которыми можно произвести сравнительную оценку нескольких вариантов. Нерациональный выбор сушильного оборудования для конкретного процесса может привести к низкой эффективности сушки, независимо от того, насколько хо-

рошо она разработана конкретная установка. Стоит также иметь в виду, что изменения в составе или физических свойствах обрабатываемого продукта могут влиять на его характеристики сушки, качество обработки и т.д. В случаях, когда это возможно, испытания оборудования должны проводиться на реальном исходном материале, а не имитированном.

При выборе оборудования для каждой конкретной технологической линии необходимо учитывать ряд особенностей включая стадии предварительной обработки и последующие стадии обработки (утилизацию отработанного агента сушки и их рекуперацию, дальнейшую переработку продукции, охлаждение продукта и т. д.). Оптимальный выбор сушилки в значительной степени зависит от правильного описания процесса на этих этапах. Требования к качеству продукции не всегда позволяют выбрать наименее дорогостоящий вариант, основанный исключительно на соображениях тепло- и массопереноса. Так сушка смесью топочных газов оказывает влияние на качественные показатели продукции. Часто требования к качеству продукции оказывают чрезмерное влияние на процесс отбора

Простые деревья решений выбора сушилок периодического и непрерывного действия, предложенные [353], представлены на рисунках 1.7 и 1.8.

В настоящее время подбор оборудования для тепловой обработки опирается не только на обеспечение заданной производительности, но и на достижение оптимального протекания процесса обработки по заданным факторам. В качестве факторов может выступать минимальные энергозатраты, максимальная скорость сушки, максимальная прибыль и другие, в зависимости от конкретного хозяйства. Современное оборудование позволяет применять солнечную энергию, тепловые насосы, электрофизические факторы и т.д.

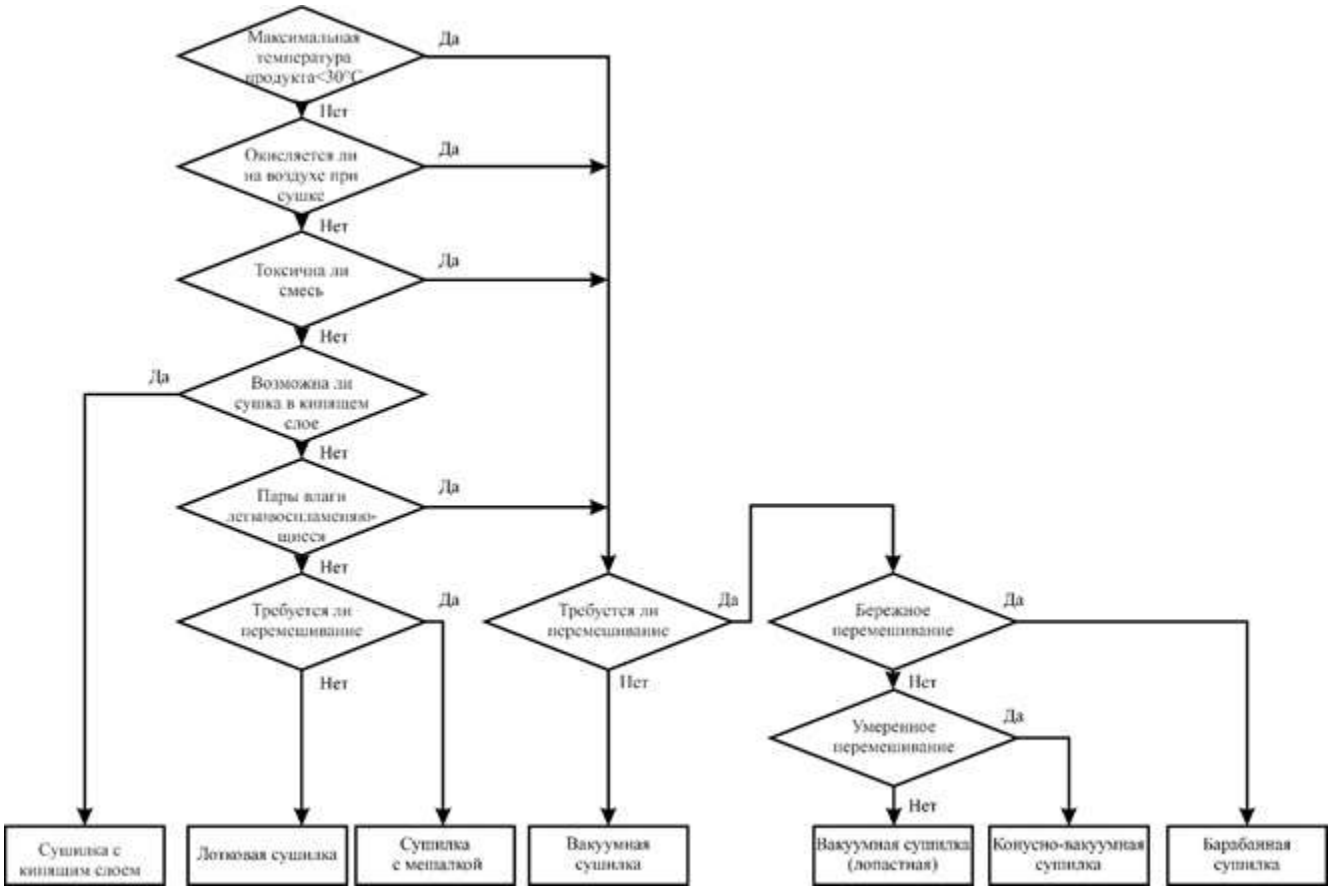


Рисунок 1.7 – Дерево решений для выбора сушильного оборудования [353]

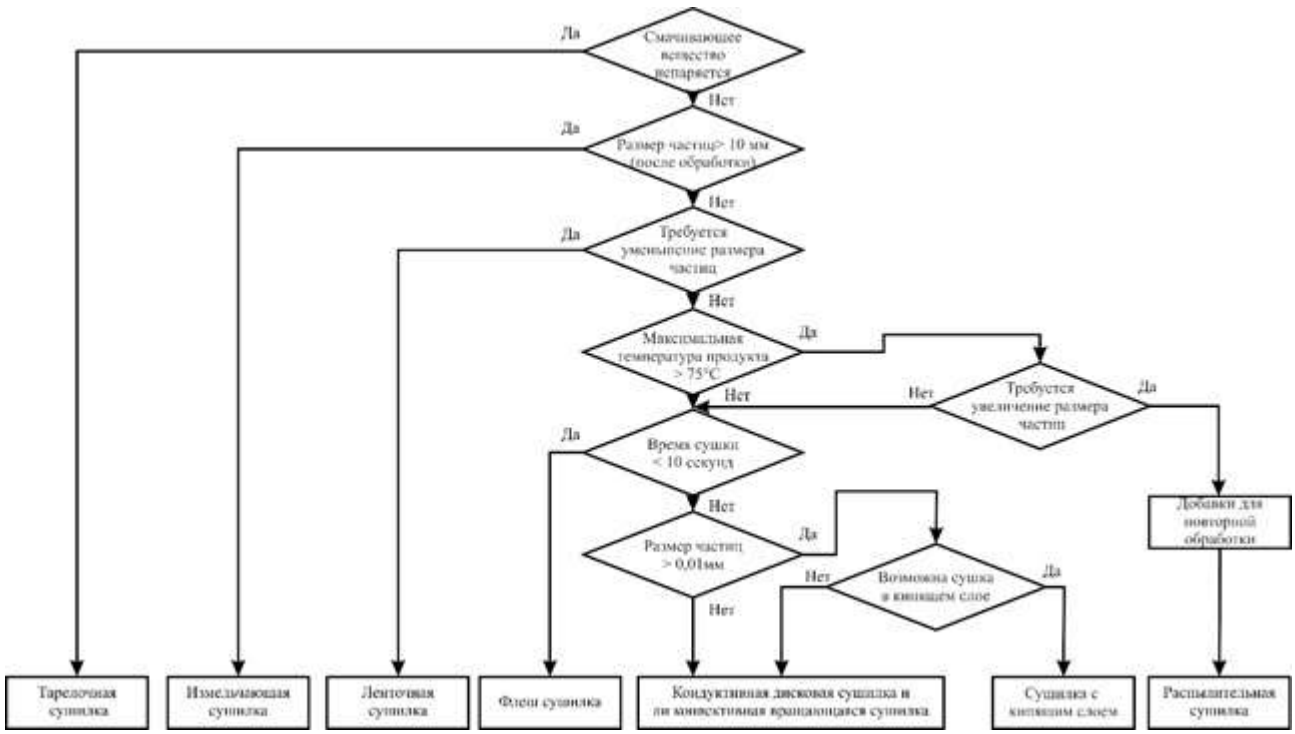


Рисунок 1.8 – Дерево решений для выбора поточного сушильного оборудования [353]

1.2.4 Интенсифицирующие факторы

В основе интенсификации процессов тепловой обработки сельскохозяйственных материалов (сушка, обеззараживание, поджарка) должны лежать пути, учитывающие физические закономерности явлений внутреннего и внешнего тепло – и влагообмена. Наибольший эффект на интенсификацию указанных процессов можно получить за счет сочетания нескольких факторов (технологических приемов), используемых для тепловой обработки зерна в эксплуатируемых и проектируемых установках. Обобщение литературных данных [1-4, 19, 24, 36, 40, 42, 110, 112, 113, 158-161, 174, 184, 213, 227, 229, 230, 233, 248, 256, 278, 298, 316, 328, 362, 368] позволяет свести пути интенсификации тепловой обработки к следующему виду (рисунок 1.9 [51]):

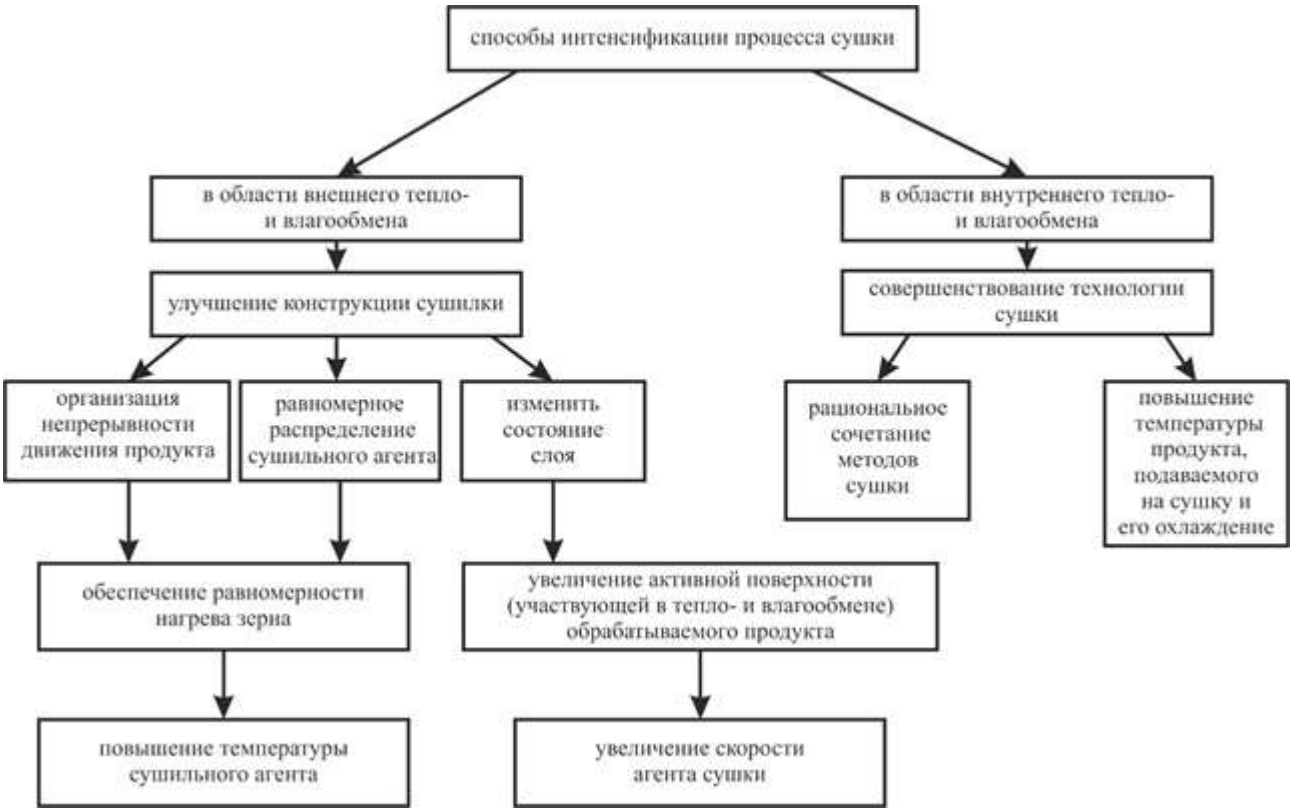


Рисунок 1.9 – Пути интенсификации термической обработки сельскохозяйственной продукции [51]

В области внутреннего влагопереноса интенсификации процессов можно добиться путем повышения температуры зерна и исключения тормозящего действия

термовлагопроводности. Для этого могут быть применены электротехнологические воздействия, такие как СВЧ, ИК. Комбинирование этих и других факторов, таких как аэроионы, озон, УЗ и т.д., наряду с использованием импульсных воздействий могут обеспечить дополнительную выгоду как в области энергетических затрат, так и в производительности процесса. Так применение микроволнового воздействия приводит к получению целого ряда технических преимуществ соответствующих технологических процессов [27, 51, 100, 172, 176, 196, 199, 211, 235, 237, 270, 283, 291, 293, 297, 307, 313, 314]:

– существенно повышается однородность влажности по объему обрабатываемого продуктов, увеличивается сохранность пищевых продуктов в процессе сушки и термической обработки;

– при необходимости при СВЧ-сушке может быть снижен уровень конечной влажности высушиваемой продукции с меньшими затратами, по сравнению с конвективной обработкой;

– удается значительно снизить время сушки и уменьшить энергоемкость техпроцесса (особенно для процессов, в которых необходимо получение малых конечных влажностей).

В области внешнего влагообмена интенсифицировать процесс можно путем повышения температуры и скорости агента сушки, а также увеличения активной поверхности зерен, участвующей в процессе тепло- и влагообмена с агентом сушки. Для этого применяются сушильные аппараты со взвешенным слоем материала с различной гидродинамикой, которая определяет время пребывания высушиваемого материала в аппарате, допустимую температуру сушильного агента, интенсивность протекания процессов тепло- и массообмена, энергетические затраты на сушку. Использование активных гидродинамических режимов позволяет существенно интенсифицировать процесс сушки без снижения экономической эффективности, обеспечивать высокое качество готового продукта, полную безопасность и технологичность процесса [5-7, 12, 250, 271, 301, 316, 327].

1.2.5 Критерий эффективности процесса сушки зерна

Выбор критерия эффффективности сушки зерна обосновывается текущей обстановкой и ориентированностью конкретного хозяйства. Так для хозяйств, ориентированных на выращивание больших партий зерновых и их реализацию критичным будет достижение минимальных затрат на сушку при соблюдении минимальных потерь. В качестве критерия эффективности сушки могут быть приняты скорость сушки, энергоемкость сушки (удельные энергетические затраты на испарение 1 кг влаги, либо удельные энергетические затраты на сушку тонны зерна).

1.3 Энергетические затраты на сушку зерна

Классические тепловые способы сушки зерна очень энергоемки (3,5-12 МДж/кг$_{исп.вл.}$), а установки, используемые для сушки зерна, зачастую физически изношены и не отвечают современным требованиям энергосбережения, способы усовершенствования конструкций зерносушилок исчерпаны, требуется разработка технологий и оборудования, обеспечивающего высокотехнологичную, энергосберегающую сушку. Сводные данные по энергоемкости нового сушильного оборудования, полученные по техническим характеристикам, представляемым разработчиками оборудования представлены в приложении А. Следует принять во внимание, что многие разработчики, такие как Petkus (Германия), Cimbria (Дания), Дозагрант (РФ), АВГ (РФ), Stela Laxhuber GMBH (Германия), Tornum (Швеция), Altinbilek (Турция) и некоторые другие не предоставляют данные для детального анализа энергоемкости сушки. В лучшем случае эти производители оборудования предоставляют данные по расходу теплоносителя на сушку либо указывают только базовую производительность. Стоит отметить и то, что для одного и того же сушильного оборудования могут применяться различные теплогенераторы (по мощности и виду теплоносителю), что существенно влияет на энергоемкость процесса сушки. Кроме того, все данные, предоставляемые разработчиками в большей степени характерны для идеальных условий с точки зрения температуры окружающей среды, влагосодержания наружного воздуха, параметров теплоносителей и т.д. В реальности же показатель энергоемкости будет выше на 10-20%.

Более детально зависимость энергоемкости влагоудаления в реальных условиях представлена в работах Малина Н.И. [203-205]. Так в качестве примера в таблице 1.3 представлено количество испаряемой влаги и суммарный расход теплоты при сушке зерна пшеницы различной влажности в зерносушилке ДСП-32[204].

При расходе теплоты в зерносушилке учитываются следующие затраты: затраты теплоты на испарение влаги; потери теплоты на нагрев зерна; потери теплоты с отходящими газами (с отработавшим агентом сушки); потери теплоты в окружающую среды (через нагретые поверхности); потери теплоты на нагрев транспортных средств; потери теплоты вследствие неполного сгорания топлива (от механического и химического недожога).

Таблица 1.3 – Количество испаряемой влаги(ΔW) и суммарный расход теплоты (Σq) при сушке зерна пшеницы различной влажности в зерносушилке ДСП-32[204]

w_0, %	w_1, %	ΔW, кг/час	Σq, кДж/ $кг_{исп.вл.}$
16,00	11,81	1520,3	7531,7
18,00	12,82	1920,3	6022,1
20,00	14,00	1901,4	5128,7
22,00	15,36	22,32,6	4561,2
24,00	16,92	2510,4	4161,2
26,00	18,69	2727,0	41,98,9
28,00	20,63	2876,8	3980,3
30,00	22,84	2969,3	3853,4
32,00	24,80	3063,7	3737,4
34,00	26,80	3147,5	3637,9
36,00	28,80	3235,8	3538,7

Затраты теплоты на испарение влаги, Q_1, кДж/ч, могут быть рассчитаны по формуле:

$$Q_1 = \Delta W(r + \Delta r), \quad (1.1)$$

где ΔW –количество испарившейся влаги, кг/ч; r – скрытая теплота парообразования воды при температуре зерна $T_з$, кДж/ кг$_{исп.вл.}$, определяемая по зависимости:

$$r = 2500 - (2{,}3 + 0{,}0014 \cdot T_з) \cdot T_з. \quad (1.2)$$

Основные способы снижения энергоемкости сушки следующие: повышение температуры сушильного агента и увеличение его расхода (интенсификация); сушка неподогретым воздухом в бункерах-зернохранилищах; герметизация и термоизоляция сушилки, каналов и воздуховодов; регенерация тепла из отработанного теплоносителя (существенное снижение энергоемкости; снижение скорости сушки); наложение неоднородных электрических полей (снижение производительности); исключение охладительных устройств из сушильных агрегатов (драйарация); предварительный подогрев зерна (увеличение энергоемкости установки); рециркуляция отработанного теплоносителя (усложнение конструкции); применение электромагнитных ВЧ- и СВЧ-полей (повышение требований безопасности персонала; увеличение энергоемкости установки; усложнение конструкции); сушка озоновоздушной смесью (повышение требований безопасности персонала; усложнение конструкции; повышенный износ за счет окисления металлических частей).

С точки зрения увеличения интенсивности тепло- влагообмена сушильного оборудования одним из наиболее применяемых является использование разрыхления обрабатываемого слоя тем или иным способом (заторможенный, падающий, псевдоожиженный, восходящий слой и т.д.). Одним из вариантов интенсификации тепло- массопереноса в псевдоожиженном слое может быть применение электромагнитного поля микроволнового диапазона. Проведенные экспериментальные исследования [296, 331, 332, 317, 366] позволяют судить об эффективности подобной комбинации. На рисунке 1.10 [342] приведены сравнительные характеристики энергоэффективности сушки сои в зависимости от толщины обрабатываемого слоя, скорости агента сушки, его температуры и удельной мощности воздействующего электромагнитного поля.

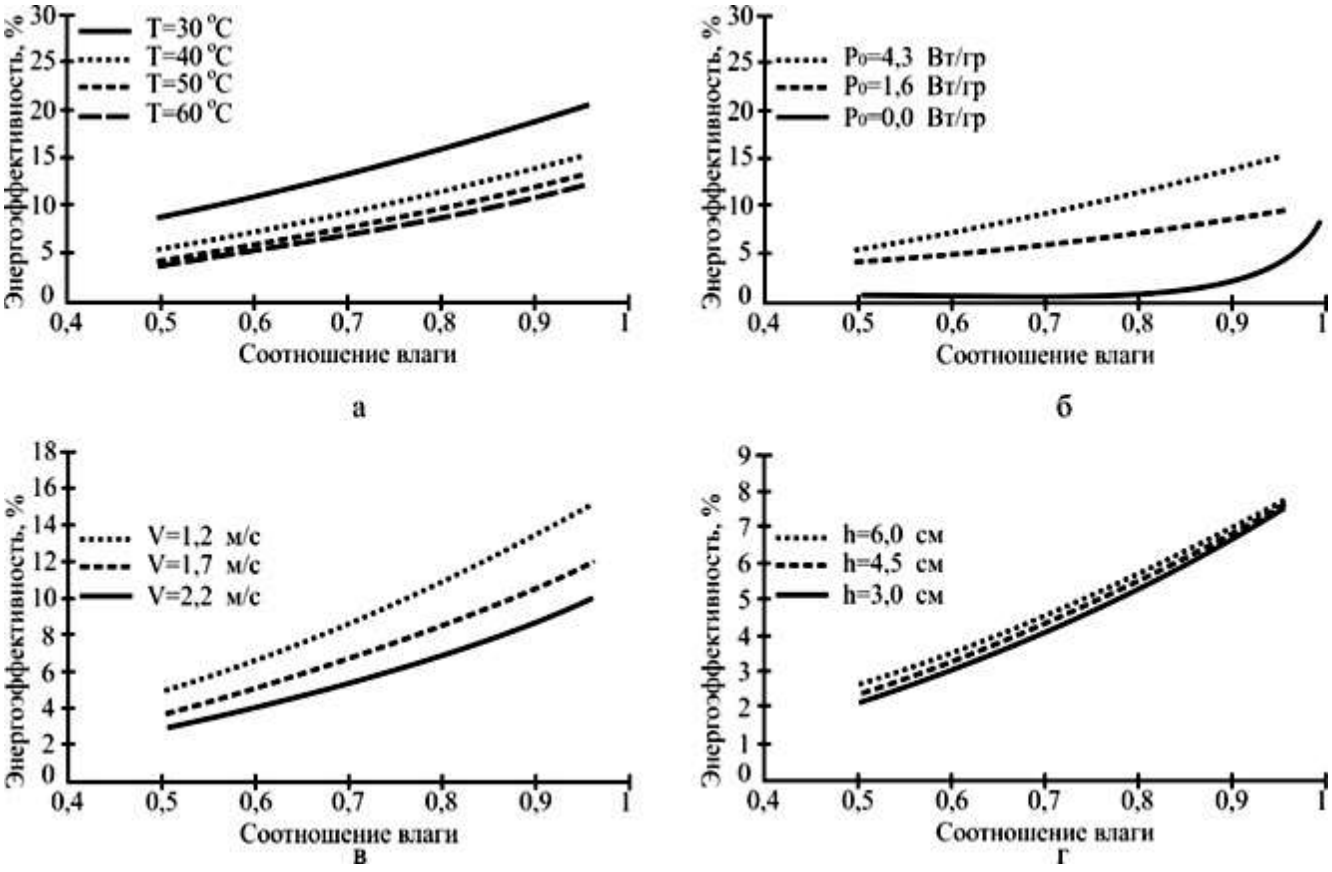


Рисунок 1.10 – Энергоэффективность сушки зерна в псевдоожиженном слое с применением ЭМП СВЧ [342]

Несмотря на то, что применение псевдоожиженного и взвешенного слоя слабо применимо при обработке промышленных партий зерна, его применение может быть обосновано при обработке партий посевного материала. Применение в этом случае электрофизических факторов воздействия также позволит достичь требуемых параметров качества при соблюдении технологических требований.

В общем же случае, зависимость энергетических затрат на сушку зерна при различном состоянии слоя или применяемой технологии для наглядности сравнения принято выражать через критерий сушки или критерий эффективности влагосъема. Установлено, что коэффициент сушки практически не зависит от температуры агента сушки и массовой доли агента сушки при сушке, в кипящем слое. Это связано с большой площадью соприкосновения агента сушки и обрабатываемого материала, а также тем, что агент сушки не успевает насытиться парами влаги, содержащейся в обрабатываемом материале.

Приведенный пример зависимостей воздействия микроволнового поля при сушке тонкого слоя отражает влияние электрофизических воздействий на скорость и энергоемкость процесса сушки. Принимая во внимание наличие широкого спектра возможных технологий интенсификации сушки зерна электрофизическими методами, стоит рассмотреть их подробнее.

1.4 Оборудование для сушки с применением электрофизических воздействий

Любая попытка повышения производительности зерносушильной техники будет сопряжена с капитальными затратами на новое оборудование, совершенствование существующего оборудования либо оптимизацию линий зернопереработки. Таким образом, прежде всего следует стремиться к разработке технологий и применению технологического оборудования, обеспечивающего максимальное сокращение удельных затрат на сушку зернового материала при сохранении в заданных пределах его показателей качества. Т.е. внимание стоит обращать не только на физико-химические и технологические закономерности, а также на экономические показатели, являющиеся основными для хозяйств.

Производительность зерносушильного оборудования можно повысить увеличением количества и геометрических размеров аппаратов, так и интенсификацией за счет применения внешних факторов [42, 177, 218, 222, 247, 259]. Снижение энергоемкости процесса сушки зерна возможна за счет применения электрофизических факторов. К таким факторам можно отнести использование в качестве агента сушки озоно-воздушной смеси с различной концентрацией озона, насыщение агента сушки аэроионами различной полярности и с различной концентрацией, применение ультразвука, инфракрасного нагрева, ВЧ и СВЧ полей.

Для определения наиболее перспективного направления исследования разработки оборудования сушки зерна рассмотрим некоторые варианты применения электротехнологий на существующем и разрабатываемом оборудовании.

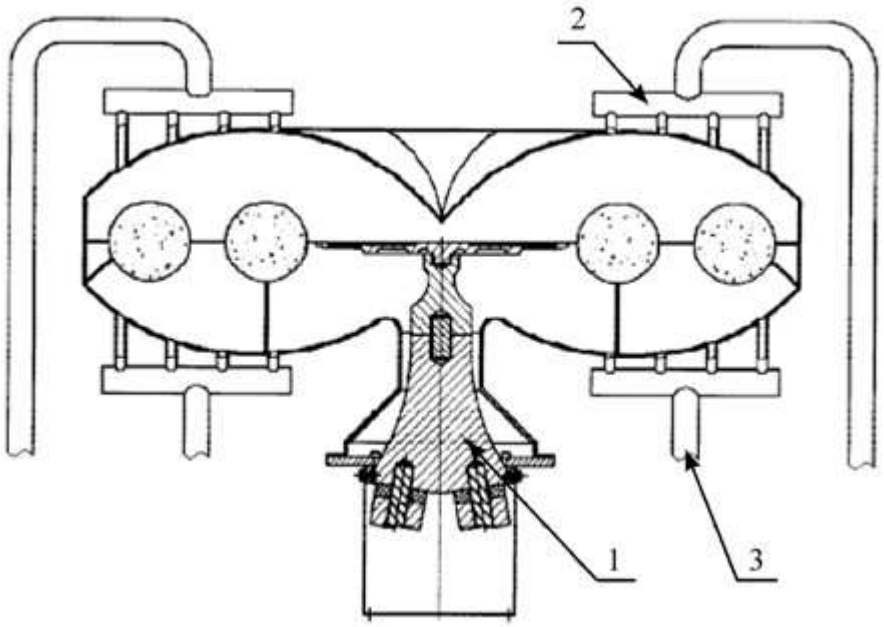
1.4.1 Ультразвук

В Алтайском ГАУ разработано устройство для ультразвуковой сушки. Данное устройство для ультразвуковой сушки, содержащее тороидальный сетчатый

контейнер для высушиваемого материала, установленный в корпусе сушилки и излучатель акустических колебаний ультразвуковой частоты, отличающееся тем, что излучатель ультразвуковых колебаний выполнен в виде изгибно-колеблющегося диска и соединен с пьезоэлектрическим преобразователем, питаемым электронным генератором ультразвуковой частоты, внутренняя поверхность корпуса сушилки образована вращением вокруг акустической оси изгибно-колеблющегося диска двух пересекающихся осесимметричных парабол, имеющих общий фокус, автороидальный контейнер выполнен в виде двух секций, расположенных в горизонтальной плоскости, причем одна из тороидальных секций контейнера находится в области общего фокуса парабол, а вторая расположена на равном удалении от боковой стенки сушильной камеры и первой секции [268, 269 318]. На рисунке 1.11 показана конструктивная схема ультразвуковой сушилки, реализованная указанными авторами на практике. Для повышения эффективности электроакустического преобразования пьезоэлектрический преобразователь выполнен в виде трехполуволновой ультразвуковой колебательной системы с концентратором 7 [318]. Для повышения эффективности сушки система снабжена устройствами подачи 3 и отвода 2 сушильного воздуха. В данной установке реализуются несколько режимов сушки: конвекционно-ультразвуковая; вакуумно-ультразвуковая; сушка с попеременным изменением давления в сушильной камере [268, 269].

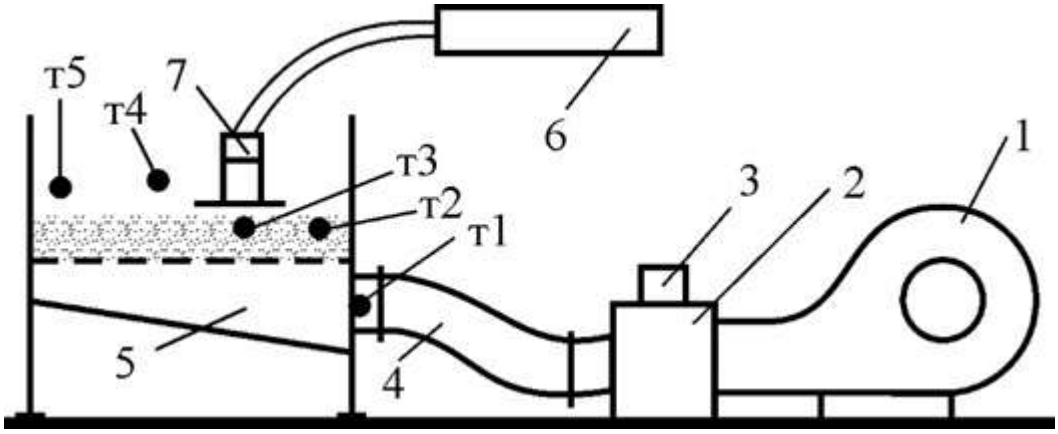
Данное устройство прежде всего предназначено для сушки лекарственных растений, и семян некоторых растений. Кроме того, может быть использовано для предпосевной стимуляции.

А.В. Голубкович и С.А. Павлов исследовали режимы сушки семян с применением УЗ-излучений. Ими проводилось исследование эффективности сушки семян зерна. Для этого была разработана лабораторная установка, технологическая схема которой представлена на рисунке 1.12[158].



1 – дисковый излучатель, 2 – устройство отвода сушильного воздуха,
3 – устройство подачи сушильного воздуха

Рисунок 1.11 – Сушильная камера с фокусировкой ультразвуковых колебаний на высушиваемом материале [268, 318]



1- вентилятор, 2 – калорифер, 3 – задатчик температуры, 4 – шланг,
5 – сушилка; 6 – генератор УЗ, 7 – излучатель УЗ, т1-т5 – точки контроля

Рисунок 1.12 – Технологическая схема лабораторной установки [158]

Авторами отмечается, что эффективность от воздействия ультразвуковых колебаний отмечается только в диапазоне 19-26%, при этом далее кривые сушки кон-

вективным способом и с применением УЗ сливаются. Таким образом можно сделать вывод о низкой эффективности применения ультразвука при сушке зерна большого объема. Также глубина обработки УЗ-колебаниями невелика и снижается по мере удаления от источника ультразвука.

Также исследователями (Michael Bantle, J.A. MosesTomas Joseph Nortonk, Alagusundaram Tiwari, Brijesh Kumar и другими) отмечается возможность применения УЗ-колебаний в пищевой промышленности [279, 303, 309, 323]. Потенциальные достоинства применения УЗ при сушке состоят в:

1) высокой интенсивности процесса влагопереноса;

2) возможности обеспечения качественной и эффективной сушки при низких температурах или принципиально без повышения температуры (исключение разрушения структуры, сохранение всхожести семян и т.п.);

3) возможность разработки самонастраивающихся ультразвуковых генераторов, что не требует пользовательского контроля над работой системы.

Наряду с указанными возможными преимуществами их реализация приводит к ряду сложностей, таких как:

1) необходимость создания акустических колебаний в воздушной среде с интенсивностями более 140 дБ;

2) необходимость создания сушильной камеры, обеспечивающей равномерное воздействие акустических колебаний по всему высушиваемому материалу.

1.4.2 Озон

Применение озона в процессах послеуборочной обработки зерна потенциально способно снизить зараженность микроорганизмами и насекомыми, а также продлить время безопасного хранения без негативного влияния на качественные показатели зерна. Также озоновоздушные смеси (ОВС) могут приемняться в качестве агента сушки.

Начиная с середины прошлого века ведутся активные исследования применения ОВС при сушке зерна. Подобными исследованиями занимались такие уче-

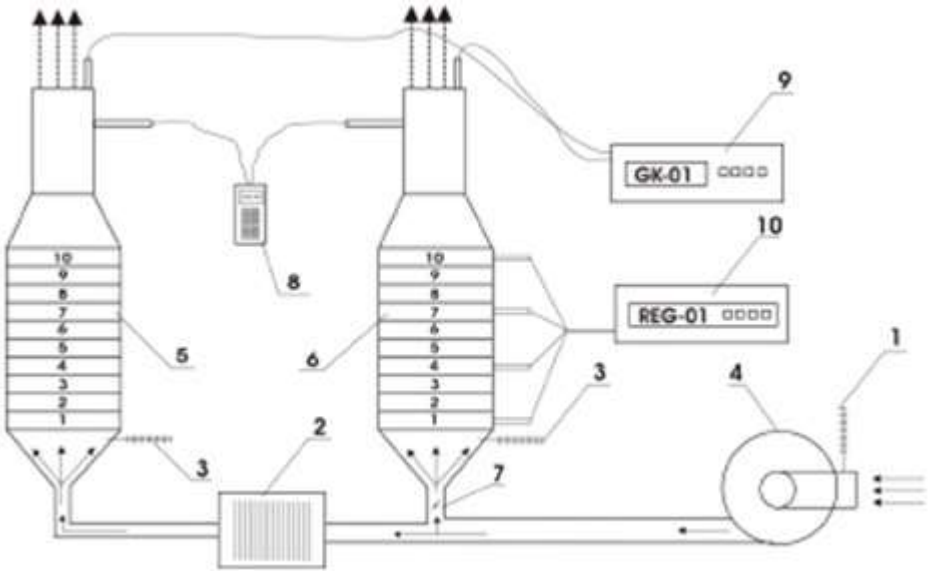
ные как Троцкая Т.П. (Гродненский СХИ); Голубкович А.В., Чижиков А.Г., Выгодский Ю.Н. (ВИМ); Аболтинс А., Палабинскис Ю., Лаува А. (Латвийский сельскохозяйственный университет); Глущенко Л.Ф., Глущенко Н.А. (НовГУ им. Ярослава Мудрого); Ксёнз Н.В. (ВНИПТИМЭСХ, ФГОУ ВПО АЧГАА); Рудобашта С.П., Нуриев Н.Н. (МГАУ) и многие другие [38, 45, 77, 88, 96, 97, 102, 136, 142, 145, 148, 160, 163, 165, 191, 209, 220, 221, 228, 254, 257, 258, 260, 272, 273? 294, 295, 305, 322, 341].

Так в Литовском НИИМЭСХе [165, 221] был разработан озонатор В-2,8-5-3-Л-01, применяемый для сушки активным вентилированием. Сушка проводилась для насыпи ячменя высотой 3 метра и начальной влажностью 25%. Удельная подача воздуха – 150–180 $м^3$/т·ч, ежесуточное озонирование в течение 1–2 часов при концентрации озона 15–30 мг/$м^3$. В ненастную погоду воздух подогревался. Данная установка показала снижение энергетических затрат на сушку по сравнению с сушкой активным вентилированием в1,86 раза.

В Латвийском сельскохозяйственном университете такими учеными, как А. Аболтинс, Ю. Палабинскис, А. Лаува разработана лабораторная установка, представленная на рисунке 1.13 [301]. Лабораторные эксперименты показывают, что эффективность сушки с использованием озонированного воздуха увеличилась примерно на 10%. Исследователи отмечают, что снижение потребления энергии возможно, если зерно активно высушивается при низких температурах воздуха. Кроме того, по сравнению с сушкой теплым воздухом применение ОВС оказывает положительное влияние на качество зерна.

В экспериментах было доказано, что эффективность от присутствия озона в агенте сушки проявляется при удалении связанной влаги и практически не отмечена при удалении свободной влаги на поверхности. Из разложения озона получается дополнительная энергия, которая способствует сушке зерна. Также отмечается, что присутствие озона в процессе сушки зерна увеличивало количество удаляемой влаги независимо от исходной влажности зерна, однако это справедливо

только после удаления влаги из межзернового пространства. При увеличении скорости подачи агента сушки эффективность применения озона снижается, поскольку начинает преобладать эффект сушки воздухом [301].



1 – термометр входящего воздуха, 2 – генератор озона, 3 – термометр для контроля температуры воздуха перед зерновыми кассетами, 4 – вентилятор, 5 – 10 кассет с зерном для сушки, 6 – 10 кассет с зерном для сушки без озонированного воздуха, 7 - задвижка, 8 – контроллер скорости воздушного потока (TESTO 400), 9 – оборудование для управления активным вентилированием активной зоны, 10 – оборудование регистрации данных REG-01

Рисунок 1.13 – Лабораторная установка для сушки зерна с использованием ОВС [301]

Также отмечалось бактерицидное действие и увеличение сроков безопасного хранения за счет снижения интенсивности жизнедеятельности микрофлоры. Максимальное сокращение количества грибов составило 92,86%, с уменьшением с 1,87 КОЕ/г до 0,13 КОЕ/г (обработка озоном пшеницы в течение 45 мин и сушка при температуре воздуха при 50 °С).

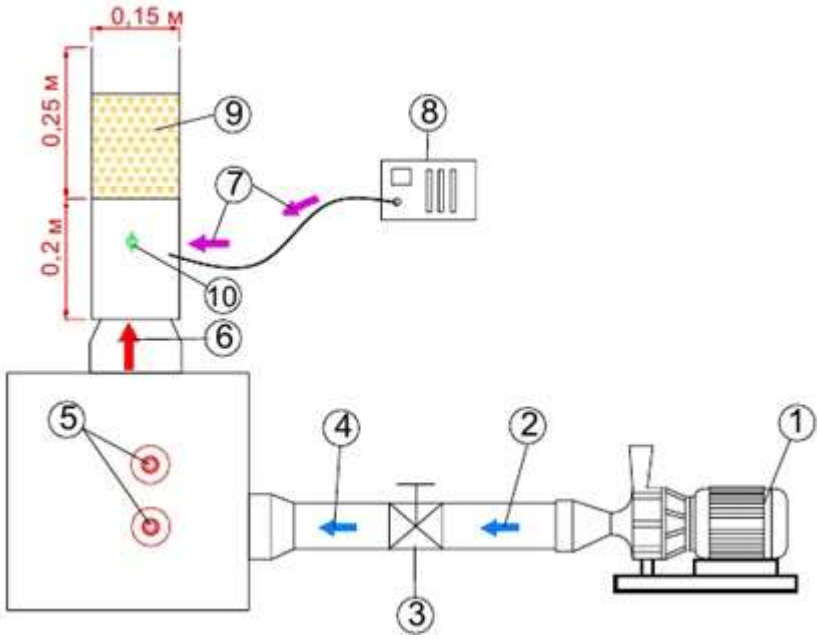
Впервые предположение об интенсификации сушки с использованием озона за счет разложения озона с выделением теплоты, впоследствии идущей способствующей влагоудалению, было предложено Троцкой Т.П. (Гродненский СХИ) [257,

258]. Эксперименты по сушке зерновых с начальных влажностей 23–30,5%, низкотемпературным агентом сушки (20–24 °С) показали, что скорость сушки с применением ОВС зависит не только от сорта и вида сельскохозяйственной культуры, но и от концентрации озона. Скорости сушки зерна за счет применения ОВС с концентрацией 2–10 мг/м^3 увеличивалась в1,5-2 раза [2].

Свойства озона, его образование в коронном разряде и использование для сушки и обеззараживания сельскохозяйственной продукции и животноводческих помещений изучалось Ксёнзом Н.В. (ФГОУ ВПО АЧГАА, ВНИПТИМЭСХ). При этом изучалось влияние концентрации и подачи ОВС, а также свойств используемого воздуха на процессы сушки и обеззараживания. Исследования проводились для ячменя влажностью 29–31% и высотой насыпи 0,21–0,43м при концентрации озона 2,4 – 10,1 мг/м^3. Полученные результаты свидетельствуют о снижении энергетических затрат на влагоудаление в 1,7–2,2 раза [38, 191].

Исследования, проводимые Голубковичем А.В. и Чижиковым А.Г. в ВИМ по сушке пшеницы, овса, ячменя с применением ОВС при концентрации озона 2–5 мг/м^3 подтвердили повышение температуры поверхности зерновки на 1–2 °С при распаде на ней озона, что отмечается как одна из причин интенсификации сушки [158-161]. Сушка проводилась активным вентилированием с подогревом агента сушки на 6–8 °С. Ученые также отметили снижение энергозатрат на удаление влаги, полученные данные несколько ниже, чем у предыдущих исследователей и составили 14–20%. Также, как и ранее, отмечено целесообразность применения ОВС для интенсификации удаления осмотически связанной влаги.

Учеными из Государственного университета западной Параны (Бразилия) (State University of Western Paraná) Granella, Suian.Jose, Christ, D., Werncke, I., Bechlin, T.R., Machado Coelho проводилось исследование влияния озона на процесс сушки и зараженность семян пшеницы. Схема разработанной ими лабораторной установки приведена на рисунке 1.14 [305].



1 – электродвигатель; 2, 4 – холодный воздушный поток; 3 – клапан;
5 – электрический нагреватель; 6 – горячий воздушный поток; 7 – зонный поток газа; 8 – генератор озона; 9 – зерновая колонка;
10 – датчик температуры

Рисунок 1.14 – Схема лабораторной установки сушки ОВС [305]

Результаты исследования сокращения количества грибов в образцах семян высушенных и озонированных семян пшеницы показали, что вслед за повышением времени воздействия O_3 и температуры воздуха для сушки, следует повышение фунгицидного эффекта. В указанной работе экспозиция воздействия озоном составила 45 минут при температуре агента сушки 50 °С, а наблюдаемое снижение обсемененности составило 1,73 и 1,70 КОЕ/г, что соответствовало снижению обсемененности на 92,86% и 91,07%. Эти результаты показывают, что озонирование, применяемое на начальных стадиях сушки, является перспективным методом для улучшения качества семян пшеницы, эффективно снижая зараженность грибами, не ухудшая их физиологических свойств.

Экспериментальные исследования сушки семян зерновых культур, проведенные Рудобаштой С.П., Нуриевым Н.Н. (МГАУ) при толщине обрабатываемого слоя 0,013 и 0,023м и концентрации ОВС 4–60 мг/м^3 для температур агент сушки от 20

до 45 °С свидетельствуют о том, что эффективность применения ОВС при сушке выше при низких температурах агента сушки [249]. Механизм интенсификации заключается в том, что озон, воздействуя на оболочку зерновки, повышает ее диффузионную проницаемость, что является следствием увеличения коэффициента массопроводности [249].

Также отмечено, что обогащение агента сушки одновременно озоном и аэроионами (отрицательные ионы кислорода, атомарный кислород) повышает его сушильный потенциал [38]. Такой воздух частично вступает в реакцию с водой в порах зерновки, создавая неустойчивые летучие вещества.

Несмотря на многочисленные исследования применения ОВС в процессах сушки, широкого распространения эта технология пока не получила. Это связано с рядом недостатков, связанных с использованием озона:

– озон является сильным окислителем и ядовит в больших концентрациях [155, 209]. Применение в присутствии человека нежелательно и даже опасно при превышении ПДК;

– так как повышение температуры агента сушки влияет на разложение озона и снижение его концентрации, существуют ограничения по нагреву агента сушки 249];

– положительное действие от применения ОВС происходит не сразу, а после воздействия в течение 20-45 минут [164, 2, 4, 259, 305].

– применение ОВС практически исключает комбинацию этой технологии с другими способами интенсификации [164];

– с увеличением влажности воздуха, в котором происходит разряд увеличивается концентрация легких ионов O_2^-,в то время, как концентрация озона снижается за счет рекуперации [164, 254];

– на применение озона также распространяются недостатки, обусловленные оборудованием, а именно барьерными озонаторами (низкий КПД барьерных озонаторов; усложнение конструкции; низкая надежность; загрязнение электродов

окислами азота, что предполагает усложнение технического обслуживания; большие габариты и вес установки [164].

1.4.3 Аэроионы

Первым, кто отметил влияние ионов воздуха, образующихся при прохождении воздуха через область электрического разряда, на живые организмы был Чижевский А.Л. В своей работе, в отношении сельского хозяйства, Чижевский исследовал и описал применение аэроионов в птицеводстве, животноводстве, пчеловодстве, растениеводстве, а также бытовой сфере.

В дальнейшем его исследования были продолжены другими учеными. Многими исследователями отмечается положительное влияние аэроионизации агента сушки на процесс сушки зерна [164, 256, 257, 285, 287]. При соблюдении норм предельно допустимой концентрации, и вследствие небольшого периода жизни аэроионы не опасны для обслуживающего персонала.

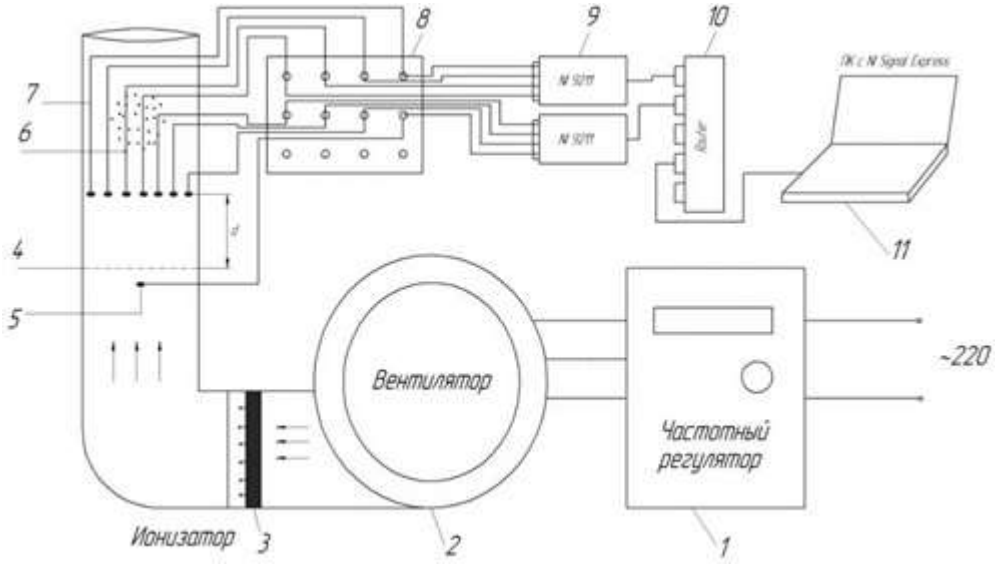
Для получения аэроионов для применения в технологических процессах используются озонаторы барьерного и коронного типов [163].

Коронный разряд прост в конструкции, малогабаритен, неограничен в разрядном промежутке, эффективен для получения аэроионов, концентрации озона малы [163].

В известных способах аэроионизации агента сушки воздух продувают через разрядный промежуток с напряженностью электрического поля в диапазоне $(2{,}5 \div 5{,}0) \cdot 10^5$ В/м. При это образуются заряженные частицы обоих знаков. Механизм воздействия агента сушки аэроионами различной полярности описывается учеными по-разному (электроосмос, снижение сопротивления мембраны, воздействие заряженного иона на связанную гидроксильную группу, информационное воздействие и т.д.), однако все сходятся во мнении, что использование ионизированного воздуха способствует интенсификации процесса сушки [1, 164, 356].

Одним из наиболее интересных и перспективных направлений применения аэроионов при сушке зерновых является периодическое насыщение агента сушки

аэроионами. При этом интенсификация сушки зачастую не снижается даже в моменты прекращения подачи аэроионов. От части это напоминает осцилирующее воздействие и отлежку, характерные для рециркулирующих зерносушилок, с той разницей, что происходит скорее не выравнивание влаги по объему материала, а перераспределение заряженных частиц. На рисунке 1.15 представлена структурная схема лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований по влиянию ЭАВ (электроактивированный воздух) на сушку зерна, реализованная в ФГБОУ ВПО АЧГАА Грачевой Н.Н. [163, 164].



1 – частотный регулятор; 2 – вентилятор; 3 – ионизатор; 4 – сетка; 5 – термопара, измеряющая температуру агента сушки; 6 – слой зерна; 7 – термопары, находящиеся в зерновом слое; 8 – плата для подключения термопар к компьютеру; 9 – блоки измерения температуры; 10 – роутер; 11 – персональный компьютер

Рисунок 1.15 – Структурная схема лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований по влиянию ЭАВ на сушку зерна активным вентилированием [164]

Проведенные автором исследования показали, что интенсификация сушки зерна ЭАВ зависит от исходной и текущей влажности зерна, температуры и скорости агента сушки, режима ионизации. В зависимости от сочетания этих факторов время сушки может быть сокращено на 10-70%. Для разработки соответствующего

режима автором были разработаны математические модели.

К недостаткам аэроионизации в процессах сушки следует отнести:

- низкую производительность установок;
- повышенную электрическую опасность для персонала, обслуживающего высоковольтное оборудование в составе установок;
- сложность обеспечения доставки аэроионов к обрабатываемому зерну.

1.4.4 Инфракрасный нагрев

В последнее время применение инфракрасного (ИК) нагрева в процессах переработки сельскохозяйственного производства получило значительное развитие [330, 339, 364]. ИК-нагрев характеризуется высокой скоростью передачи энергии, низкой продолжительностью сушки и меньшими экологическими воздействиями. По сравнению с конвективной обработкой нагретым воздухом ИК-обработка зачастую рекомендуется для получения продуктов с лучшим или сопоставимым качеством [156, 244, 330, 339, 343, 345, 349]. Большинство пищевых компонентов, особенно вода, поглощают излучаемую энергию. ИК-излучение более эффективно для нагрева поверхностных слоев, т.к. затухает до 1% от начальных значений на глубине от 0,26 до 2,54 мм от поверхности, в зависимости от частоты.

ИК не нагревает сухой воздух, но может нагревать молекулы воды, содержащиеся в воздухе, несколько повышая температуру. В случае сушки зерна ИК-излучением поверхность зерновки может быть быстро нагрета до высоких температур, что сокращает продолжительность сушки.

Комбинирование процесса нагрева инфракрасного излучения с этапами отпуска может привести к удалению значительного количества влаги из зерна при сохранении качества [345, 364]. После прекращения воздействия ИК-волной, зерно сохраняет температуру, при этом происходит процесс ее перераспределения к центру зерновки. В это же время влага из центра перемещается к поверхности зерна перед следующим циклом нагрева [364]. Это устраняет противодействующий градиент влагосодержания внутри зерна, полученный во время предыдущей стадии

сушки. Периодические стадии нагрева и отпуска, как и в случае с несколькими проходами для сушки, оказывают положительное влияние на скорость сушки и качество конечных продуктов [345, 349, 364]. Использование только непрерывной сушки приведет только к непрерывному нагреву зерна при одновременном удалении меньшего количества влаги по сравнению с последовательным процессом сушки и отпуска [348].

Также некоторые авторы отмечают, что поток энергии, связанный с ИК-нагревом, приводит к дезинфекции микроорганизмов [361].

В качестве оборудования, применяемого для ИК-сушки можно отметить как разрабатываемое, так и серийно выпускаемое оборудование.

Инфракрасная барабанная установка СБ-3-150.

Установка СБ-3-150 (рисунок 1.16), предназначена для стерилизации и подсушки в непрерывном режиме гранулированного и мелкодисперсного сырья (отруби, лекарственные травы, чай, специи), а также семечек, орехов, сухариков и др. Энергопотребление СБ-3 – 27,5 кВт/час. Производительность от 100 кг/час [217].



Рисунок 1.16 – Установка СБ-3 в положении обслуживания и демонстрационном состоянии [217]

Избирательность нагрева ИК-полем позволяет повысить температуру сушки до 100 ºС и более без потерь свойств высушиваемого вещества: ароматический комплекс, аминокислотный, витаминный (кроме витамина С) – сохраняются в полном объеме [217].

В качестве источника излучения используется галогеновая лампа. При производительности до 100 кг/час позволяет высушивать до 12 литров влаги в час. Инфракрасная сушилка оснащена шнековым дозатором с частотно-регулируемым приводом.

В бункере дозатора имеется ворошитель для работы с трудносыпучими продуктами. Бункер, дозатор, сушилка изготовлены из нержавеющей стали. В сушилке имеются 3 независимые зоны нагрева и 4-я зона принудительного обдува воздухом.

Установка для термообработки зернового сырья УТЗ – 4.

В отличие от предыдущей, УТЗ – 4 (рисунок 1.17) [217] предназначена для термообработки зерновых материалов (пшеница, ячмень, рожь, овес).



Рисунок 1.17 – Общий вид установки УТЗ – 4 [217]

В качестве источника излучения в установках УТЗ – 4, УТЗ-4 Ш используется галогеновая лампа. Мощность ИК-излучателей 27-33 кВт. Производительность 100-500 кг/час. Данная установка конвейерного типа. Материал равномерно распределяется по ленточному транспортеру. Скорость ленты, время нахождения продукта в зоне обработки, толщина слоя материала на ленте плавно регулируется управляемым приводом.

В данной установке возможна микронизация обрабатываемого материала либо разрушение структуры перед дальнейшей переработкой, при этом зерно интенсивно нагревается 110-150 °С, вспучивается, увеличивается в объеме (в 1,2-1,6 раза) и растрескивается. За счет высокой плотности ИК-излучения происходит интенсивный нагрев воды, содержащейся в порах зерна, далее она переходит в пар, давление резко увеличивается, в результате чего разрушается структура зерна.

Разработчики также отмечают снижение микробиологической обсемененности (вплоть до микотоксинов), гибель вредителей хлебных запасов и их личинок. Данная установка легко встраивается в существующие линии и позволяет создавать новые технологические цепочки [217].

Сушилка вибрационная с ИК-излучателями СВИК-150.

Сушилка вибрационная с инфракрасными излучателями СВИК-150 (Рисунок 1.18 [217]) предназначена для непрерывной сушки материалов, в том числе пищевого применения.

Сушилка предназначена для работы внутри помещения при отсутствии агрессивных, горючих газов, масляного тумана, пыли и грязи при температуре от 10 °С до 35 °С и относительной влажности до 80%.

Производительность данной установки составляет 120-150 кг/ч (16-20 кг испаренной влаги в час). Используемые инфракрасные излучатели – кварцевые галогенные. Кроме указанной, выпускаются аналогичные установки большей мощности и производительности (СВИК-50, СВИК-100, СВИК-150, СВИК-350) [217].



Рисунок 1.18 – Общий вид установки СВИК-150 [217]

Кроме указанных установок также существуют образцы как отечественной, так и зарубежной техники. Однако, несмотря на преимущества ИК-сушки, применение инфракрасного нагрева сельскохозяйственной продукции по-прежнему очень ограничено из-за высокой энергоемкости (5-9 кВт/кг исп. влаги) [361], малой глубины проникновения поля в слой материала (1-2 см), сложности реализации установок большой производительности, требуется перемешивание или создание кипящего слоя и т.д.

1.4.5 Радиочастотная сушка

Исследования сушки зерновых при воздействии электромагнитных волн радиочастотного диапазона проводились с середины прошлого века. Так в работах Лыкова А.В., Рогова И.А., Васильевой И.А., Нельсон С.О., Мухамад И.И., Ашаер солтани М., Ванг Ю. и других приводятся как данные по исследованию свойств сельскохозяйственных продуктов, в том числе зерна на радиочастотах (РЧ), так и установки на основе применения воздействия радиочастотами при сушке зерна

[200, 202, 244, 274, 306, 330, 333, 361]. Данные исследования охватывают диапазон частот 3 МГЦ до 300 МГц.

С 1940-х годов, радиочастотная сушка использовалась для пищевых материалов. Раннее исследования ограничивались сушкой овощей. В настоящее время радиочастотный нагрев используется в таких отраслях как: сушка древесины, бумаги, текстиля, стекловолокна, клея на водной основе, фармацевтических продуктов, пластмасс, картона и т.д. [244-247].

С 1990-х годов большая часть исследований проводилась по вакуумной сушке древесины с помощью радиочастот. Также были проведены обширные исследования по использованию радиочастот для нагрева сельскохозяйственной продукции и промышленного масштабирования в коммерческих целях [244-247, 274].

Мерфи с соавторами изучали сушку люцерны с использованием комбинации радиочастотных волн на частоте 27 МГц с сушкой нагретым воздухом. Разработанный ими способ увеличил общую скорость сушки, но не позволил обеспечить равномерность сушки по объему материала. Юмах представил теоретический анализ одновременного тепло- и массообмена при сушке кукурузы в псевдоожиженном слое. Исследовались непрерывные и периодические режимы нагрева. Были оценены и обсуждены влияния таких параметров, как напряженность электрического поля, частота, температура воздуха на входе и порозность слоя. Была разработана модель на основе диффузии для моделирования сушки в псевдоожиженном слое при непрерывном, а также периодическом радиочастотном нагреве. Полученные исследователем численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Автор отметил, что преимущества применения исследуемого метода сушки могут быть достигнуты при правильном контроле параметров сушки и применении периодического электротехнологического воздействия. Полученная модель стала эффективным инструментом для создания автоматизированной радиочастотной сушки зерна в псевдоожиженном слое с управлением по заданному критерию оптимальности. При сушке с помощью радиочастотной энергии мощность поглощается неравномерно, поглощалась выборочно во влажной сердцевине

зерен. Коэффициент потерь уменьшался по мере испарения влаги, что сопровождается уменьшением поглощенной мощности. Скорость испарения в процессе обработки уменьшается.

Несмотря на большую, по сравнению с более высокими частотами равномерность распространения электромагнитной волны, радиочастотная сушка чаще применяется в пищевой промышленности, так как диэлектрические характеристики зерновых материалов не позволяют обеспечить достаточный для сушки нагрев на данных частотах из за малой рассеиваемой мощности, хотя сушка радиочастотным полем и приводит к более равномерному содержанию влаги в конечных продуктах и снижению вероятности роста плесени, что значительно увеличивает срок хранения конечной продукции [330].

1.4.6 СВЧ

Особенности приведенных технологий сушки зерновых приведены в таблице 1.4. Многие из них могут быть решены за счет применения электромагнитного поля СВЧ совместно с конвективным воздействием.

Таблица 1.4 – Технологии сушки зерновых

№	Технология	Энергоемкость, МДж/кг исп влаги	Производительность, т/ч	Исполнение	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4	5	6	7
1	Классическая тепловая сушка (шахтная, колонковая, барабанная и т.д.	5-14	4-250	стационарные; мобильные	Высокая производительность; Номенклатура производительностей	Снижение качества при нарушении технологии; Высокая энергоемкость;

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5	6	7
2	Ультразвук	4,0-6,0	0,01-0,1	лабораторные	высокая интенсивность процесса влагопереноса; возможность обеспечения качественной и эффективной сушки при низких температурах или принципиально без повышения температуры (исключение разрушения структуры, сохранение всхожести семян и т.п.); возможность разработки самонастраивающихся ультразвуковых генераторов, что не требует пользовательского контроля над работой системы.	необходимость создания акустических колебаний в воздушной среде с интенсивностями более 140 дБ; необходимость создания сушильной камеры, обеспечивающей равномерное воздействие акустических колебаний по всему высушиваемому материалу; низкой эффективности применения ультразвука при сушке зерна большого объема; эффективность от воздействия ультразвуковых колебаний отмечается только в диапазоне влажностей 19-26%; малая глубина обработки УЗ-колебаниями
3	Озон	3,5-5,5	0,1-5,0	контейнерные, стационарные, мобильные, переносные	низкая энергоемкость; обеззараживание; увеличивает срок хранения конечной продукции	озон является сильным окислителем; ядовит в больших концентрациях; необходимость расщепления остатков; повышение температуры агента сушки влияет на разложение озона и снижение его концентрации; положительное действие от применения ОВС происходит не сразу, а после воздействия в течение 20-45 минут; применение ОВС практически исключает комбинацию этой технологии с другими способами интенсификации;

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5	6	7
4	Аэроионы	3,3-5,0	0,1-1,0	стационарные; лабораторные	низкая энергоемкость;	сложность доставки аэроионов к материалу;
5	Радиочастотная сушка	4,5-6,5	0,1-1,0	лабораторные	обеззараживание; увеличивает срок хранения конечной продукции; высокая равномерность распространения поля в материале	низкая скорость испарения влаги при обработке; не позволяют обеспечить достаточный для сушки нагрев на данных частотах из за малой рассеиваемой мощности
6	Инфракрасное излучение	5,0-9,0	0,1-10,0	стационарные; лабораторные	высокая интенсивность нагрева;	малая глубина проникновения поля в слой; сложность реализации установок большой производительности; требуется перемешивание или создание кипящего слоя; вероятность травмированы зерна в процессе обработки

При этом за счет применения микроволнового поля достигается интенсивный нагрев. Обеспечение требуемого диапазона температуры нагрева обеспечивается управлением источников электромагнитного, при этом нагрев материала осуществляется из внутренних, наиболее влажных слоем зерновки, способствуя влагопереносу на поверхность, что способствует лучшему влагоудалению [24-34, 37, 101, 138, 143, 151-153, 200, 212, 214, 231-237, 240, 247, 262, 284, 324, 326, 330].

В зависимости от рассеиваемой мощности и обеспечиваемой скорости нагрева может происходить не только влагоперенос, но и интенсивное испарение влаги в капиллярах, что приводит к разрыву структуры зерна и его микронизацию [151-153, 179, 206, 231-237]. Вопросами СВЧ сушки зерна и пищевых продуктов занимались такие ведущие ученые, как: Рогов И.А., Гинзбург А.С., Некрутман, С.В., Бородин И.Ф., Вендин С.В., Цугленок Н.В., Сыроватка В.И., Пахомов В.И., Рудобашта С.П., Васильев А.Н., Нельсон С.О., Новикова Г.В., Шарков Г.А. и др. В существующих публикациях приведено большое количество разрабатываемого и

выпускаемого оборудования для технологических линий переработки зерна сельскохозяйственных предприятий. В качестве примеров таких установок можно указать следующие.

Микроволновая установка АСТ-3 (ООО «АСТ», г. Таганрог). Данная установка (рисунок 1.19) предназначена для сушки сыпучих материалов [215]. Базовый модуль представляет собой функционально законченное зерносушильное устройство, обеспечивающее производительность от 0,6 м^3/ч для пшеницы до 4,5 м^3/ч для подсолнечника. Продукт сушки подается в активную зону через засыпной бункер, разогревается в электромагнитном поле СВЧ, на 25…35 °С. В процессе нагрева происходит интенсивный перенос капиллярной влаги на поверхности продукта далее зерно поступает в сушильную зону, где происходит удаление влаги и снижение температуры продукта.



Рисунок 1.19 – Микроволновая установка АСТ-3 [215]

Данная установка имеет модульную конструкцию, что позволяет создавать установки заданной производительности, а также встраивать в существующие технологические линии.

Установка микроволновая конвейерного типа для сушки гранулированных продуктов, типа АСТ-4 (ООО «АСТ», г. Таганрог). Данная установка (рисунок 1.20 [215]) разработана для сушки гранулированных продуктов в слое от 4мм до 25мм, пищевых продуктов, в том числе хлебцев и хлебных изделий высотой до 100 мм. Нагрев происходит электромагнитным полем СВЧ без непосредственного контакта элементов установки с продуктом сушки.



Рисунок 1.20 – Установка микроволновая конвейерного типа для сушки гранулированных продуктов и хлебных изделий типа АСТ-4[215]

Также в установке возможно проведение микронизации зерновых и бобовых культур. Производительность установки в этом режиме составляет 500-600 кг. в час. Потребляемая мощность не более 80 кВт. Установка предназначена для эксплуатации при температуре окружающего воздуха от плюс 10 °С до плюс 40 °С в закрытых помещениях [215].

Микроволновая установка «Родник» (ООО «Синергис», г. Санкт-Петербург). Универсальная установка микроволновой вакуумной обработки материалов «Родник» (рисунок 1.21), является современным, высокотехнологичным оборудованием [175]. Данная установка предназначена для вакуумной сушки продуктов; досушки продуктов до низких уровней влажности 6-10%; быстрой низкотемпературной сушки термолабильных продуктов; стерилизации продуктов и улучшения их микробиологических показателей; высокотемпературного нагрева материалов и т.д.



Рисунок 1.21 − Микроволновая установка «Родник» [175]

К особенностям установки можно отнести быстрый, объемный и равномерный нагрев продуктов, за счет использования микроволнового излучения мощностью до 11,2 кВт; возможность обработки материала как при вакууме до 30

мм.рт.ст., так и при избыточным давлении до 1,7 Атм; возможность обработки продуктов в таре, в том числе в крафт-мешках; модульность конструкции, что позволяет конфигурировать установку под конечную задачу технологического процесса; автоматизацию работы установки.

Установка микроволновой термической обработки «Поток» (ООО «Синергис», г. Санкт-Петербург). Данная установка (рисунок 1.22) предназначена для непрерывной обработки больших партий семян подсолнечника, орехов, зерновых и бобовых культур, круп, отрубей, а также других сыпучих материалов, в том числе и строительных. Установка выпускается в различных модификациях, в зависимости от применения – жарка, сушка, снижение микробиологической обсемененности, микронизация зерна и круп, высокотемпературная обработка [175].



Рисунок 1.22 − Микроволновая установка «Поток» [175]

К особенностям установки «Поток» можно отнести быстрый, объемный и равномерный нагрев продуктов, за счет использования микроволнового излучения мощностью до 14 кВт; рекуперирование энергии от образующегося пара; возможность обработки разных видов продуктов.

Установка позволяет обрабатывать самые разнообразные сыпучие материалы с удельной плотностью от 0,1 кг/литр до 3 кг/литр. Все двигатели установки

имеют частотное управление, что позволяет легко настраивается на обработку различных продуктов.

Универсальный СВЧ-модуль СМ-5 (ФГБНУ АНЦ «Донской» (СКНИИМЭСХ), г. Зерноград). Данная установка (рисунок 1.23 [252]) предназначена для термической обработки зерновых (сушка, обеззараживание).



Рисунок 1.23 − Универсальный СВЧ-модуль СМ-5 [252]

Обеспечивает:

- мягкий режим сушки зерна и семян;
- снижение микротравмирования на 5-6 %;
- улучшение хлебопекарных и посевных свойств;
- снижение зараженности зерна.

Производительность данной установки при сушке пшеницы с 20 до 14 % составляет 4,5-5,5 т/ч, в зависимости от параметров окружающего воздуха и свойств материала. В процессе сушки зерно нагревается до 60 °С.

Установка СВЧ обработки зерна (ФГБНУ АНЦ «Донской» (СКНИИМЭСХ), г. Зерноград). Данная установка (рисунок 1.24 [252]) предназначена для обработки зерна в потоке. При этом зерновой поток движется по круглому волноводу в соответствии. Четвертьволновый отрезок на верхнем входном конце при заполнении зерном подавляет паразитное излучение до безопасного уровня. При быстром эндогенном нагреве зерна происходит закипание капиллярной влаги, нарастание парциального давления водяных паров и разрыв оболочек крахмала [24, 252].



Рисунок 1.24 – Установка СВЧ обработки зерна [252]

Данная установка в большей степени предназначена для повышения питательности зерновых продуктов и встраивания в линии кормоприготовления.

Установки высокоинтенсивной тепловой обработки зерновых продуктов «Декстрин» (ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино). Данные установки разработаны для высокоинтенсивной тепловой обработки зерна и зерновых продуктов

электромагнитным полем СВЧ. Могут работать в режимах обеззараживания и кондиционирования. В установках используются промышленные магнетроны мощностью 30 кВт, работающий на частоте 915 МГц с выходной СВЧ (рисунок 1.25) [173].



а б в

Рисунок 1.25 – Установки высокоинтенсивной тепловой обработки зерновых продуктов «Декстрин» [173]: а – декстрин; б – декстрин-2; в – декстрин-3

Данные установки прежде всего предназначены для повышения питательности, обеззараживания, предпосевной стимуляции и подсушки. Заявленная разработчиками производительность установок составляет от 0,6 до 1,2 т/ч, в зависимости от режима работы [211, 212].

Кроме указанных установок существует большое количество установок, СВЧ-конвективного действия [211, 212], ориентированных на повышение кормовой ценности зерна, а также патентов на изобретения и полезные модели, ориентированные на достижение тех же целей [211, 212].

Таким образом, преимуществами СВЧ-конвективных установок, по сравнению с традиционными и указанными ранее являются: прямой объемный нагрев; экологичность; возможностью регулирования глубины проникновения электромаг-

нитной волны за счет применения источников, работающих на разной частоте; более высокой, по сравнению с радиочастотным нагревом удельной мощностью, выделяемой в материале; обеззараживание обрабатываемого материала, продление срока безопасного хранения.

К недостаткам существующих установок можно отнести следующее: недостаточность данных о диэлектрических свойствах обрабатываемых материалов; неравномерность распределения электромагнитного поля; сложность измерения напряженности электромагнитного поля в слое обрабатываемого материала; сложность контроля параметров процесса при автоматизации сушки.

Принимая во внимание приведенные выше данные можно сказать, что применение микроволновых полей по сравнению с другими способами электрофизической интенсификации может обеспечить объемный нагрев материала, интенсифицировать тепло-влагообмен, обеспечить снижение удельных энергозатрат на сушку за счет прямого нагрева влаги, содержащейся в зерне.

Таким образом, научную гипотезу можно сформулировать следующим образом:

Научная гипотеза: добиться снижения потерь зерна при послеуборочной обработке и хранении, а также энергоемкости процессов тепловой обработки возможно за счет применения электротехнологии и алгоритмов управления процессами тепло-влагообмена при послеуборочной обработке зерна.

При этом остаются недостаточно изученными: диэлектрические свойства обрабатываемых материалов, некоторые принципы определения параметров установок СВЧ-конвективной обработки зерна и режимов их работы. Большинство существующих в настоящий момент подобных установок не учитывает особенностей распространения микроволнового поля в обрабатываемом материале в процессе обработки и условиях изменения влажности материала по мере его тепловой обработки. К параметрам, которые необходимо определить, можно отнести: размеры продуктопровода; количество источников микроволновой мощности; расположе-

ние источников микроволновой мощности; возможность масштабирования разрабатываемых установок. К режимам работы стоит отнести возможность управления по задаваемым критериям либо ограничениям.

1.5 Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов

Изучением электрофизических свойств сельскохозяйственных материалов занимались такие ученые как Нельсон С.О., Дэйт, Рогов И.А. и др. [244-247, 320, 325, 332, 334, 362, 366].

Сельскохозяйственные материалы, в том числе пищевые продукты, как и живые организмы проводят электрический ток в определенной степени, однако относятся к диэлектрикам. То есть представляют собой класс материалов, являющихся плохими проводниками электричества. Электрические характеристики этих материалов могут быть описаны через их диэлектрические свойства, которые влияют на распределение электромагнитных полей и токов в области, занятой материалом, и которые определяют поведение материалов в электрических полях. Таким образом, диэлектрические свойства определяют, насколько быстро материал нагреется в инфракрасном (ИК) или микроволновом поле. Их влияние на электрические поля также используется при исследовании некоторых других свойств материалов, которые могут быть соотнесены с диэлектрическими.

Обработка сельскохозяйственных материалов с применением электрофизических способов воздействия и разработка оборудования на их основе сопряжена с исследованием диэлектрических и теплофизических свойств данных материалов, которые во многом связаны с долей содержащейся в этих материалах влаги и частотой, на которой происходит электромагнитное воздействие.

Диэлектрическую проницаемость можно представить в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'', \tag{1.3}$$

где ε' – диэлектрическая постоянная (действительная часть, отвечающая за измерение электромагнитной энергии, запасённой в материале);

ε'' – фактор диэлектрических потерь (комплексная часть, характеризующая энергию, рассеиваемую в материале).

Величина тангенс угла диэлектрических потерь, tanδ, отвечает за поглощение материалом электромагнитной энергии и выражается следующим образом:

$$tg\,\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (1.4)$$

Диэлектрические показатели зависят от напряжённости электрического поля, электромагнитной частоты воздействия на объект, давления, температурного режима, плотности материала и других факторов. В данной работе будет разобраны основные зависимости диэлектрических свойств сельскохозяйственных материалов на примере зерна пшеницы.

1.5.1 Частотная зависимость диэлектрических свойств воды

За исключением некоторых материалов, обладающих чрезвычайно низкими потерями, то есть практически не поглощающих никакой энергии от ВЧ и СВЧ полей, диэлектрические свойства большинства материалов значительно варьируются в зависимости от частоты приложенного электрического поля. Эта зависимость изучалась такими исследователями, как Нельсон С.О., Дэйт, Рогов И.А. и др. Важным явлением частотной зависимости диэлектрических свойств является поляризация, возникающая из-за ориентации под действием электрического поля молекул, имеющих постоянные дипольные моменты. Математическая формулировка, описывающая этот процесс для чистых полярных материалов разработана Дебаем и выражается следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_{\text{рел}}}. \quad (1.5)$$

где ε_∞ – диэлектрическая проницаемость на частоте настолько высокой, что ориентация молекул не успевает внести свой вклад в поляризацию;

ε_s – диэлектрическая проницаемость на постоянном токе;

ω – частота, Гц;

$\tau_{\text{рел}}$ – время релаксации, с.

Вода, находящаяся в жидком состоянии, является одним из наиболее показательных примеров полярного диэлектрика. Диэлектрические свойства воды на микроволновых частотах приведены в таблице 1.5 [330].

Таблица 1.5 – Диэлектрическая постоянная, ε', и фактор диэлектрических потерь, ε'', воды на различных частотах [330]

Частота, ГГц	20 °C		50 °C	
	ε'	ε''	ε'	ε''
0,6	80,3	2,5	69,9	1,25
1,7	79,2	7,9	69,7	3,6
3,0	77,4	13,0	68,4	5,8
4,6	74,0	18,8	68,5	9,4
7,7	67,4	28,2	67,2	14,5
9,1	63,0	31,5	65,5	16,5
12,5	53,6	35,5	61,5	21,4
17,4	42,0	37,1	56,3	27,2
26,8	26,5	33,9	44,2	32,0
36,4	17,6	28,8	34,3	32,6

Как видно из таблицы 1.5 с увеличением частоты действительная часть диэлектрической проницаемости уменьшаются, а мнимая (коэффициент диэлектрических потерь) увеличивается. Так как в любом виде сельскохозяйственной продукции присутствует влага, то и диэлектрические свойства самих культур также зависят от диэлектрических свойст воды и зависимости их от частоты поля.

1.5.2 Температурная зависимость диэлектрических свойств воды

Из приведенной таблицы видно, что диэлектрические свойства материалов также зависит от температуры. При повышении температуры, время релаксации уменьшается, а пик фактора диэлектрических потерь будет смещаться в сторону высоких частот. Таким образом, в области дисперсии, диэлектрическая постоянная будет иметь тенденцию к увеличению с увеличением температуры вследствие диэлектрической релаксации, тогда как коэффициент потери может возрастать или уменьшаться в зависимости от того рабочая частота выше или ниже частоты релаксации. Тем не менее, для сложных диэлектриков, таких как сельскохозяйственные

материалы, сторонние процессы в структуре материала могут скрывать или выявлять диэлектрические релаксационные эффекты. Температурная зависимость диэлектрической постоянной, ε', и тангенса диэлектрических потерь, $tg\delta$, при частоте воздействующего поля 2,45 ГГц приведена в таблице 1.6 [80, 162].

Таблица 1.6 Температурная зависимость диэлектрических свойства воды при частоте воздействующего поля 2,45 ГГц [80, 162]

T, ℃	ε'	$tg\delta$
3	79	0,3
10	79	0,23
20	78	0,17
40	74	0,09
60	68	0,06
80	60	0,05

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости учитывать текущую температуру обрабатываемого материала при разработке режимов работы оборудования для обработки сельскохозяйственной продукции с применением микроволнового поля.

1.5.3 Зависимость от плотности материала

Учитывая, что количество материала, подвергающегося воздействию электромагнитного поля, зависит от количества материала в единице объема, т.е. плотности материала, в том числе насыпной, также оказывает влияние на диэлектрические свойства. Это особенно заметно при исследовании и воздействии на сыпучие, зерновые, и гранулированные материалы. Так при разработке технологий электромагнитного воздействия, в том числе сушки и обеззараживания, на зерновые материалы и комбикорм, необходимо учитывать состояние слоя.

В некоторых случаях, диэлектрические свойства слоя материала той или иной плотности могут быть необходимы, когда образцы частиц являются единственным доступным формой материала. Это актуально, например, для зерновых культур, в случае которых отдельные зерновки слишком малы для непосредственного измерения диэлектрических свойств твердого вещества. В некоторых случаях, изготовление образцов материалов до точных размеров, необходимых для измерения диэлектрических свойств трудоемко, и измерения в измельченном состоянии материала осуществимо легче. В таких случаях, важно приведение полученных данных к свойствам образцов твердых частиц.

В общем случае, когда на материал воздействуют электромагнитным полем, часть энергии отражается к источнику, остальная проникает в материал, но ее мощность убывает по экспоненциальному закону по глубине слоя обрабатываемого диэлектрика.

Изучение диэлектрических свойств сельскохозяйственных культур, вызвано зависимостью влияния электромагнитного излучения на обрабатываемые объекты от этих диэлектрических свойств. Зная данные зависимости, можно рассчитать и смоделировать влияние различных физических факторов на электрические свойства сельскохозяйственных материалов, через их диэлектрические показатели.

В заключении хотелось бы привести некоторые из существующих диэлектрических свойств пищевых и сельскохозяйственных материалов (таблица 1.7) [332, 334, 351, 361, 366].

Объем существующих в настоящее время данных о диэлектрических свойствах материалов весьма велик, но далеко не исчерпывающ и, зачастую, не охватывает сельскохозяйственные культуры, возделываемые в нашей стране. Эти данные важны при разработке оборудования, использующего возможности электрофизического воздействия на материалы.

Таблица 1.7 – Диэлектрические свойства пищевых и сельскохозяйственных материалов [332, 334, 361, 366]

Материал	Температура, °С	Влажность, *W*, %	*ε′*		*ε″*		Глуб.проникн, см	
			Частота, *f*, МГц		Частота, *f*, МГц		Частота, *f*, МГц	
			27,12	915	27,12	915	27,12	915
Яблоко	22	3,8	-	1,7	-	0,1	-	68,0
	60	3,8	-	3,6	-	0,7	-	14,2
	22	23,8	-	5,7	-	2,1	-	6,0
	60	22,4	-	14,4	-	4,5	-	4,4
	22	69,7	-	33,0	-	6,7	-	4,5
	60	68,7	-	32,8	-	9,1	-	3,3
Апельсин	20	-	84	72,9	223,3	16,5	10,0	2,7
	50	-	78	66,1	367,7	17,5	7,2	2,4
Белый хлеб	25	34,6	2,35	1,81	2,32	0,47	127,5	15,1
	25	38,6	2,83	2,08	4,95	0,69	73,4	11,0
	55	34,6	2,80	1,94	5,09	0,67	71,7	11,0
	55	38,6	3,15	2,17	8,00	0,83	53,3	9,4
Грецкий орех	20	-	4,9	2,2	0,6	2,9	650,3	3,1
	40	-	5,1	3,0	0,4	2,3	994,1	4,2
	60	-	5,3	3,8	0,4	1,8	1013,3	5.8
Нут (мука)	20	7,9	2,99	2,51	0,16	0,15	1902,1	55,1
	50	7,9	3,44	2,77	0,19	0,21	1718,1	41,4
	80	7,9	6,81	4,68	1,38	0,81	334,4	14,0
	20	20,9	4,50	3,33	0,81	0,54	462,6	17,7
	50	20,9	11,43	6,64	7,85	1,71	79,7	7,9
	80	20,9	56,51	216,7	145,88	10,69	12,4	7,2

Рабочая гипотеза: снижение потерь зерна и снижение энергоемкости может быть достигнуто за счет использования полей сверхвысоких частот и совершенствования алгоритмов управления процессами тепло-влагообмена.

Основные теоретические и экспериментальные работы, связанные с изучением закономерностей высокочастотного и сверхвысокочастотного нагрева и применением его в сельхозпроизводстве и других отраслях промышленности, были проведены академиком Лыковым А.В., Максимовым Г.А., Пюшнером Г., Фогелем А.А., Книппером Н.В., Некрутманом С.В. Позднее эти работы были продолжены и углублены академиками Бородиным И.Ф., Роговым И.А., Вендиным С.В., Новиковой Г.В., Сыроваткой В.И., Рудобаштой С.П., Васильевым А.Н. и другими учеными.

Анализ работ по сушке с использованием СВЧ полей показал, что во многих существующих установках используются мощные генераторы СВЧ энергии, используемые в кратковременном режиме включения (2-3 секунды), такие решения приводят к очень быстрому разогреву влаги, находящейся в сушимом материале, что может привести к порче зерна. Также исследовалось применение резонаторных камер, в которых зерно занимает часть зоны СВЧ активации. Еще одним решением стало применение последовательно расположенных маломощных магнетронов, например, в случае конвейерной сушилки, но за счет высокой скорости движения ленты и неравномерности распределения СВЧ поля в материале слой зерна должен быть тонким (2,5-3 см). Это приводит увеличению длины транспортера для обеспечения разогревания материала до необходимой температуры.

Существующие сушилки, использующие комбинированное воздействие совместно с обработкой СВЧ полем, охватывают практически весь спектр типов сушилок. Однако распределение электромагнитного поля в зоне обработки зерна исследователями рассмотрено либо без учета материала, либо для резонаторной камеры без учета изменений свойств в процессе сушки [13-16, 25, 214, 304, 312, 340, 347, 366], что не позволяет полноценно использовать возможности микроволнового воздействия.

Таким образом, в современных исследованиях на настоящий момент представлено недостаточное количество данных о диэлектрических свойствах материалов, их зависимости от влажности, температуре, предварительной обработке и т.д.

1.6 Цель и задачи исследования

Подводя итог вышеизложенному, можно сформулировать цель и задачи исследования.

Цель диссертационной работы: разработать научные и методические принципы разработки оборудования СВЧ-конвективной сушки зерна, обеспечивающего снижение потерь урожая при его послеуборочной обработке за счет увеличения производительности, а также снижения энергоемкости процессов сушки зерна.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие ***задачи:***

1. Провести обзор и сравнительную оценку существующих способов электрофизической интенсификации процессов сушки зерна при послеуборочной обработке.

2. Определить требуемые условия применения микроволновой энергии для обеспечения интенсификации процессов тепло- влагопереноса.

3. Сформировать научно-обоснованные подходы к определению параметров установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

4. Разработать методику определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерновым слоем.

5. Разработать метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя в зоне СВЧ-конвективной обработки.

6. Определить научно-обоснованные подходы к разработке режимов работы установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

7. Провести производственную проверку и оценить экономическую эффективность применения установок СВЧ-конвективной сушки зерна.

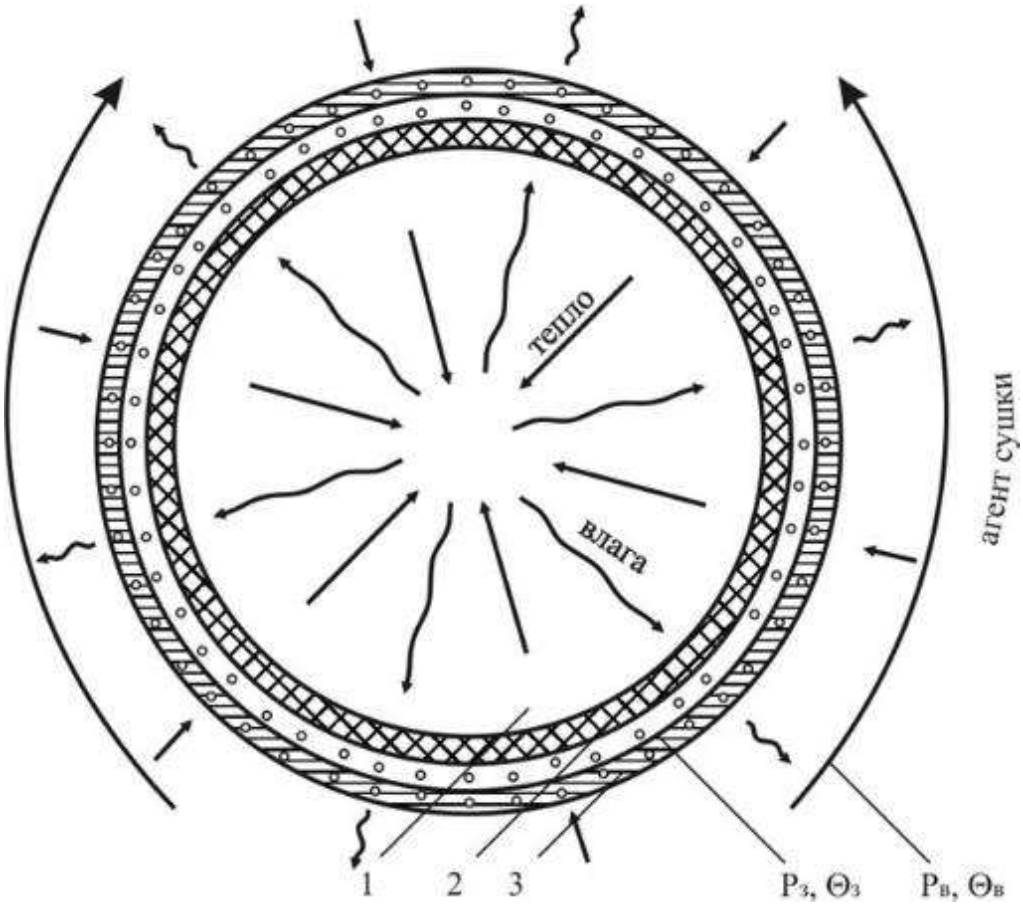
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- ВЛАГОПЕРЕНОСА

В качестве одного из вариантов совершенствования тепловой сушки зерна исследователи рассматривают применение электромагнитных полей микроволнового диапазона. Применение электромагнитных полей микроволнового диапазона в качестве интенсифицирующего фактора ограничивается, прежде всего, высокой неравномерностью распространения поля в слое обрабатываемого материала. Однако, прежде чем перейти к изучению картины распространения воздействующего поля, стоит рассмотреть механизм интенсификации процессов тепло- влагопереноса за счет применения СВЧ поля.

2.1Механизм удаления влаги из зерна

Производительность сушильных агрегатов, в том числе и установок активного вентилирования можно повысить как увеличением количества и геометрических размеров аппаратов, более рационального использования времени их работы (сокращение подготовительно-заключительных операций), так и интенсификацией, путем сокращения экспозиции сушки [12, 17, 38, 41, 126, 129, 134, 150, 188, 263, 337, 348, 359]. Применение этих двух способов повышения производительности как правило приводит к увеличению капитальных или эксплуатационных затрат, так как это связано с дополнительными затратами на увеличение емкостей аппаратов, дополнительного расходования топлива, электроэнергии, агента сушки и прочее. Исходя из сказанного следует стремиться к разработке технологий и применению технологического оборудования, обеспечивающего максимальное сокращение удельных затрат на сушку зернового материала при сохранении в заданных пределах его показателей качества. Т.е. внимание стоит обращать не только на физико-химические и технологические закономерности, а также на экономические показатели, являющиеся основными для хозяйств.

Механизм удаления влаги из зерна при конвективной сушке схематично может быть представлен следующим образом (рисунок 2.1 [51, 235]). Вдоль поверхности влажного зерна движется агент сушки с определенными параметрами ($\Theta_в$ – температура агента сушки; $P_в$ – парциальное давление). Теплота от агента сушки конвективным способом передается зерну, его поверхность нагревается до температуры $\Theta_з$ и часть влаги, находящейся у поверхности, испаряется. В результате по объему зерна создаются перепады влагосодержания и температуры, под действием которых происходит диффузионный процесс переноса влаги к поверхности в зону испарения. Оторвавшиеся от поверхности зерна молекулы пара диффундируют через пограничный слой и поглощаются агентом сушки. Обязательное условие процесса удаления влаги с поверхности зерна в этом случае – наличие разности между парциальным давлением у его поверхности $P_з$ и в агенте сушки $P_в$ [235].



$P_з > P_в$; $\Theta_з < \Theta_в$.

1 – зерно; 2 – пограничный слой; 3 – зона испарения влаги

Рисунок 2.1 – Механизм удаления влаги из зерна при конвективной сушке [235]

Интенсивность сушки зависит от физико-химических свойств материала и движущей силы процесса. Эту зависимость в общем виде выражают линейным уравнением, которое описывает известные феноменологические законы и соответствует первому принципу термодинамики необратимых процессов:

$$Q_{\text{пот}} = K_{\text{ФМ}} \cdot q_{\text{пр}}, \tag{2.1}$$

где $Q_{\text{пот}}$ — плотность потока;

$K_{\text{ФМ}}$ — кинетический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств материала;

$q_{\text{пр}}$ — движущая сила процесса.

Движущей силой переноса вещества (влаги) могут быть градиенты влагосодержания, температуры, осмотического давления, общего давления внутри тела и др. [137, 201, 249]. Процесс сушки можно интенсифицировать за счет увеличения кинетических коэффициентов $K_{\text{ФМ}}$ и движущих сил $q_{\text{пр}}$. Следует учитывать, что эти факторы изменяются в процессе сушки, так как зависят от температуры и влажности тела.

Если в увеличении движущих сил имеются определенные пределы, обусловленные свойствами материалов и их термо- и влагоустойчивостью, то в отношении повышения кинетических коэффициентов имеются значительные неиспользованные резервы.

При молекулярной диффузии, согласно закону Фика, количество диффундирующего через слой вещества равно:

При конвективной диффузии количество вещества переносимого от поверхности раздела фаз в газовую фазу, q_m, определяется по уравнению:

$$q_m = \beta_c \cdot F_\phi \cdot q_\Gamma, \tag{2.2}$$

где β_c — коэффициент массоотдачи;

F_ϕ — поверхность соприкосновения фаз;

q_Γ — движущая сила процесса.

Коэффициент массоотдачи зависит от гидродинамических, физических и геометрических факторов и определяется экспериментально при помощи теории подобия:

$$\beta_c = \frac{D_{пр} \cdot \mathrm{Nu}}{L_o}, \tag{2.3}$$

где Nu = *f*(Re, Pr) — критерий Нуссельта;

$D_{пр}$ – оператор, определяющий физический эффект;

L_o — определяющий геометрический размер.

Критерий Прандтля:

$$\mathrm{Pr} = \frac{3600 \cdot \mu_в}{\rho \cdot D_{пр}}. \tag{2.4}$$

где $\mu_в$ — вязкость, Н·с/м;

ρ — плотность, кг/м^3.

При небольшом градиенте температуры в пограничном слое в качестве потенциала можно принять его парциальное давление.

При сушке влажных материалов происходят взаимосвязанные процессы тепло- и массообмена между материалом и агентом сушки. Внешний тепло- и массообмен нарушает равновесное состояние поверхности материала и приводит к внутреннему тепло- и массообмену.

Интенсивность внутреннего переноса влаги в процессе сушки описывается также известным уравнением неизотермической влагопроводности:

$$q_m = -a_m \cdot \rho \cdot \nabla u - a_m \cdot \rho \cdot \delta \cdot \nabla \Theta, \tag{2.5}$$

Первый член уравнения характеризует перемещение влаги в материале под влиянием градиента влажности, второй — под влиянием градиента температуры. При обычной конвективной сушке материал прогревается с поверхности и градиенты ∇u и $\nabla \Theta$ имеют противоположные знаки, т.е. термовлагопроводность препятствует удалению влаги из материала. По данным Филоненко Г.К. градиент $\nabla \Theta$ =1 создает движение влаги в материале, равноценное перепаду влажности ∇u в 5...8%.

Кроме того, методы интенсификации можно установить из уравнения кинетики сушки:

$$-\frac{dW^c}{d\tau} = K_{\text{ФМ}} \cdot \left(W^c - W_p^c\right), \tag{2.6}$$

где W^c, W_p^c - текущая и равновесная влажность материала, %;

Из анализа закономерностей процесса сушки вытекает, что при конвективной сушке важную роль играет не только тепло- и влагообмен между агентом сушки и материалом, но и перенос тепла и влаги внутри материала. Внутренний влагоперенос, как правило, лимитирует скорость сушки материала. Поэтому при любых способах интенсификации сушки необходимо добиваться соответствия между интенсивностью испарения влаги с поверхности материала и внутренним влагопереносом.

Анализ изменения полей потенциалов переноса в процессе сушки позволяет научно обосновать пути рациональной интенсификации процесса. Из основного уравнения влагопереноса, следует, что интенсивность внутреннего переноса влаги может быть повышена за счет увеличения потока, обусловленного влагопроводностью и за счет уменьшения тормозящего действия термовлагопроводности, т.е. путем повышения градиента влагосодержания ∇u и коэффициента внутренней диффузии влаги ат, а также уменьшения градиента температуры $\nabla\Theta$. При этом, нужно учитывать, что значительное увеличение ∇u может привести к ухудшению качества материала.

При интенсивных методах сушки испарение происходит во всем объеме материала, влага внутри частицы перемещается только в виде пара [200, 344]. Это приводит к появлению градиента давления ∇p, так как скорость превращения воды в пар превышает скорость вывода его из материала. Под действием ∇p интенсифицируется молярное перемещение влаги.

Интенсифицирующие воздействия можно разделить:

1) по природе интенсифицируемого процесса — механические, гидромеханические, тепловые и диффузионные, т.е. процессы переноса массы и энергии и пр.;

2) по характеру превращений, происходящих в результате интенсифицирующих воздействий — химические, фазовые, агрегатные;

3) по виду действующих сил — гравитационные, массовые (механические) силы, потоки материальных частиц (удары), электрические и магнитные воздействия, потоки ионизированных и заряженных частиц, корпускулярные и электрические излучения, тепловые потоки.

Эту классификацию можно дополнить характером интенсифицирующих воздействий на процесс. Например, снижение толщины пограничного слоя, изменение структуры (пористости) тела (увеличение диаметра капилляров), изменение вязкости воды, увеличение или снижение давления паров.

Относительно процесса сушки использование энергии электромагнитного поля СВЧ частот, в отличие от других (таких как ОВС, ионизация воздуха и т.д.) приводит к наложению интенсифицирующих действий: снижению $\Delta\Theta$, т.к. нагреваются в первую очередь внутренние слои, содержащие наибольшее количество влаги и увеличению ΔP, т.к. во внутренних слоях наиболее быстро происходит испарение содержащейся влаги и увеличение внутреннего давления водяных паров, относительно давления паров на поверхности материала.

2.2 Общие положения СВЧ нагрева

С точки зрения свойств проводимости, зерновой слой является диэлектриком и при попадании в поле СВЧ подвергается нагреву, интенсивность которого зависит от многих параметров.

Процессы нагрева в СВЧ параметрах описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и, при отсутствии массопереноса, уравнения теплопроводности:

$$rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau}, rot\,\vec{B} = \mu_0 \cdot \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial \tau}\right), rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau},$$

$$div\,\vec{D} = 0, div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, div\,\vec{B} = 0,$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0.\varepsilon(\Theta) \cdot \vec{E}, \vec{B} = \mu_0.\mu(\Theta) \cdot \vec{H}, \vec{j} = \sigma(\Theta) \cdot \vec{E}. \qquad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(c(\Theta) \cdot \rho(\Theta) \cdot \Theta) + \left(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}\,\Theta\right) = div\left(\lambda(\Theta) \cdot \vec{\nabla}\,\Theta\right) + Q_v\left(\Theta, \vec{E}\right).$$

где $\vec{E}$, $\vec{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей;

$\vec{D}$, $\vec{B}$ – вектора электрической и магнитной индукции;

$\vec{j}$ – плотность тока проводимости;

$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon' - i\sigma/\omega$ - абсолютная диэлектрическая проницаемости диэлектрика;

μ – абсолютная магнитная проницаемость диэлектрика;

σ – проводимость диэлектрика;

ω – угловая частота;

$c,\ \rho,\ \lambda$ – коэффициент теплоемкости, плотность и коэффициент теплопроводности диэлектрика;

$\vec{\nabla}$ – оператор Гамильтона;

Q_v – удельная поглощенная мощность;

Θ – температура диэлектрика.

Исследование данной системы дифференциальных уравнений сопряжено с трудностями, т.к. зависимости электрофизических параметров диэлектриков являются приближенными, задача является многомерной по пространственным переменным и др. Поэтому при описании процесса СВЧ нагрева строят упрощенные математические модели [200, 202, 235]. Нас интересует не просто сам процесс диэлектрического нагрева, а влияние СВЧ на изменение поля влагосодержания и поля температур в зерновке и как это скажется на интенсификации сушки зерна в установках активного вентилирования.

В однородном электромагнитном поле перенос влаги обусловлен действием не только сил диффузии (∇U), термодиффузии (∇T), но и действием электромагнитной ($X_Э$) и магнитной (X_M) сил.

В соответствие с уравнением Онзагера поток влаги определится соотношением:

$$j_{вл} = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U - a_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla \Theta - a_m^Э \cdot \rho_0 \cdot (\nabla E) \cdot \pi_Э - a_m^M \cdot \rho_0 \cdot (\nabla B) \cdot \pi_M. \quad (2.8)$$

где $\pi_Э$, π_M – электрическая и магнетическая поляризация, соответственно;

E – напряженность электрического поля, В/м;

B – напряженность магнитного поля, А/м;

$a_m^Э, a_m^M$ - коэффициенты электро- и магнитодиффузии влаги во влажном материале.

Величина *B,* является тензором и в соответствии с принципом Кюри она не совместима с векторами ∇U, $\nabla\Theta$, E.

Величина потока влаги, обусловленная электродиффузией (в переменном электрическом поле).

$$j = -a_m^Э \cdot \rho_0 \cdot (gradE) \cdot \pi_Э - a_m^Э \cdot \rho_0 \cdot E. \qquad (2.9)$$

Величина ($a_m^Э \cdot \rho_0 \cdot E$) должна быть определена экспериментально, что достаточно сложно, поэтому принято записывать зависимость величины потока влаги в материале при СВЧ воздействии следующим выражением:

$$j = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U - a_m \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \nabla\Theta - K_{мол} \cdot \nabla\rho. \qquad (2.10)$$

где $K_{мол}$ – коэффициент молярного переноса, кг/м·с·Па;

$$K_{мол} = a_p \cdot c_v \cdot \rho_0; \qquad (2.11)$$

a_p - коэффициент конвективной диффузии, м^2/с;

c_v- емкость тела по отношению к воздуху, 1/Па.

Состояние продукта, подвергающегося диэлектрическому нагреву в СВЧ поле принято еще [200, 201] описывать системой дифференциальных уравнений.

Система дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса имеет вид:

$$\frac{\partial\Theta}{\partial\tau} = a \cdot \nabla^2\Theta + \frac{r \cdot \varepsilon_{пр}}{c} \cdot \frac{\partial U}{\partial\tau} + \frac{Q_v}{c \cdot \rho_0}; \qquad (2.12.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial\tau} = a_{m_2} \cdot \nabla^2 U + a_{m2} \cdot \delta_2 \cdot \nabla^2\Theta + \varepsilon_{пр} \frac{\partial U}{\partial\tau}; \qquad (2.12.2) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial\tau} = a_p \cdot \nabla^2 P + \frac{\varepsilon_{пр}}{c_v} \frac{\partial U}{\partial\tau}. \qquad (2.12.3)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – коэффициент фазового превращения жидкость – пар;

c – теплоемкость образца, Дж/кг·°С;

r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

Q_v – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м^3;

a – коэффициент температуропроводности вещества, м^2/с;

ρ_0 – плотность сухого вещества образца, кг/м^3;

a_{m_2} – коэффициент диффузии жидкости, м^2/с;

δ_2 – относительный коэффициент термодиффузии;

a_p – коэффициент конвективной диффузии, м^2/с;

P – избыточное давление в образце, Па;

c_v – емкость образца по отношению к влажному воздуху, 1/Па.

Коэффициент конвективного теплообмена (конвективной диффузии пара) играет важную роль в описании процессов тепло - и влагообмена, в том числе и при СВЧ обработке. Определение численной величины этого коэффициента – один из значимых этапов расчета СВЧ сушки, в том числе и сушки зерна.

2.3Интенсификация тепло-влагопереноса СВЧ-воздействием

Коэффициент конвективной диффузии пара при СВЧ воздействии (a_p), может быть определен из экспериментальных кривых релаксации избыточного давления пара в зерновке. Г.А. Максимовым [202] был проведен эксперимент по СВЧ нагреву кварцевого песка. Получены кривые распределения давления пара и температуры в материале в процессе нагрева (рисунок 2.2 [202]) и кривые изменения давления пара в материале в течение времени.

Что касается коэффициента конвективной диффузии пара для зернового слоя, то различными исследователями были предложены зависимости, учитывающие особенности технологического процесса. В своих работах Рудобашта С.П., Плановский А.Н. предложили зависимости для расчета текущего значения указанного коэффициента при расчете массообменных аппаратов. В дальнейшем способы определения указанного коэффициента были развиты как в их дальнейших работах, так и в работах других исследователей. Так Васильевым А.Н. и Будниковым Д.А. [51, 103, 114, 120, 288, 289] была предложена зависимость для процесса СВЧ-конвективной обработки зерна.

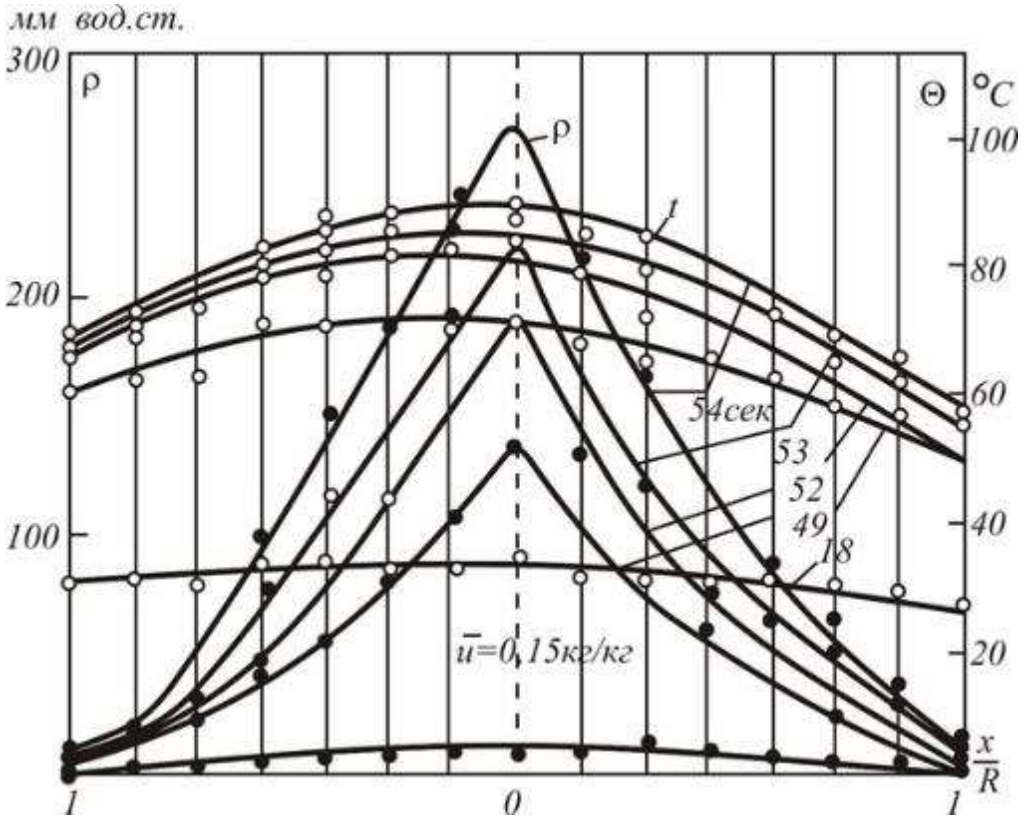
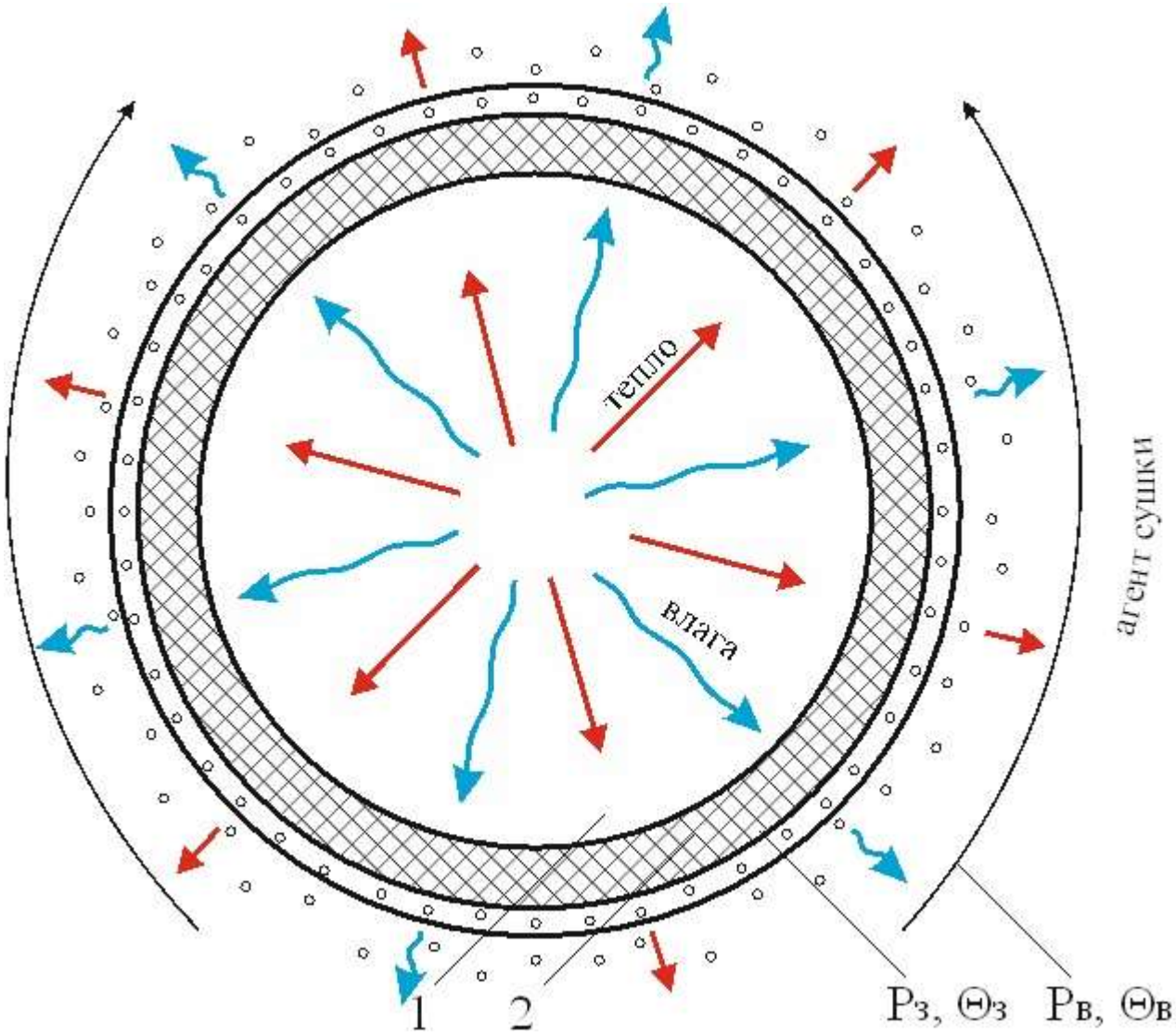


Рисунок 2.2 – Кривые изменения давления пара и температуры в песке при СВЧ нагреве [202]

Упрощенно механизм удаления влаги из зерна при высокочастотном подводе энергии может быть представлен следующим образом (рисунок 2.3 [51, 235]). Диэлектрический нагрев зерна, обладающий высокой интенсивностью, приводит к тому, что внутри зерна возникает избыточное (по сравнению с атмосферным) давление пара P_n. Создавшийся градиент давления является движущей силой переноса влаги из внутренних слоев к его поверхности. Величина градиента давления и, соответственно, скорость переноса влаги зависят от параметров электромагнитного поля СВЧ. При их высоких значениях избыточное давление может возрасти до такой степени, что окажется больше сопротивления структуры зерна и приведет к его разрушению. Таким образом при сушке зерна энергией ЭМП СВЧ внутренний влагоперенос может быть существенно (по сравнению с условиями конвективной сушки) интенсифицирован, однако только до какой-то критической величины, ограниченной условием сохранности структуры зерна и его качества в целом [231-237].



$P_з > P_в$; $Θ_з > Θ_в$.

1 – зерно; 2 – зона испарения влаги

Рисунок 2.3 - Механизм удаления влаги из зерна при высокочастотной сушке [51, 235]

Поступившая изнутри к поверхности зерна влага испаряется в окружающую среду. Скорость этого испарения или внешнего влагопереноса будет определяться уже не столько параметрами ЭМП СВЧ, сколько параметрами окружающей среды. Обязательное условие удаления влаги с поверхности зерна, как и при конвективной сушке – это наличие разности между парциальным давлением пара у его поверхности $P_з$ и в окружающей среде $P_в$ ($P_з > P_в$). Однако, если при конвективной сушке

температура окружающей среды (агента сушки) $\Theta_в$ больше температуры поверхности зерна $\Theta_з$ ($\Theta_в > \Theta_з$), то при высокочастотной сушке это условие внешнего влагопереноса не является существенным и $\Theta_в$ может быть меньше $\Theta_з$ (т.е. $\Theta_в < \Theta_з$).

Следовательно, сушка зерна энергией электромагнитного поля СВЧ, как и конвективная, характеризуется совокупностью двух явлений – внутреннего и внешнего влагопереноса. Однако, по сравнению с конвективной, при СВЧ - сушке зерна обеспечиваются лучшие условия внутреннего влагопереноса, чем внешнего, и процесс сушки лимитирует внешний влагоперенос, скорость которого определяется параметрами окружающей среды (воздуха).

В технологической цепи активного вентилирования в СВЧ активной зоне из системы дифференциальных уравнений (2.1), описывающей процесс тепловлагообмена при СВЧ обработке, уравнением (2.1.2) можно пренебречь. В результате, для СВЧ нагрева получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \Theta + \frac{r \cdot \varepsilon_{\text{пр}}}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_{уд}}{c \cdot \rho} \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \cdot \nabla^2 P - \frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{c_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases}, \tag{2.13}$$

С учетом того, что $\frac{\partial u}{\partial \tau} \to 0$ имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \Theta + \frac{Q_{уд}}{c \cdot \rho} \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \cdot \nabla^2 P \end{cases}. \tag{2.14}$$

После прекращения СВЧ воздействия система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot \Theta \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = a_{pr} \cdot \nabla^2 P \end{cases}. \tag{2.15}$$

Из системы уравнений (2.16) и (2.17) видно, что «движущими» составляющими процесса являются $\nabla^2 \Theta$ и $\nabla^2 P$ (*divgrad* температуры и давления).

Сложности расчета не только величины градиента давления, но и самого давления жидкости и пара в зерновке описаны выше. Поэтому целесообразно рассмотреть связь изменения давления в зерновке с изменением разности температур $\left(\Theta_{ц} - \Theta_{n}\right)$. На рисунке 2.10 представлены кривые изменения давления пара и температуры в песке при СВЧ нагреве [201].

Интенсивность СВЧ нагрева характеризуется величиной критерия Померанцева *Po*(τ). Экспериментальные исследования Максимова [66] для песка показывают, что после начального периода нагрева, когда распределение температуры внутри тела приобретает некоторое неизменное значение, дальнейший периодический нагрев не сопровождается изменением температуры $\left(\frac{d\Theta}{d\tau} = 0\right)$.

Для случая нагрева зернового слоя необходимо отметить две особенности:

1. скорость изменения температуры зернового слоя намного меньше скорости изменения температуры в единой зерновке;
2. скорость изменения давления паров внутри зерновки значительно больше скорости изменения температуры.

В этом случае [63]:

$$Po(\tau) = \frac{2(\Theta_{ц} - \Theta_{n})}{\Theta_{c}} - \frac{r \cdot \rho_{з} \cdot Lo^{2} \cdot c_{v}}{\lambda \cdot \Theta_{c}} \left[\frac{\partial P}{\partial \tau} - a_{p} \frac{\partial^{2} P}{\partial x^{2}}\right]_{x=0}, \qquad (2.16)$$

где $\Theta_{ц}$ – температура центральной точки тела, °С;

Θ_{n} – температура поверхности тела, °С;

Θ_{c} – средняя температура тела в интервале времени $\Delta\tau$ для которого определяется величина $\left(\frac{\partial P}{\partial \tau}\right)$, °С;

x – расстояние от центра зерновки, м;

L_{o} – определяющий размер материала, (для зерна – радиус зерновки), м.

Кривые распределения избыточного давления (рисунок 2.10) могут быть аппроксимированы в первом приближении формулой [202]:

$$P = P_ц\left[1 - A\left(\frac{x}{l}\right)^2 + B\left(\frac{x}{l}\right)^4\right], \quad (2.17)$$

где $P_ц$ - давление пара в центре зерновки, Па.

Откуда, для центра зерновки:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -P_ц \cdot \frac{2 \cdot A}{Lo^2}. \quad (2.18)$$

где $A = \dfrac{1}{1 - \dfrac{1}{6}\left(\dfrac{l}{x}\right)_n}$,

$\left(\dfrac{l}{x}\right)_n$ – расстояние до точки перегиба кривой $P = f\left(\dfrac{x}{R}\right)$, м.

Принимая x=0,45·R, а l=1 получим $\left(\dfrac{l}{x}\right)_n$ =2,222.

$$A = \frac{1}{1 - \frac{1}{6} \cdot 2{,}222} = 1{,}588, \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = -P_ц \cdot \frac{3{,}176}{Lo^2}. \quad (2.20)$$

С учетом, что $Po = \frac{Q_v \cdot Lo^2}{\lambda \cdot T_c}$ и подставив (2.2) в (2.1) получим:

$$\frac{Q_v \cdot Lo^2}{\lambda \cdot \Theta_c} = \frac{2 \cdot (\Theta_ц - \Theta_n)}{\Theta_c} - \frac{r \cdot \rho_З \cdot c_v \cdot Lo^2}{\lambda \cdot \Theta_c} \cdot \left(\frac{dP}{d\tau} + a_p \cdot P_ц \cdot \frac{3{,}176}{R^2}\right), \quad (2.21)$$

Откуда

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{2 \cdot (\Theta_ц - \Theta_n) \cdot \lambda - Q_v \cdot Lo^2}{r \cdot \rho_З \cdot c_v \cdot Lo^2} - 3{,}176 \cdot a_p \frac{P_ц}{Lo^2}. \quad (2.22)$$

где Q_v - количество тепла, выделенного в материале, Вт/м^3;

r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

$\rho_З$ - плотность зерна, кг/м^3;

λ - коэффициент теплопроводности зерна, $\dfrac{кДж}{м \cdot с \cdot °C}$;

c_ν – емкость тела по отношению к влажному воздуху,

$$c_\nu = \frac{1}{P_H}, \text{ Па}^{-1};$$

P_H – давление пара материала при данном влагосодержании, Па.

Мощность, выделенная в материале в случае диэлектрического нагрева, Q_v, Вт/м^3, определится как:

$$Q_\nu = 0{,}556 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot tg\delta; \qquad (2.23)$$

E – напряженность электрического поля, В/м;

f - частота поля, Гц;

ε' - диэлектрическая постоянная материала;

$tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

Чтобы решить дифференциальное уравнение и получить зависимость $P = f(\tau)$ необходимо принять начальные условия $P(0)$.

Перед СВЧ сушкой слоя зерна, который не продувается принудительно воздухом, между зерном и воздухом межзернового пространства устанавливается состояние гигротермического равновесия. Поэтому можно принять, что $P(0) = P_H$. Для влажности зерна 20% и температуре нагрева зерна 20°С давление насыщенного пара, P_u, при температуре испаряющийся жидкости составляет 2327,5 Па [201]. Давление пара материала найдется так.

В результате решения уравнения (2.3) получим [51, 124]:

$$P(\tau) = \frac{2 \cdot \lambda \cdot (\Theta_ц - \Theta_n) - Q_\nu R^2 - 3{,}176 \cdot a_p \cdot P_ц \cdot r \cdot \rho_З \cdot c_\nu}{r \cdot \rho_З \cdot c_\nu \cdot R^2} \cdot \tau + W_{O.З.} \cdot P_И. \qquad (2.24)$$

где $W_{O.З.}$ – влажность зерна в относительных единицах;

$$c_\nu = \frac{1}{P_H} = 0{,}0021 \text{ Па}^{-1};$$

$$P(\tau) = \frac{2 \cdot \lambda \cdot (\Theta_ц - \Theta_n) - 5{,}55 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon'' \cdot R^2 - 3{,}176 \cdot a_p \cdot P_ц \cdot r \cdot \rho_З \cdot c_\nu}{r \cdot \rho_З \cdot c_\nu \cdot R^2} \cdot \tau + W_{O.З.} \cdot P_И. \qquad (2.25)$$

Без указания начальных условий:

$$P(\tau) = \frac{2 \cdot \lambda \cdot (\Theta_ц - \Theta_п) - Q_v R^2 - 3{,}176 \cdot a_p \cdot P_ц \cdot r \cdot \rho_З \cdot c_v}{r \cdot \rho_З \cdot c_v \cdot {L_o}^2} \cdot \tau + C1. \quad (2.26)$$

Данное выражение позволяет получить изменение давления пара в центре зерновки при ее СВЧ нагреве.

Разница температур центра и поверхности зерновки также определяется диэлектрическим нагревом материала и определяется разницей диэлектрических свойств внутренних и наружных слоев зерновки.

Используя системы (2.12)…(2.15), а также зная, что температура центра, $\Theta_ц$, °С и поверхности, $\Theta_п$, °С зерновок определяются по следующим зависимостям [51]:

$$\Theta_Ц = \Theta_0 + \frac{2\mathrm{Q_v} \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^2}\left(e^{K\tau} - 1\right), \quad (2.27)$$

$$\Theta_П = \Theta_0 + 0{,}687 \cdot \frac{\mathrm{Q_v} \cdot R^2\left(e^{K\,\tau} - 1\right)}{\lambda \cdot \pi^3}, \quad (2.28)$$

получаем зависимость для определения температуры межзернового пространства:

$$T = \Theta_0 + 0{,}1124 \cdot R^2 \cdot \frac{\frac{Q_{V\text{сух}}}{\lambda_{\text{сух}}} \cdot K_\text{р} + \frac{Q_{V\text{вл}}}{\lambda_{\text{вл}}}}{1 + K_\text{р}} \cdot \left(\left(\frac{\gamma_\text{в} \cdot c_\text{в} \cdot K_{\text{РАЗ}}}{\alpha \cdot S_V} + 1\right) \cdot e^{K_{\text{РАЗ}} \cdot \tau} - 1\right), \quad (2.29)$$

где Θ_0 первоначальная температура зерна, °С;

R – радиус зерновки, м;

$Q_v, Q_{vссу}, Q_{vвв}$ – удельная мощность, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии СВЧ поля, сух- в сухом (рециркулируемом), вл - влажном, Вт/м^3;

λ, $\lambda_{сух}$ $\lambda_{вл}$, – коэффициент теплопроводности, сух - сухого (рециркулируемого), вл – влажного, Вт/м·°С;

$K_р$ – коэффициент рециркуляции;

$\gamma_в$ – удельный вес воздуха, кг/м^3;

$c_в$ – теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С;

$K_{РАЗ}$ – коэффициент разделения, с$^{-1}$;

α – коэффициент теплоотдачи, Дж/кг·с·°С;

S_v – удельная поверхность семян, 1/м.

Полученная математическая модель процессов происходящих в зерновках при СВЧ рециркуляции позволяет выполнять предварительные расчёты для определения режимов обработки зерна для его эффективной сушки.

Используя данные для начальной влажности зерна пшеницы 22%, влажности просушенного зерна 14% , коэффициента рециркуляции 3, исходной температуры зерна 20 ^{0}C рассчитали изменение температур в центре «влажной» зерновки, на её поверхности и в межзерновом пространстве (рисунок 2.4).

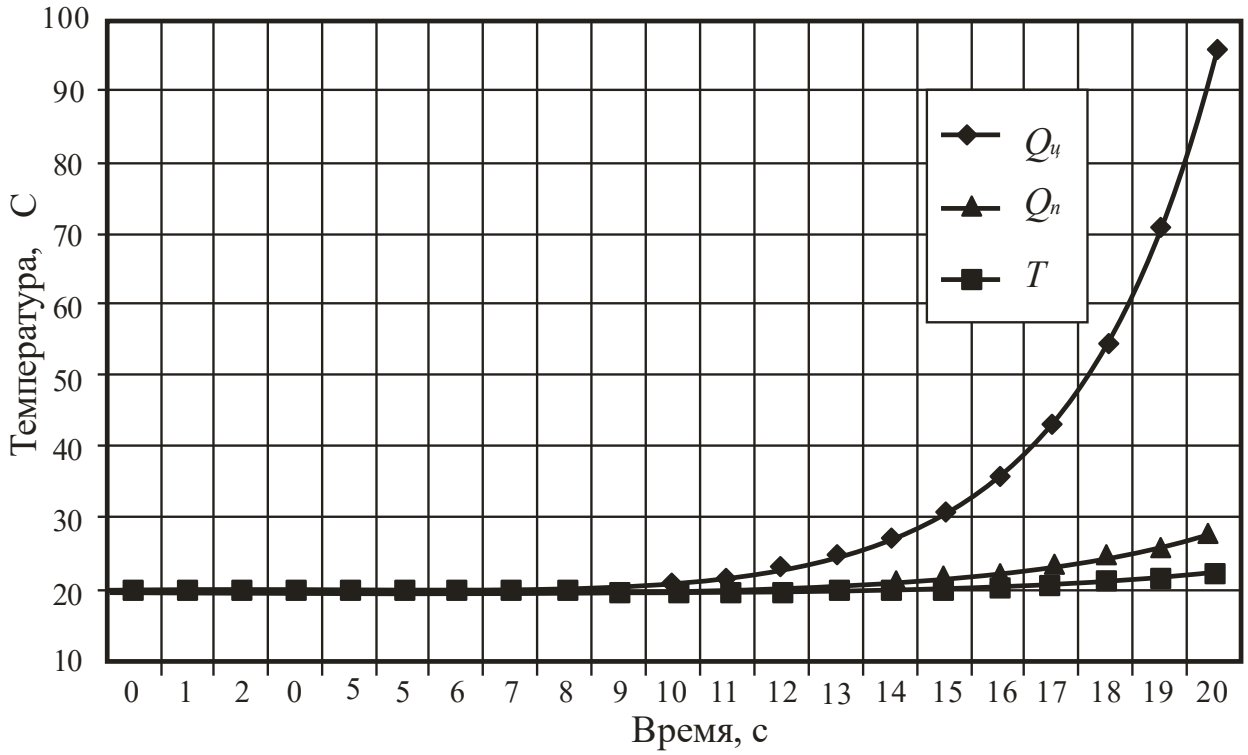


Рисунок 2.4 – Расчётные кривые изменения температуры в центре, $Q_ц$, на поверхности, $Q_п$, «влажной» зерновки и в межзерновом пространстве, T

Следует отметить, что данные графики носят, в большей степени, качественный характер, но позволяют судить о динамике температур в зерновом слое. Так представленные графики позволяют говорить, что при первом воздействии СВЧ поля на «влажную» зерновку температура в её центре и на поверхности изменяется в соответствии с ранее описанными закономерностями. Цент зерновки греется больше, поскольку имеет большую, чем поверхность влажность. Температура в межзерновом пространстве увеличивается не столь значительно, как в центре и

даже на поверхности зерновки. Это в определённой степени подтверждает высказанное ранее предположение о том, что за один приём СВЧ воздействие не представляется возможным добиться равномерного распределения температуры межзернового пространства и выравнивания температур между зерновками.

Выразив через теплотехнические свойства, нагрев материала в поле действия источника СВЧ поля упрощенно может быть описан следующей зависимостью:

$$dT = \frac{5{,}55 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon''}{c \cdot \rho_3} \cdot \tau. \qquad (2.30)$$

Для зерна пшеницы влажностью 15,6% зависимость нагрева от времени воздействия поля представлен на рисунке 2.5.

Стоит учитывать, что в общем виде напряженность поля по глубине материала убывает по экспоненциальному закону:

$$E = E_0 \cdot e^{-k_z x}. \qquad (2.31)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля на выходе волновода, В/м;

k_z – коэффициент затухания, обусловленный диэлектрическими свойствами, 1/м;

x – координата, м.

Так как коэффициент диэлектрических потерь обрабатываемого материала зависит от влажности и не остается постоянным в процессе сушки, то для данных зависимостей его следует определять как функцию от влажности $\varepsilon''=f(W)$.

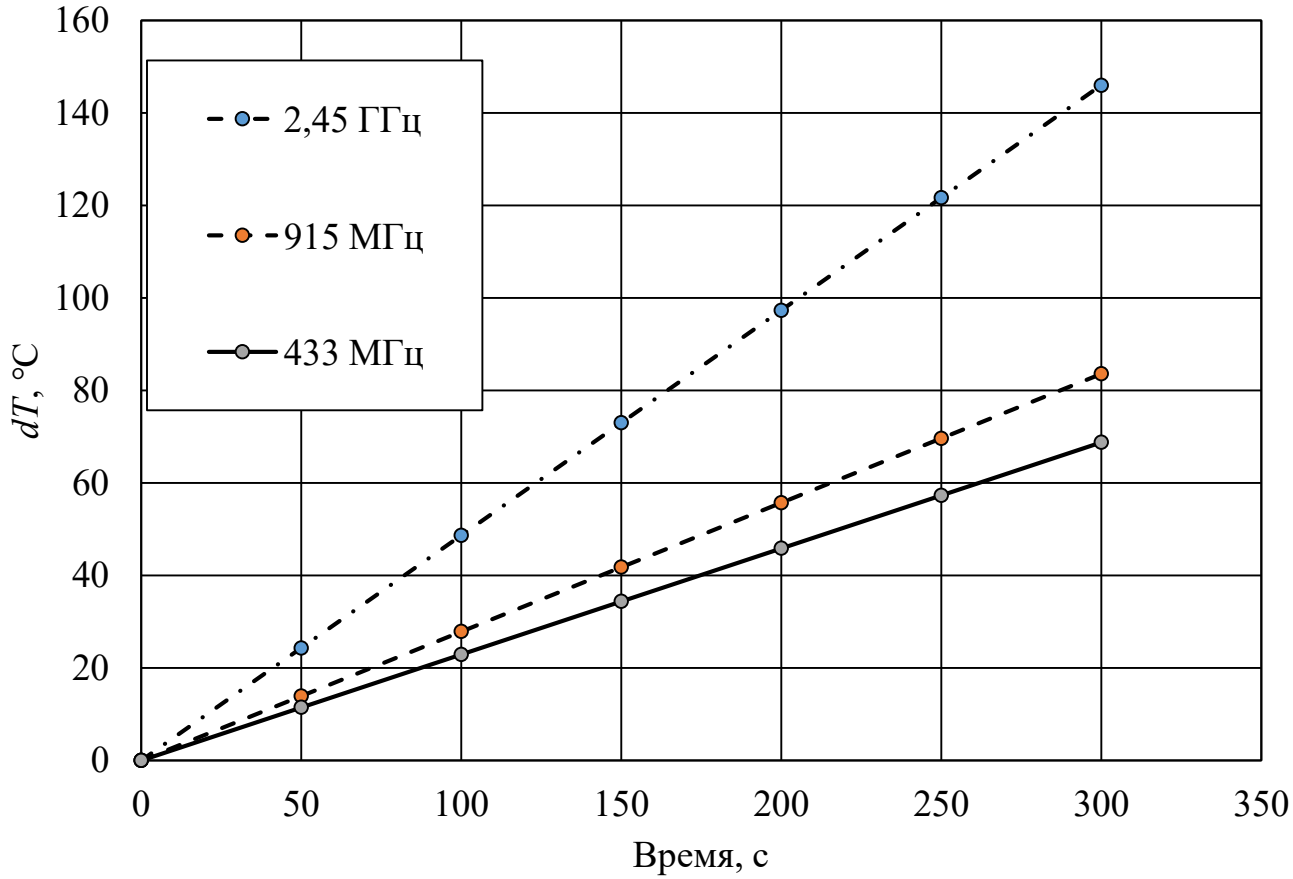
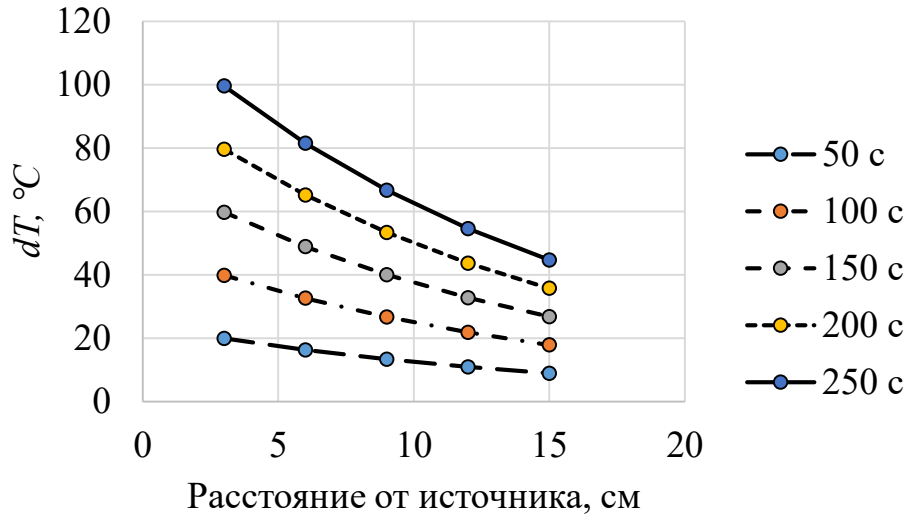
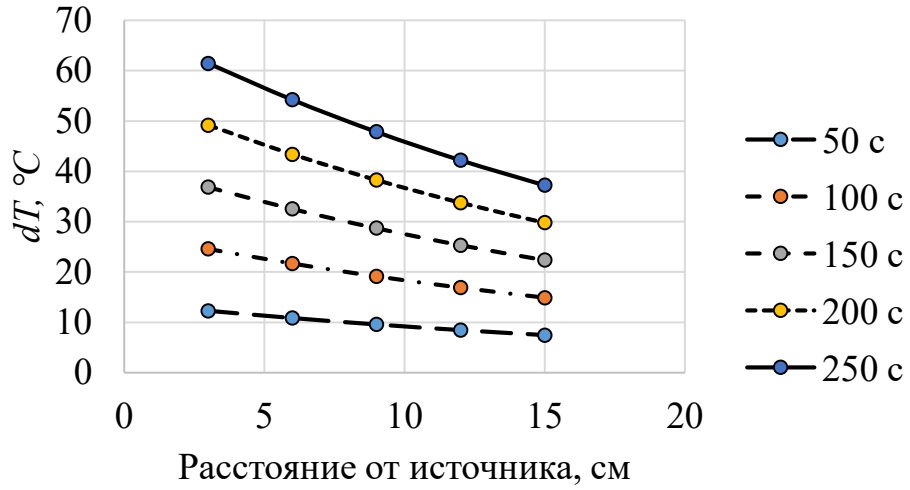


Рисунок 2.5 – Зависимость изменения температуры зерна от времени воздействия поля

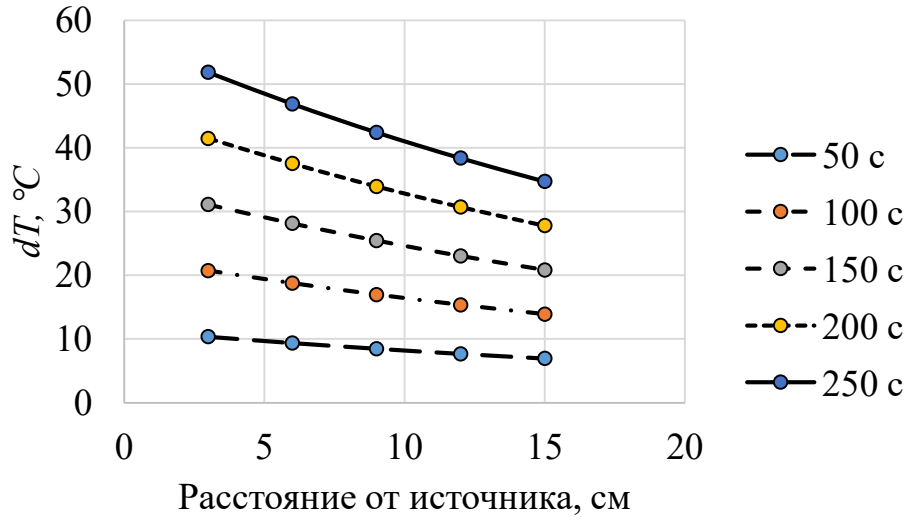
Принимая во внимание указанное снижение напряженности поля по мере распространения в материале получим кривые, отражающие зависимость температуры пшеницы влажность 15,6% от глубины проникновения СВЧ волны в зерновой слой при разном времени воздействия для разных частот. На рисунке 2.6 представлены зависимости температуры зернового слоя при различной частоте воздействующего поля (2,45 ГГц, 915 МГц, 433 МГц) и разном времени воздействия от расстояния до источника микроволнового поля [98, 286].



а



б



в

Рисунок 2.6 – Зависимость температуры нагрева от глубины слоя:

а – *f*=2,45ГГц; б – *f*=915 МГц; в – *f*=433 МГц

Из приведенных зависимостей очевидна высокая неравномерность распространения электромагнитной волны по объему обрабатываемого слоя, что должно учитываться при проектировании оборудования. Кроме того, зависимость диэлектрических свойств материала зависима от влажности обрабатываемого материала и должна быть выражена соответствующей функциональной зависимостью.

2.4 Выводы по разделу

1. Движущими силами, интенсифицирующими процессы тепло- влагопереноса при сушке зернового слоя СВЧ-конвективным воздействием, являются градиент температуры и давления водяных паров в обрабатываемом материале.

2. Для облегчения удаления влаги из зерна, особенно при удалении физико-химически и химически связанной влаги, необходимо обеспечить нагрев внутренних слоев зерновок, тем самым создавая необходимое направление градиентов температуры и давления.

3. Зависимость роста температуры зерна при воздействии микроволнового поля зависит от равномерности распространения поля и диэлектрических свойств обрабатываемого материала.

4. Особенности нагрева зернового слоя под действием микроволнового поля, а также распространение поля в нем должны учитываться при определении параметров и режимов работы оборудования СВЧ-конвективной сушки.

5. Диэлектрические свойства зерна влияют на поглощение воздействующего поля и его распространение в слое обрабатываемого материала, таким образом необходимо определить их зависимость от влажности и состояния слоя.

6. При СВЧ-конвективной сушке влагосъем необходимо осуществлять непосредственно в процессе микроволнового воздействия за счет агента сушки, продувающего слой обрабатываемого материала.

3 ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ СВЧ-КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНОВОЙ СЛОЙ

3.1 Параметры разрабатываемого оборудования

Оборудование для СВЧ-конвективной обработки предполагается разрабатывать в виде модулей, позволяющих масштабировать конечную установку под требуемую конечным потребителем производительность. Модули в свою очередь могут состоять из нескольких уровней магнетронов, размещенных по продуктопроводу, обеспечивая обработку зернового слоя. Количество магнетронов на один уровень так же может варьироваться. Так возможно обеспечить масштабирование как при вертикальном, так и горизонтальном объединении модулей в единую конструкцию. Основными параметрами, которые необходимо являются количество магнетронов на одном уровне воздействия модуля, количество уровней; расстояние между уровнями воздействия; сечение продуктопровода. Данные параметры зависят от равномерности распространения микроволнового поля в объеме обрабатываемого материала; диэлектрических свойств обрабатываемого материала, мощности источников микроволновой мощности.

Изначально будут рассматриваться варианты с двумя встречно направленными источниками микроволновой мощности, действующими на общий продуктопровод. Таким образом минимальным количеством магнетронов на уровень будет приниматься 2.

Как было показано выше, напряженность микроволнового поля значительно снижается по мере удаления от источника в слой обрабатываемого материала. Это прежде всего связано с потерями на нагрев материала, а степень снижения определяется диэлектрическими свойствами материала. Для того, чтобы оценить равномерность распространения поля в слое обрабатываемого материала от этих источников может быть проведен численный эксперимент, для которого входными данными будут являться диэлектрические свойства обрабатываемого материала. Таким образом, необходимо рассмотреть имеющиеся сведения о диэлектрических свойствах зерна.

3.2 Существующие сведения о диэлектрических свойствах зерна

3.2.1 Общие сведения о диэлектриках

Диэлектрики представляют собой класс материалов, которые являются плохими проводниками электричества, в отличие от таких материалов, как металлы, которые, как правило, хорошие электрические проводники. Многие материалы, в том числе пищевые продукты, живые организмы, а также большинство сельскохозяйственных продуктов, проводят электрический ток в определенной степени, но они по-прежнему классифицируются как диэлектрики [13, 40, 116, 366]. Электрическую природу этих материалов можно описать их диэлектрическими свойствами, которые влияют на распределение электромагнитных полей и токов в области, занятой материалами, и которые определяют проводимость материалов в электрических полях. Таким образом, диэлектрические свойства определяют, насколько быстро материал нагреется в поле ВЧ или СВЧ нагрева. Их влияние на электрические поля также позволяют создавать средства измерения некоторых других свойств материалов, которые могут быть соотнесены с диэлектрическими свойствами посредством неразрушающих электрических измерений. Таким образом, диэлектрические свойства сельскохозяйственной продукции имеют важное значение для определения качества измерений в сельскохозяйственной отрасли, а также в области диэлектрического нагрева.

Несколько упрощенные определения диэлектрических свойств полезны при обсуждении их применения. Основной характеристикой всех форм электромагнитной энергии, является их распространение через свободное пространство со скоростью света c. Скорость распространения ν электромагнитной энергии в материале зависит от электромагнитных характеристик этого материала и определяется как [330]:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}, \tag{3.1}$$

где μ – магнитная проницаемость материала; ε – диэлектрическая проницаемость.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость, ε, может быть представлена как комплексная величина:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \tag{3.2}$$

где ε' – действительная часть, называемая диэлектрической постоянной;

ε'' – мнимая часть, называемая фактором диэлектрических потерь.

Эти величины являются диэлектрическими свойствами, представляющими практический интерес. Диэлектрическая постоянная ε' связана со способностью материала накапливать энергию электрического поля в материале, а коэффициент потерь ε'' связана со способностью материала поглощать или рассеивать энергию, то есть, чтобы преобразовать электрическую энергию в тепловую энергию. Коэффициент диэлектрических потерь, например, является показателем склонности материала к нагреву в микроволновом поле. Диэлектрическая проницаемость также имеет важное значение из-за его влияния на распределение электрических полей. Например, электрическая емкость из двух параллельных проводящих пластин, разделенных свободным пространством или воздухом, будет умножена на величину диэлектрической проницаемости материала, если пространство между пластинами заполняется этим материалом.

Следует также отметить, что:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-i\delta}, \tag{3.3}$$

где δ угол диэлектрических потерь.

Чаще используют тангенс угла потерь, $tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$, или тангенса угла диэлектрических потерь. Этот показатель также используется для описания диэлектрических свойств материала. В некоторых случаях используется коэффициент мощности:

$$tg\delta/\sqrt{1 + tg^2\delta}. \tag{3.4}$$

Проводимость диэлектрика σ, См/м, определяется как:

$$\sigma = \omega\varepsilon_0\varepsilon'', \tag{3.5}$$

где $\omega=2\pi f$ – угловая частота, Гц.

Часто ε'' интерпретирует потери энергии в диэлектрике относительно всех действующих диэлектрических механизмов релаксации и ионной проводимости.

С.С. Суворовым предложено диэлектрическую проницаемость влажной пшеницы вычислять по зависимоси:

$$\varepsilon = \varepsilon_{з0} + k_f \cdot w^{n_f}, \tag{3.6}$$

где $\varepsilon_{з0}$ — диэлектрическая проницаемость абсолютно сухого зерна;

w — влажность зерна, о.е;

k_f, n_f — коэффициенты, постоянные для данной частоты.

Аналогичная формула рекомендована им и для тангенса угла потерь пшеницы. И.А. Васильева для зависимости электропроводности зерна от влажности предлагает формулу:

$$\sigma = a_v \cdot exp(\, b_v \cdot \omega) + C_v, \tag{3.7}$$

где a_v, b_v, C_v — постоянные.

Температура также непосредственно влияет на электрофизические свойства зерна, что связано с изменением состояния воды, поглощенной зерном. На это указывают данные С.С. Суворова. Он установил, что электросопротивление зернового слоя при повышении температуры снижается, причем тем заметнее, чем ниже влажность зерна. Такую особенность можно объяснить, если учесть, что при повышении температуры свойства воды, связанной с большей энергией, должны измениться значительнее, чем воды, связанной слабее. Графики зависимости логарифма электросопротивления зерна от температуры распадаются каждый на два прямолинейных отрезка. Причем критическое значение температуры $t_{кр}$ тем выше, чем ниже влажность зерна. Если сопоставить значения критической температуры с влагосодержанием зерна, то получается, что график имеет излом при влагосодержании 16,5%.

По данным А. А. Пикерегиля, с повышением температуры значения диэлектрической проницаемости возрастают, причем тем быстрее, чем больше влагосодержание зерна.

3.2.2 Диэлектрические свойства зерна

Диэлектрические свойства некоторых видов сельскохозяйственных продуктов, представленные в таблице 3.1 [317].

Таблица 3.1 – Диэлектрические свойства зерновых [317]

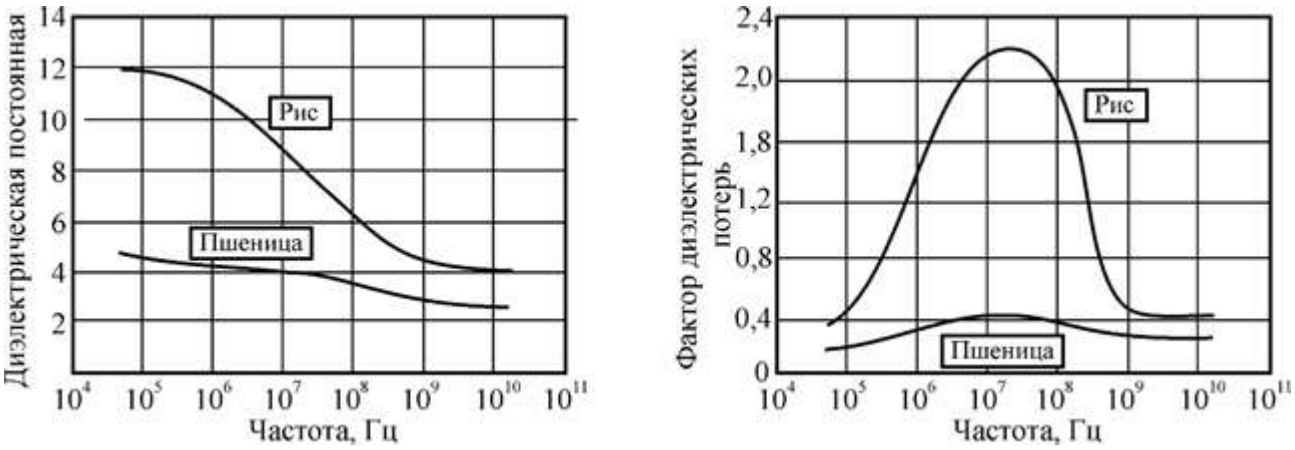
T, °C	W, %		Частота, Гц								
			10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пшеница											
22	12	ε’ ε”									2,56 0,28
	12	ε’ ε”									2,78 0,46
25		ε’ ε”						2,95 0,28	2,9 0,375	2,47 0,305	
24	6,0	ε’ ε”		4,12 0,13	4,12 0,12	4,12 0,13	3,46 0,21	3,16 0,32	2,89 0,24	2,42 0,13	2,03 0,10
	16,8	ε’ ε”		27,0 10,0	15,6 5,62	9,15 3,16	5,38 1,15	4,92 0,562	4,51 0,365	3,78 0,299	2,89 0,274
	23,8	ε’ ε”		365	100	13,3	3,16	1,28	0,562	0,562	0,649
24	10,0	ε’ ε”	6,23 1,82	5,4 1,14	2,99 0,34						
	12,0	ε’ ε”	9,19 4,09	7,19 2,95	5,09 1,09						
	14,0	ε’ ε”	14,11 5,23	10,9 5,23	6,75 3,23						
	15,8	ε’ ε”	20,67 6,25	17,2 7,73	9,86 5,80						
24	12,5	ε’ ε”	9,69 2,89	7,53 2,31	5,46 0,91	4,46 0,33	4,54 0,21	4,3 0,41	3,61 0,45	2,89 0,29	2,58 0,25
люцерна											
24	7,5	ε’ ε”		4,8 2,0	4,0 0,46	3,7 0,21	3,5 0,17	3,3 0,25	2,9 0,25	2,5 0,13	2,3 0,13
24	5,5	ε’ ε”	3,85 0,56	3,85 0,33	3,53 0,1						
	6,8	ε’ ε”	5,64 3,33	4,49 1,44	3,85 0,33						
	7,8	ε’ ε”	10,26 5,89	5,77 3,58	4,49 0,89						
	10,7	ε’ ε”	17,5 6,78	16,0 4,11	9,29 4,89						

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ячмень											
21	12	ε’ ε”									2,3 0,16
	18	ε’ ε”									2,65 0,39
24	9,2	ε’ ε”					3,0 0,15	2,9 0,25	2,8 0,38		
	15,2	ε’ ε”					3,9 0,56	3,4 0,35	3,25 0,44		
	20,0	ε’ ε”					5,05 1,35	4,7 0,7	3,8 0,53		
просо											
21	8	ε’ ε”						3,28 0,08			
	11	ε’ ε”						3,83 0,108			
	14,5	ε’ ε”						4,79 0,135			
	21	ε’ ε”						6,72 0,196			
	24	ε’ ε”		1,4 0	1,15 0,01						
овес											
24	7,7	ε’ ε”	2,9 0,48	2,9 0,29	2,71 0,079						
	9,5	ε’ ε”	4,52 2,14	3,87 1,11	3,23 0,25						
	11,1	ε’ ε”	10,65 4,29	7,1 3,89	4,19 1,03						
	12,6	ε’ ε”	15,81 2,14	13,55 3,89	7,23 3,02						
	14,0	ε’ ε”	18,7 2,86	17,1 3,33	11,16 4,29						
24	10,7	ε’ ε”	7,32 3,79	5,05 2,06	3,51 0,74	2,95 0,25	2,89 0,12	2,68 0,21	2,37 0,22	2,06 0,17	1,96 0,12
21		ε’ ε”		5,0 0,016	4,4 0,079						
соевые бобы											
24	6,1	ε’ ε”	3,05 0,62	2,85 0,39	2,58 0,12						
	8,5	ε’ ε”	7,5 4,2	5,2 3,0	3,7 0,16						
	10,8	ε’ ε”	12,2 2,6	10,5 3,5	6,5 3,0						
	12,7	ε’ ε”	14,8 4,8	13,1 3,5	9,6 3,3						

Как видно из таблицы 3.1 данные зерновых значительно зависят от влажности, частоты и температуры, при этом даже при одинаковых условиях в пределах одной и той же культуры данные могут значительно отличаться, что можно связать с особенностями сорта. Кроме того, все данные приводятся для плотного слоя, т.к. определение диэлектрических свойств сопряжено с рядом технических сложностей.

По данным С.О. Нельсона [330-332, 334], зависимость диэлектрических свойств риса и твердой пшеницы влажностью 10,6% при температуре 24 °С от частоты воздействующего поля может быть представлена в виде графика, приведенного на рисунке 3.1 [330].



а б

Рисунок 3.1 – Зависимость диэлектрических свойств риса и твердой пшеницы влажностью 10,6% при температуре 24 °С от частоты воздействующего поля [330]

Также существуют данные о свойствах не только зерновых материалов, но и зерновых вредителей. Существенная разница зависимостей их диэлектрических свойств, позволяет разрабатывать режимы, используемые при дезинсекции продуктов при хранении. Кроме того, можно отметить резонанс коэффициента диэлектрических потерь в диапазоне 10-100 МГц.

Это может быть использовано при разработке оборудования тепловой обработки, однако мощность, выделяемая на этих частотах, может оказаться недоста-

точной для обеспечения некоторых технологических процессов. Кроме того, от частоты поля и свойств обрабатываемых материалов, помимо выделяемой мощности существенно зависит глубина обработки материала. Эти сведения важны для разработки и моделирования зон СВЧ-конвективной обработки зерновых материалов.

3.2.3 Глубина проникновения

При распространении электромагнитной волны происходят потери по мере удаления от источника. При воздействии ЭМП часть волны отражается от обрабатываемого материала, оставшаяся часть будет проникать в материал. Напряженность ЭМП уменьшается по мере распространения от источника. Это снижение происходит неравномерно (рисунок 3.2) и, при изучении распространения электромагнитного поля в материалах, вводят понятие глубины проникновения поля, d_p, м, которая определяется по зависимости [336]:

$$d_p = \frac{\lambda_l \cdot \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \cdot \varepsilon''}, \tag{3.8}$$

где λ_l - длинна волны, м.

Глубина проникновения электрического поля в материал (d_p), определяется как расстояние, на котором падающая электромагнитная волна проникающая перпендикулярно поверхности материала прежде, чем его интенсивность уменьшается на коэффициент 1/e (e – основание натурального логарифма 2,71828) его амплитуды на поверхности. Так же глубина проникновения электрического поля может быть определена как [330]:

$$d_p = \frac{c}{2\sqrt{2}\pi f\left[\varepsilon'\left(\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}\right)-1\right]^{\frac{1}{2}}}, \tag{3.9}$$

где c – скорость света в вакууме (3×10^8 м/с).

Для обеспечения равномерности поля источники могут быть расположены определенным образом, например, встречно друг другу. На рисунке 3.3 [55, 288, 336] схематически показано распределение потока мощности от двух встречных источников, к воздействующих на диэлектрический материал с высоким коэффициентом потерь.

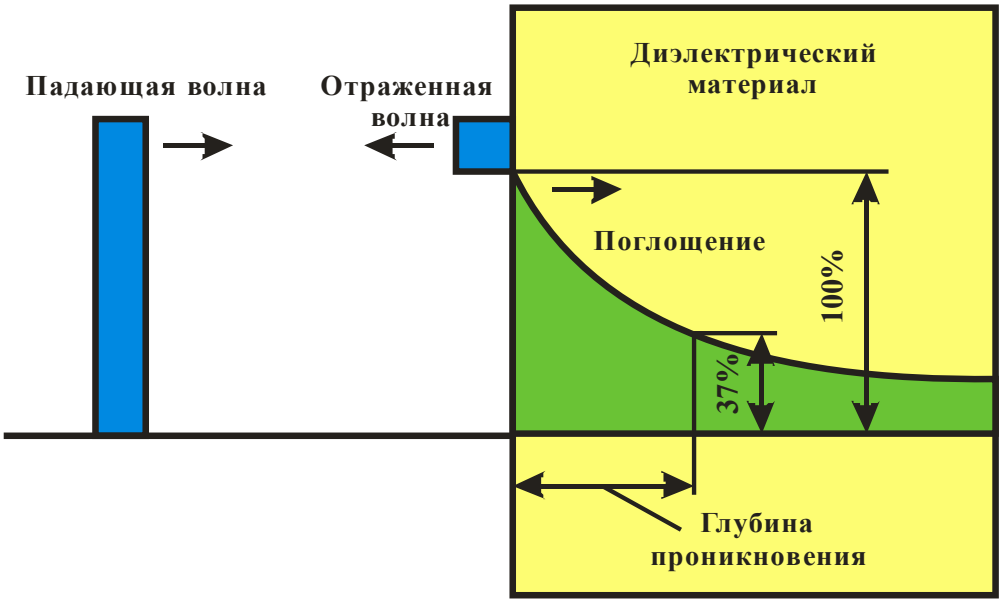


Рисунок 3.2 – Схематичное распределение энергии электромагнитной волны в слое диэлектрика с высоким уровнем фактора диэлектрических потерь [336]

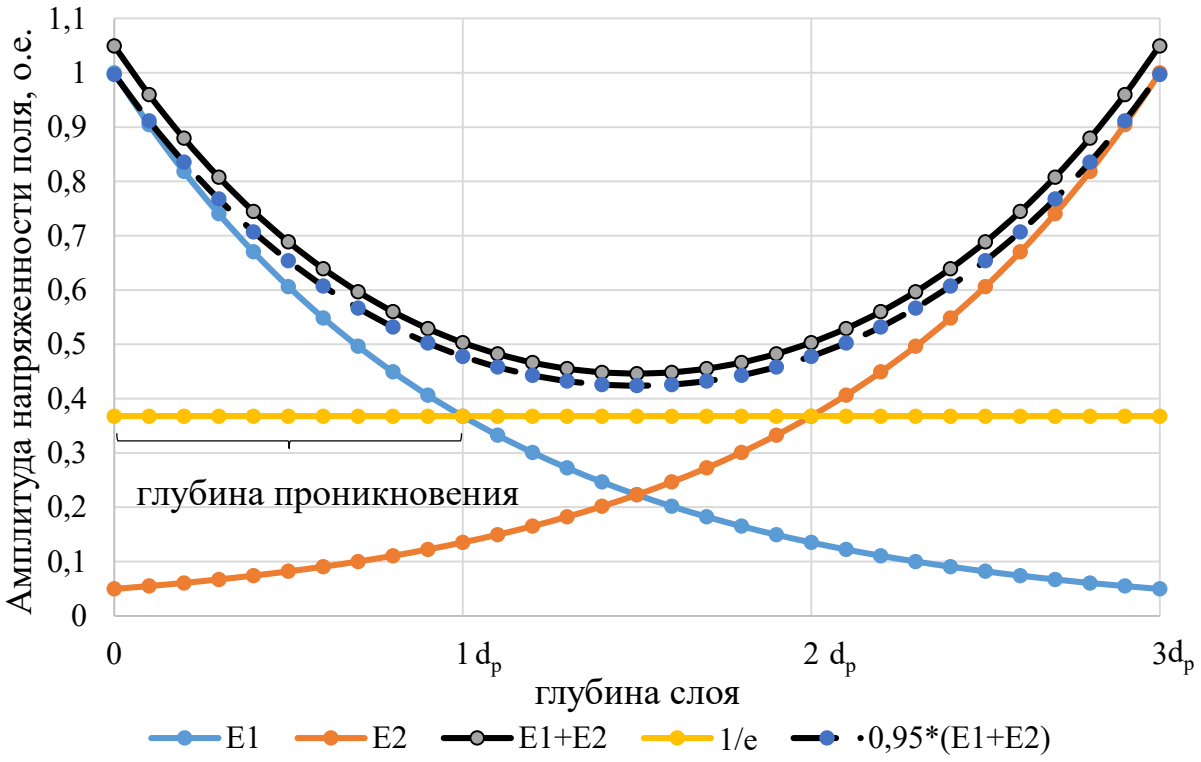


Рисунок 3.3 – Поток энергии от двух встречных источников, когда электромагнитная волна воздействует на диэлектрический материал с высоким коэффициентом потерь

На рисунке 3.3 кривая E1 характеризует распределение напряженности поля от одного источника поля, E2 – от источника, направленного встречно первому. Линия 1/e – показывает уровень напряженности, характеризующий глубину проникновения поля в материал. Кривые E1+E2 и 0,95·(E1+E2) характеризуют суммарное поле от двух встречно расположенных источников без учета потерь и с ними соответственно. Информация о значениях d_p различных материалов зависит от диэлектрических свойств и необходима для расчета конструктивных параметров зон СВЧ-обработки.

Диэлектрические свойства некоторых продуктов с учетом расчетной глубины проникновения представлены ранее в таблице 1.6 [332, 334, 361, 366].

Сельскохозяйственные материалы, такие как зерновые культуры являются полярными диэлектриками. Их диэлектрические свойства зависят от частоты воздействующего поля, температуры, влажности и других факторов. Диэлектрические свойства воды и их зависимости от температуры и частоты приведены ранее. Свойства сельскохозяйственных материалов и продуктов зависят от содержания воды и формы ее связи.

Так как имеющиеся диэлектрические свойства зерновых материалов относятся не только к нашим (Андреев С.Н., Кудин В.Н., Козлова К.И., Сергеева Т.З., Кузенбаев К.), но и к зарубежным исследователям (Kwok B.P., Nelson S.O., Stetson L.E., Suggest A., Clark A.H.) при этом большинство современных данных относятся к зарубежными исследованиям и не охватывают районированные для России сорта, необходимо обновить данные о диэлектрических свойствах. Кроме того, в существующей литературе не представлены данные о свойствах разряженного и взвешенного слоя. Таким образом необходимо разработать методику определения диэлектрических свойств зерновых материалов для уточнения коэффициента диэлектрических потерь зерна в плотном и псевдоожиженном слое.

3.3 Равномерность распределения электромагнитной волны в зерновом слое

Так как приведенные зависимости и картины распределения предполагается использовать для обоснования параметров зоны микроволнового воздействия, необходимо учесть эту неравномерность. Для того, чтобы учесть влияние неравномерности распространения поля по объему необходимо ввести коэффициент равномерности распространения слоя, $K_{\text{равн}}$. Данный коэффициент, представляет собой отношение средней напряженности по объему камеры к максимальной напряженности. Аналогично данный коэффициент может быть рассчитан как квадратный корень отношения средней мощности, поглощаемой зерновым материалом в объеме продуктопровода к максимальной:

$$K_{\text{равн}} = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{max}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{max}}} = \sqrt{\frac{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot E_{\text{ср}}^2 \cdot f \cdot \varepsilon\prime \cdot tg\delta}{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot E_{max}^2 \cdot f \cdot \varepsilon\prime \cdot tg\delta}}, \quad (3.10)$$

где $E_{\text{ср}}$ – среднее значение амплитуды напряженности электрического поля в объеме обрабатываемого материала, В/м;

E_{max} – наибольшее значение амплитуды напряженности электрического поля в объеме зоны СВЧ-конвективной обработки, В/м;

$Q_{\text{ср}}$, Q_{max} – средняя и максимальная мощность, рассеиваемая в диэлектрическом материале, Вт/м^3;

ε' – диэлектрическая постоянная материала на данной частоте;

$tg\delta$-тангенс угла диэлектрических потерь;

f – частота поля, Гц.

При учете того, что под глубиной проникновения в материал понимается расстояние, на котором амплитуда падающей волны уменьшается в e раз, то минимальный коэффициент равномерности $K_{\text{равн.min}}$, на который следует ориентироваться может быть определен как:

$$K_{\text{равн}.min} = {}^{1}/_{e} = 0{,}368. \quad (3.11)$$

С учетом коэффициента равномерности мощность, выделяемая в материале при диэлектрическом нагреве, определится как:

$$Q_v = 0{,}556 \cdot 10^{-10} \cdot {E_{max}}^2 \cdot K_{\text{равн}}^2 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot tg\delta. \quad (3.12)$$

При этом средняя удельная энергия, рассеиваемая в зерне в процессе СВЧ-нагрева, $P_{\text{ср}}$, Дж/м^3, за время τ, с, без учета определится как:

$$P_{cp} = 0{,}556 \cdot 10^{-10} \cdot {E_{max}}^2 \cdot K_{\text{равн}}^2 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot tg\delta \cdot \tau. \quad (3.13)$$

С учетом существующих данных о диэлектрических свойствах некоторых материалов и при напряженности 30 кВ/м (что характерно для объемных резонаторов [24, 214]) можно рассчитать усредненные мощности, рассеиваемые в 1 м^3 зернового материала в процессе микроволнового нагрева (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Усредненные значения мощности, рассеиваемой в 1 м^3 пшеницы в процессе микроволнового нагрева

	$K_{\text{равн}}$=0,3	$K_{\text{равн}}$=0,4	$K_{\text{равн}}$=0,5	$K_{\text{равн}}$=0,5	$K_{\text{равн}}$=0,5
1	2	3	4	5	6
τ, с	*W*=16%	*W*=16%	*W*=16%	*W*=20%	*W*=24%
0	0	0	0	0	0
5	109135,5	194018,6909	303154,2045	403853,1	502421,9
10	218271	388037,3818	606308,409	807706,3	1004844
15	327406,5	582056,0726	909462,6135	1211559	1507266
20	436542,1	776074,7635	1212616,818	1615413	2009688
25	545677,6	970093,4544	1515771,023	2019266	2512110
30	654813,1	1164112,145	1818925,227	2423119	3014532
35	763948,6	1358130,836	2122079,432	2826972	3516954
40	873084,1	1552149,527	2425233,636	3230825	4019375
45	982219,6	1746168,218	2728387,841	3634678	4521797
50	1091355	1940186,909	3031542,045	4038531	5024219
55	1200491	2134205,6	3334696,25	4442385	5526641
60	1309626	2328224,291	3637850,454	4846238	6029063
65	1418762	2522242,981	3941004,659	5250091	6531485
70	1527897	2716261,672	4244158,863	5653944	7033907

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
75	1637033	2910280,363	4547313,068	6057797	7536329
80	1746168	3104299,054	4850467,272	6461650	8038751
85	1855304	3298317,745	5153621,477	6865503	8541173
90	1964439	3492336,436	5456775,681	7269356	9043595
95	2073575	3686355,127	5759929,886	7673210	9546017
100	2182710	3880373,818	6063084,09	8077063	10048439
105	2291846	4074392,508	6366238,295	8480916	10550861
110	2400981	4268411,199	6669392,499	8884769	11053282
115	2510117	4462429,89	6972546,704	9288622	11555704
120	2619252	4656448,581	7275700,908	9692475	12058126

В дальнейшем коэффициент равномерности распространения электромагнитного поля может быть использован для оценки применимости конструкции зоны СВЧ-конвективной обработки совместно с применяемыми волноводами при конструировании оборудования тепловой обработки зерна.

3.4 Численный эксперимент по определению коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия

3.4.1 Постановка задачи для численного моделирования

Для решения задачи о распространении электромагнитных волн в волноводе с диэлектриком необходимо решить двумерные уравнения Гельмгольца в различных областях волновода [20, 22, 198, 216, 238, 266, 335], в частности, в пустом волноводе (продуктопроводе) и в заполненным диэлектриком, также записать граничные условия связывающие данные уравнения.

$$\nabla^2 E_{z\,1,2} + \gamma_{1,2}^2 E_{z\,1,2} = 0, \tag{3.14}$$

$$\nabla^2 H_{z\,1,2} + \gamma_{1,2}^2 H_{z\,1,2} = 0, \tag{3.15}$$

$$\gamma_1 = \sqrt{\left(\frac{\omega}{\mathrm{c}}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{cr}}\right)^2}, \tag{3.16}$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\left(\frac{\omega\sqrt{\varepsilon\mu}}{\mathrm{c}}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{cr}}\right)^2}, \quad (3.17)$$

где ω – угловая частота, Гц;

c – скорость света, м/с;

λ_{cr} – критическая длина волны, м;

ε – комплексная диэлектрическая проницаемость;

μ – комплексная магнитная проницаемость (принята равной единице).

Граничные условия определяются равенством нулю тангенциальных компонент напряженности электрического поля на металлическом контуре [22], а также непрерывность тангенциальных составляющих, компонент напряженностей электрического и магнитного полей на границе раздела диэлектрических сред [22]:

$$E_{z\,1,2} = 0, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial H_{z\,1,2}}{\partial n} = 0, \quad (3.19)$$

при $x=a$ и $y=b$

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}, \quad (3.20)$$

$$H_{\tau 1} = H_{\tau 2}, \quad (3.21)$$

где E_τ – тангенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля, В/м;

H_τ – тангенциальные составляющие вектора напряженности магнитного поля, А/м.

В случае, когда поверхность раздела имеет наклон, тангенциальная составляющая имеет вид:

$$E_{\tau 1} = E_1 \cdot cos\phi, \quad (3.22)$$

где ϕ – угол падения.

Данную задачу можно решить численно. В настоящее время, существует достаточно большое количество специализированного программного обеспечения, использующего различные численные методы [194, 238].

3.4.2 Обоснование выбора программной среды для разработки компьютерной модели

В качестве примеров таких продуктов можно привести CST Microwave Studio, HFSS, Microwave office и другие [187]. В данных продуктах расчет основан на решении уравнений Максвелла с учетом условий, задаваемых конструкцией и условиями работы. Применение данных средств позволяет проводить ускоренное моделирование, однако в случае их применения необходима экспериментальная проверка для доработки компьютерной модели. Также, не смотря на возможность масштабирования модели необходимо учитывать зависимость свойств материалов от предыдущей обработки. Таким образом, данные, полученные в предыдущих разделах, могут быть использованы как для разработки конструкции установки, так и для задания свойств обрабатываемых материалов.

Обращая внимание на программы электродинамического моделирования, следует отметить большое разнообразие используемых математических методов, реализуемых в программных средах. Так стоит отметить метод моментов, реализованный в Microwave Office. Он предназначен для моделирования многослойных печатных схем. Этот же метод был усовершенствован и реализован в системе IE3D3 – системе трехмерного электродинамического моделирования СВЧ устройств. Данный программный продукт позволяет рассчитывать антенные системы сложной конфигурации и анализировать их диаграммы направленности. Другой программный продукт этой же компании Fidelity решает задачу электродинамического моделирования методом FDTD (Finite Difference Time Domain). Этот метод позволяет анализировать более сложные структуры, произвольной конфигурации. Он также реализован в программе FDTD, которая позволяет анализировать невзаимные СВЧ устройства (например, ферритовые вентили, циркуляторы и т.д.) [21, 194].

Еще одним продуктом, имеющим широкий функционал и выполняющим сходие задачи является получившая в настоящее время большое развитие программа High Frequency System Simulator (HFSS) компании AnSoft. Данный продукт

предназначен для анализа трехмерных СВЧ структур, в том числе, антенн и невзаимных устройств, содержащих ферриты [194, 355].

В HFSS электродинамическое моделирование основано на использовании метода конечных элементов (Finite Element Method, FEM). Использование данного метода обеспечивает высокую степень универсальности численных алгоритмов, и которые оказываются весьма эффективными для широкого круга задач от анализа волноводных и полосковых структур до моделирования антенн и сложных невзаимных устройств, содержащих гиротропные среды [21, 194, 354].

Еще одни мощным программным комплексом является CST MICROWAVE STUDIO. Это программное обеспечение представляет собой мощный программный комплекс трехмерного моделирования электромагнитного поля. Программа использует различные методы расчета поля (расчет переходного процесса во временной области, анализ в частотной области, метод нахождения собственных частот). Основной метод – расчет переходного процесса решает задачи возбуждения структуры радиоимпульсами, что отличает её от большинства других программных продуктов [19, 194]. Стоит отметить, что в последние годы отечественные инженеры и исследователи уделяют данному программному комплексу всё больше внимания.

В процессе проектирования СВЧ устройств с помощью CST Microwave Studio, как и во многих из приведенных программных продуктах, трехмерный вид конструкции вводятся с помощью черчения простейших геометрических фигур – примитивов и выполнения логических (булевых) операций над ними. Имеются и широкие возможности импорта моделей из других программ, например, SolidWorks. После того, как конструкция начерчена и заданы граничные условия, включая источники возбуждения, выполняется разбиение всего пространства задачи на сетку, а затем рассчитывается поле в каждой точке пространства.

Наиболее гибкий метод расчета, реализованный в Microwave Studio в виде переходного решающего устройства Transient Solver, может провести расчет проектируемого устройства в широком диапазоне частот после расчета единственной

переходной характеристики (в отличие от частотного метода, который требует анализ во многих частотных точках) [21, 194].

Результаты, получаемые данным продуктом основаны на методе конечного интегрирования (Finite Integration Technique, FIT), который представляет собой последовательную схему дискретизации уравнений Максвелла в интегральной форме. Получаемые матричные уравнения дискретизированных полей могут быть использованы для численного моделирования на современных компьютерах. Кроме того, алгебраические свойства этой теории дискретного электромагнитного поля позволяют аналитически и алгебраически использовать законы сохранения энергии и заряда для дискретной формулировки и дают стабильный алгоритм расчета численным методом во временной области [46, 56, 65, 194].

Для решения задач, заявленных в данной работе, наиболее привлекательными выглядят ANSOFT HFSS и CST Microwave Studio. Также данные продукты позволяют проводить тепловые расчеты на основе проведенных решений задач электродинамического моделирования. В качестве программной среды для моделирования электромагнитных полей, распространяющихся в зерновых полях, будет использован программный комплекс CST Microwave Studio.

3.5 Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с одним источником

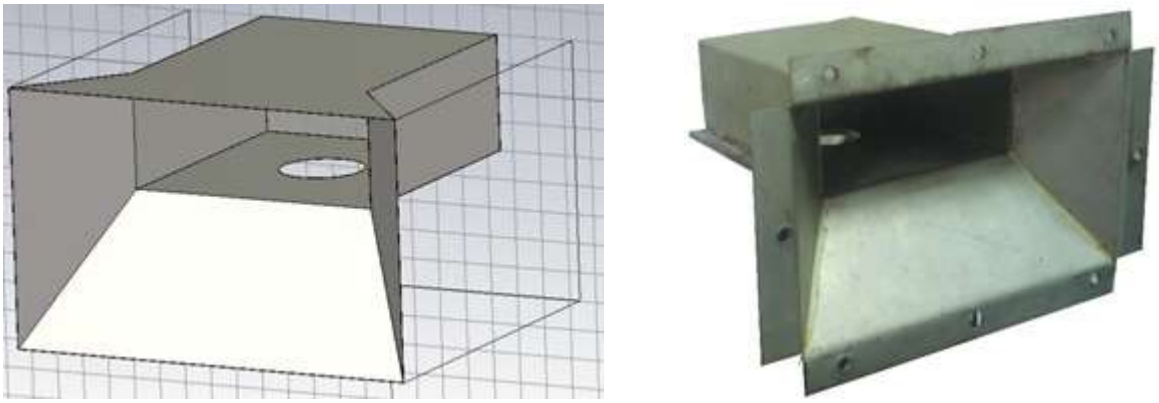
Для разработки установки СВЧ-конвективного воздействия предполагается использование магнетронов частотой 2,45 ГГц, при мощности 0,5-1 кВт. Применение таких источников СВЧ-мощности позволяет обеспечить воздушное охлаждение источников и блоков питания, а также приемлемые скорости нагрева обрабатываемого зерна, благодаря чему можно избежать повреждения структуры зерна, а также регулирование процессом нагрева. Моделирование будет производиться для одного и группы источников микроволновой энергии.

3.5.1 Моделирование волновода

Изначально в качестве волновода будет использован плоский волновод с асимметричным по одной оси рупором. Данная форма (рисунок 3.4) была применена

ранее [51] и позволяет защитить источник от отраженной волны падающего на зерновой материал поля.

Упрощенно процесс моделирования волновода, источника и распределения поля на примере волновода, применяемого в модульной установке обработки зерновых материалов с использованием СВЧ поля. На первом этапе необходимо построить трехмерную модель волновода, посредством которого будет осуществляться передача энергии поля. Общий вид указанного волновода приведен на рисунке 3.4.



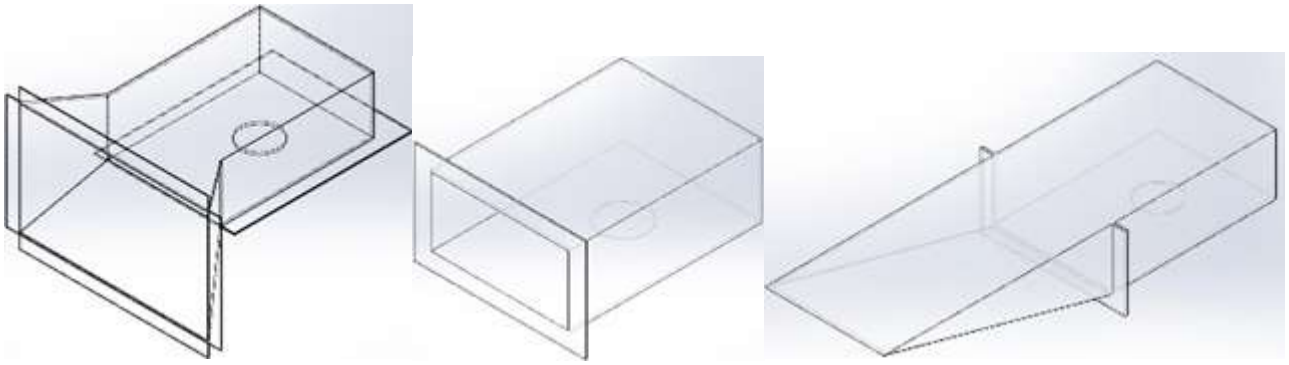
а б

Рисунок 3.4 – трехмерная модель волновода: а – трехмерная модель; б – внешний вид волновода

В настоящей работе использованы несколько вариантов исполнения волноводов рисунок 2.7. Волноводы, используемые в данной работе выполнены на основе стандартных сечений по ОСТ 4.206.000 ред.1-77 (таблица 3.3). Из указанных в таблице 2.2 было принято сечение 90,0 х 45,0 мм. Далее исходный волновод (рисунок 3.5 б) дорабатывался в одном случае до ассиметричного по одной оси рупором с выходным сечением 150×90 мм (рисунок 3.5 а). В другом случае отсечением волновода по высоте под углом 15 градусов (рисунок 3.5 в), данная форма волновода первоначально была предложена в работе Пахомова В.И. и применялась для предотвращения повреждения источника СВЧ мощности отраженной от материала волной.

Таблица 3.3 – Стандартные сечения волноводов для частоты 2,45 ГГц по ОСТ 4.206.000 ред.1-77

Сечение волновода АхБ, мм (ряд %)	Частотный диапазон, ГГц	Тип волновода	Сечение волновода АхБ,мм (ряд %)	Частотный диапазон, ГГц	Тип фланца
По ОСТ 4.206.000 ред. 1-77			По версии EIA		
90,0 х 45,0 (1)	2,14-3,20	WR-340	86,360х43,180	3,4-1,7	UG 1712/U
110 х 55 (2)	1,72-2,59	WR-430	109,22х54,610	1,7-2,6	UG 1716/U



а б в

Рисунок 3.5 - Формы рассматриваемых волноводов: а – с ассиметричным по одной оси рупором (выходное сечение 150×90 мм); б – стандартный волновод (выходное сечение 90×45 мм); в – усеченный под углом 15 градусов волновод (выходное сечение 90×45 мм)

CST Studio позволяет проводить моделирование структур непосредственно в ней, либо импортировать разработанные во внешних САПР (SolidWorks Компас 3Д, и др.). Во время разработки модели волновода, в качестве материала был указан PEC (идеальный проводник). При необходимости может быть выбран любой материал из достаточно обширной базы материалов, исследованных ранее. В случае, если необходимого материала нет или его параметры отличаются от имеющихся в базе, может быть создан новый материал с заданными показателями.

Далее необходимо указываются расположение и параметры источника поля. Для этого также представлен ряд инструментов для наиболее точного получения картины, происходящей в устройстве [62, 68, 86, 132]. Пример окна задания свойств приведен на рисунке 3.6.

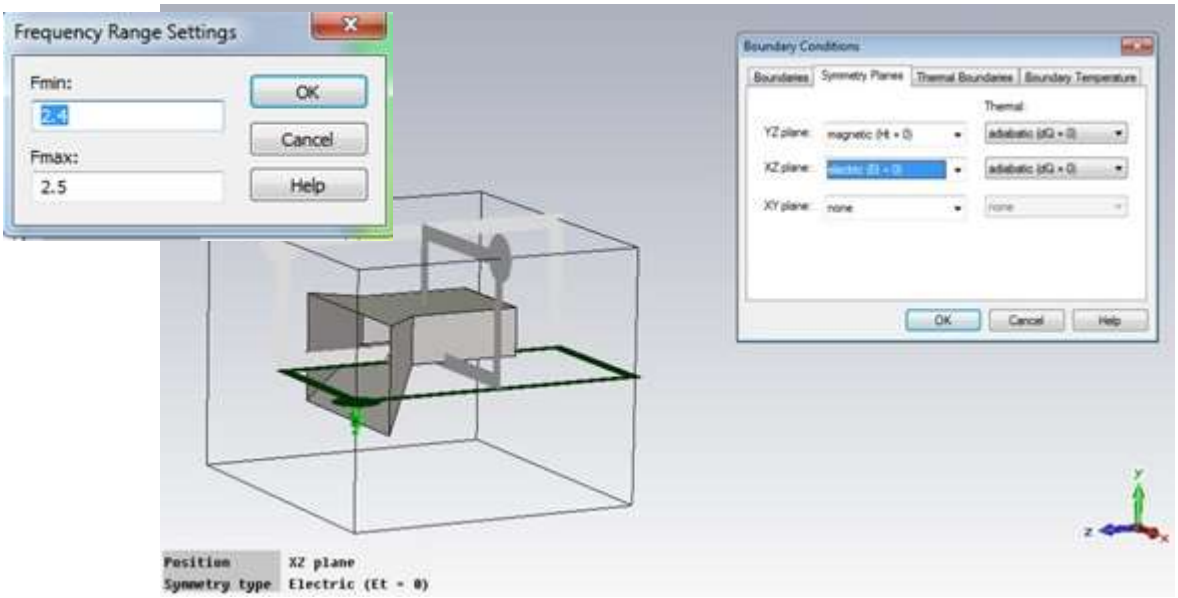


Рисунок 3.6 – Параметры поля и источника

Далее выбираются типы требуемых для расчета и визуального представления мониторов (рисунок 3.7). Для изучения распространения микроволнового поля в зерновом материале выбираем следующие мониторы: электрическое поле (E-Field); поток мощности (Power flow); удельные потери мощности (Power loss density). Результаты моделирования E-Field будут использованы для оценки равномерности распространения микроволнового поля в материале, определения проблемных зон продуктопровода, в которых напряженность поля будет на слишком низком уровне, не позволяющем проводить достаточную для интенсификации тепловых процессов обработку. Расчет Power flow и Power loss density характеризуют распространяемую в волноводе и продуктопроводе мощность источников, а также ту часть энергии, которая рассеивается в обрабатываемом материале.

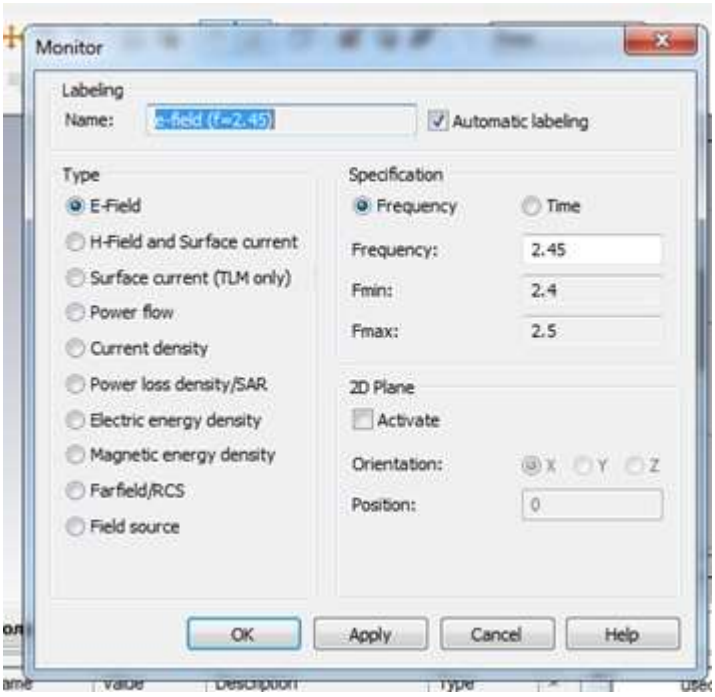


Рисунок 3.7 – Меню добавления рассчитываемых мониторов

Для указанного примера был выбран расчет и визуализация электрического(E-Field) поля. Расчет производился временным решателем. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.8.

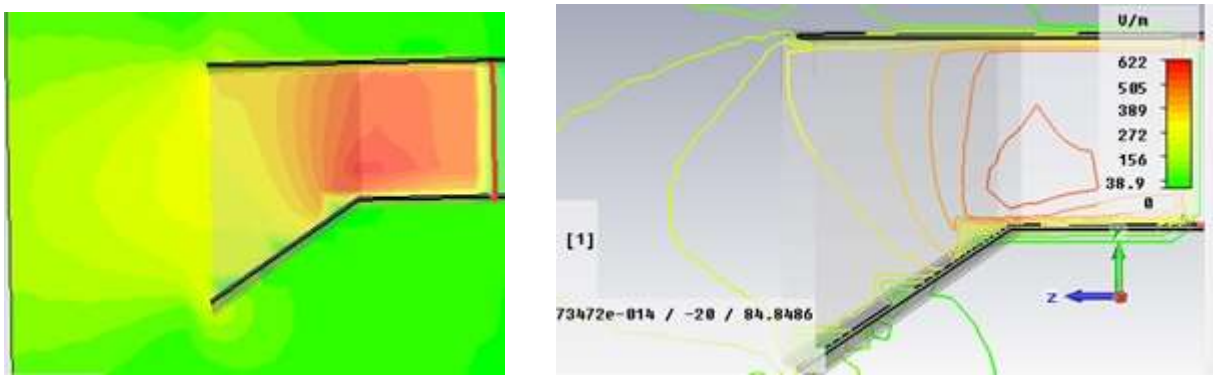


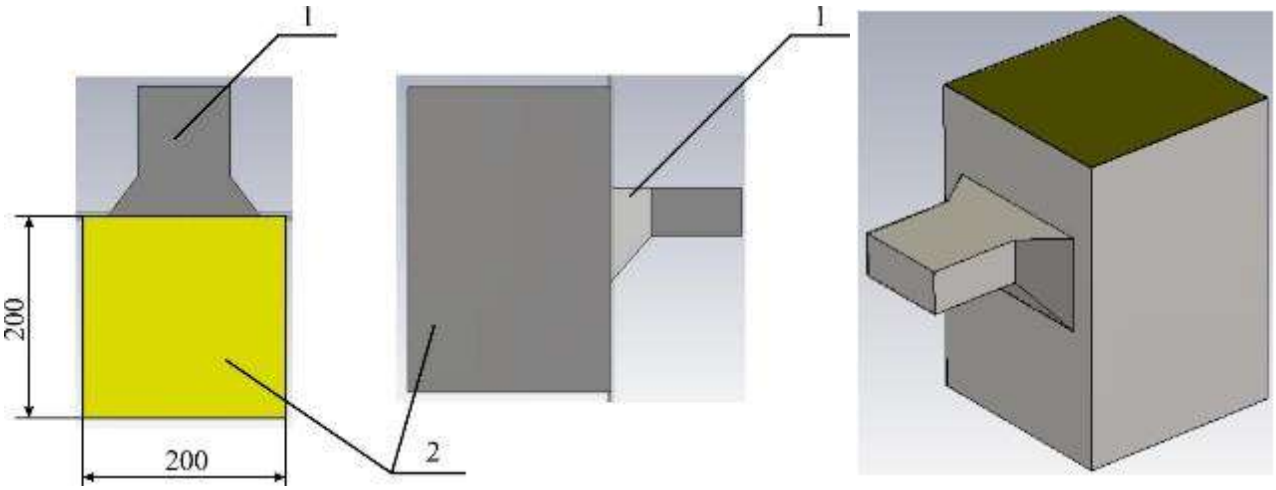
Рисунок 3.8 – Результаты моделирования E-Field в волноводе

По результирующей картине видна картина направленности поля, соответствующая полученным ранее [51, 132, 141, 336] экспериментальным данным. В дальнейшем для расчета и наглядного представления процессов, происходящих в материале в процессе его обработки СВЧ-полем необходимо построить модель

зоны, в которой будет происходить микроволновое воздействие, ввести необходимое количество источников поля и их расположение, указать наличие и параметры материала. Важно внести не только электротехнические, но и физические и теплофизические характеристики.

3.5.2 Моделирование зоны СВЧ-конвективной обработки зерна с одним источником

Исходя из расчетных глубин проникновения электромагнитного поля в зерновой слой и размера выходной части апертуры рупора волновода (150×90мм), в качестве размера продуктопровода на один источник можно принять продуктопровод сечением 200×200 мм (рисунок 3.9). Полость продуктопровода заполняем материалом, обработка которого нас интересует. В данном случае весь объем заполнен сплошным телом, которому задаются имеющиеся свойства зерна требуемой культуры, влажности, температуры.



1 – Волновод; 2 - продуктопровод

Рисунок 3.9 – Продуктопровод установки СВЧ-конвективного воздействия, содержащей один источник микроволновой мощности

Для дальнейшего моделирование требуются данные о диэлектрических свойствах обрабатываемого материала. На настоящий момент существует большое количество данных о свойствах сельскохозяйственных материалов, полученных как

отечественными, так и зарубежными исследователями. Наиболее полные сведения на настоящий момент представлены в работах Стюарта О. Нельсона. В таблице 2.3 представлены некоторые сводные данные по диэлектрическим свойствам зерновых материалов, полученный из работ С.О. Нельсона, С.С. Суворова, И.А. Васильевой, Ю. Ванга и других [311, 320, 330, 352, 366].

Таблица 3.4 – Диэлектрические свойства зерновых материалов [311, 320, 330, 352, 366]

№	Материал	Влажность, W, %	ε'	ε''	$tg\delta$
1.	Пшеница	14	2,76	1,46	0,53
2.		16	3,14	1,98	0,63
3.		20	3,61	2,64	0,73
4.		24	3,95	3,28	0,83
5.		26	4,38	4,07	0,93
6.	Ячмень	14	3,50	0,28	0,08
7.		16	3,98	0,46	0,12
8.		20	4,64	0,80	0,17
9.		24	5,04	0,99	0,20
10.		28	5,61	1,35	0,24
11.	Овес	14	2,65	0,56	0,21
12.		16	3,02	0,33	0,11
13.		20	3,51	0,49	0,14
14.		24	3,82	0,71	0,19
15.		28	4,24	0,89	0,21

Результаты проведенного моделирования распространения напряженности поля частотой 2,45 ГГц от источника мощностью 750 Вт в плотном слое ячменя влажностью 17,1% [62, 80] приведена на рисунке 3.10. На боковом срезе видно, что распространение падающей волны по материалу происходит гармонически с постепенно снижающейся частотой. Это соответствует аналитическим закономерностям распространения поля, однако в реальных установках картина сглаживается и распространение происходит более плавно. На рисунке 3.11 приведена полученная

при моделировании картина распределения тепловой мощности, выделяемой в материале. Именно эта энергия характеризует энергию, идущую на нагрев зерна и воды, находящейся на его поверхности и в капиллярах. Этот нагрев интенсифицирует тепло-влагоперенос. Температурный градиент при этом направлен от центра конкретной зерновки к поверхности. Это происходит за счет более высокой влажности внутренней области зерновок и, следовательно, большему коэффициенту диэлектрических потерь, который в свою очередь характеризует мощность, выделяемую в материале.

По полученным результатам, представленным на рисунке 3.11 видно, что картина распространения ближе к реальной, однако существенная неравномерность может привести к ряду негативных последствий. Так в случае обработки материала высокой начальной влажности область на выходе рупорной части магнетрона (область падения волны на материал) создается объем локального перегрева материала. Это же приведет к тому, что удаленные от источника области практически не будут подвержены воздействию ЭМП. Все это характерно для материалов, начальная влажность которых существенно превосходит уровень кондиционной влажности. Например, для пшеницы и ячменя это характерно для уровней влажности выше 20%. При учете того, что при этих уровнях влажности удаление влаги происходит интенсивно с поверхности зерна конвективным способом и характеризуется достаточно низким уровнем затрат, применение СВЧ энергии для интенсификации сушки, особенно в постоянном режиме работы, будет нецелесообразным. Наоборот, для уровней влажности близких к кондиционным (15-16% для пшеницы) увеличивается равномерность распределения ЭМП, глубина его проникновения и эффект от применения для интенсификации тепло-влагопереноса [55, 61, 71, 91, 115, 133, 342].

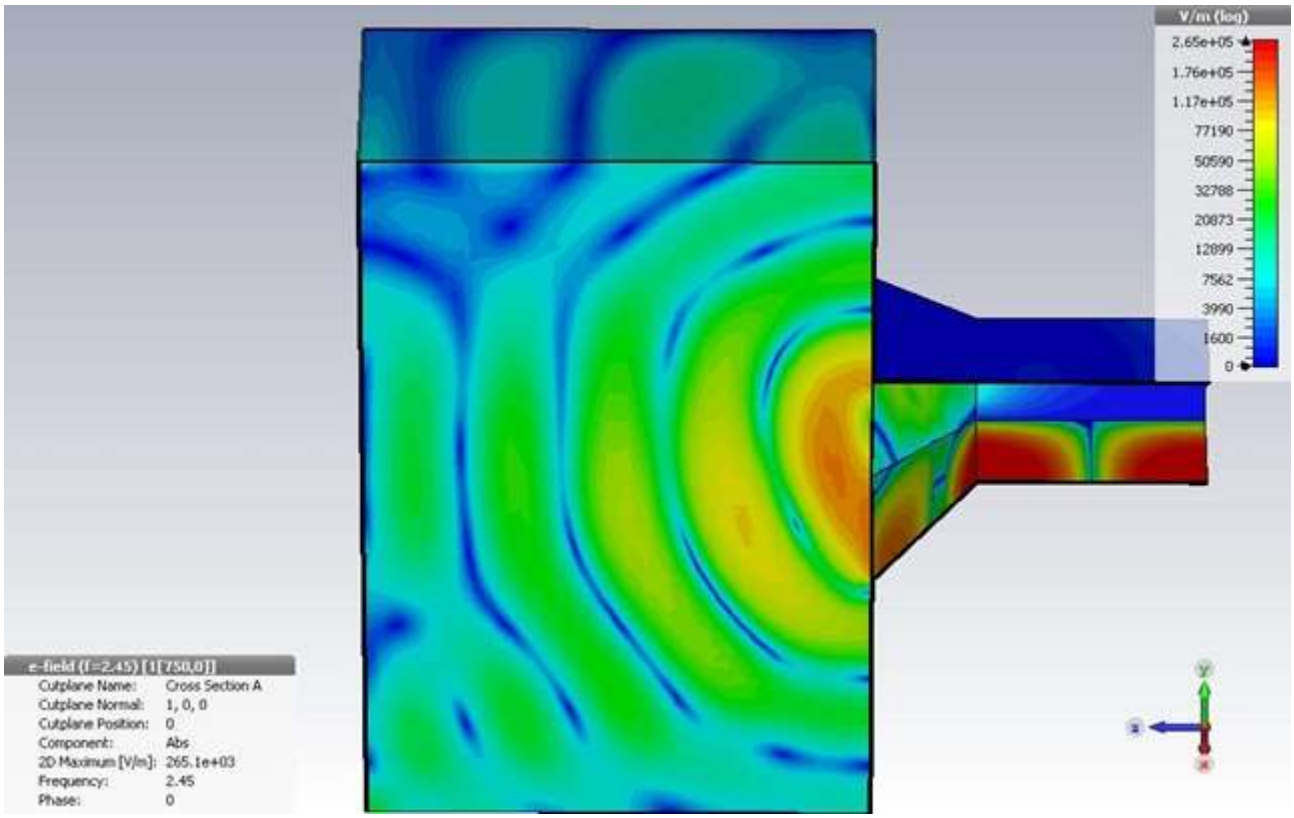


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования напряженности электрического поля

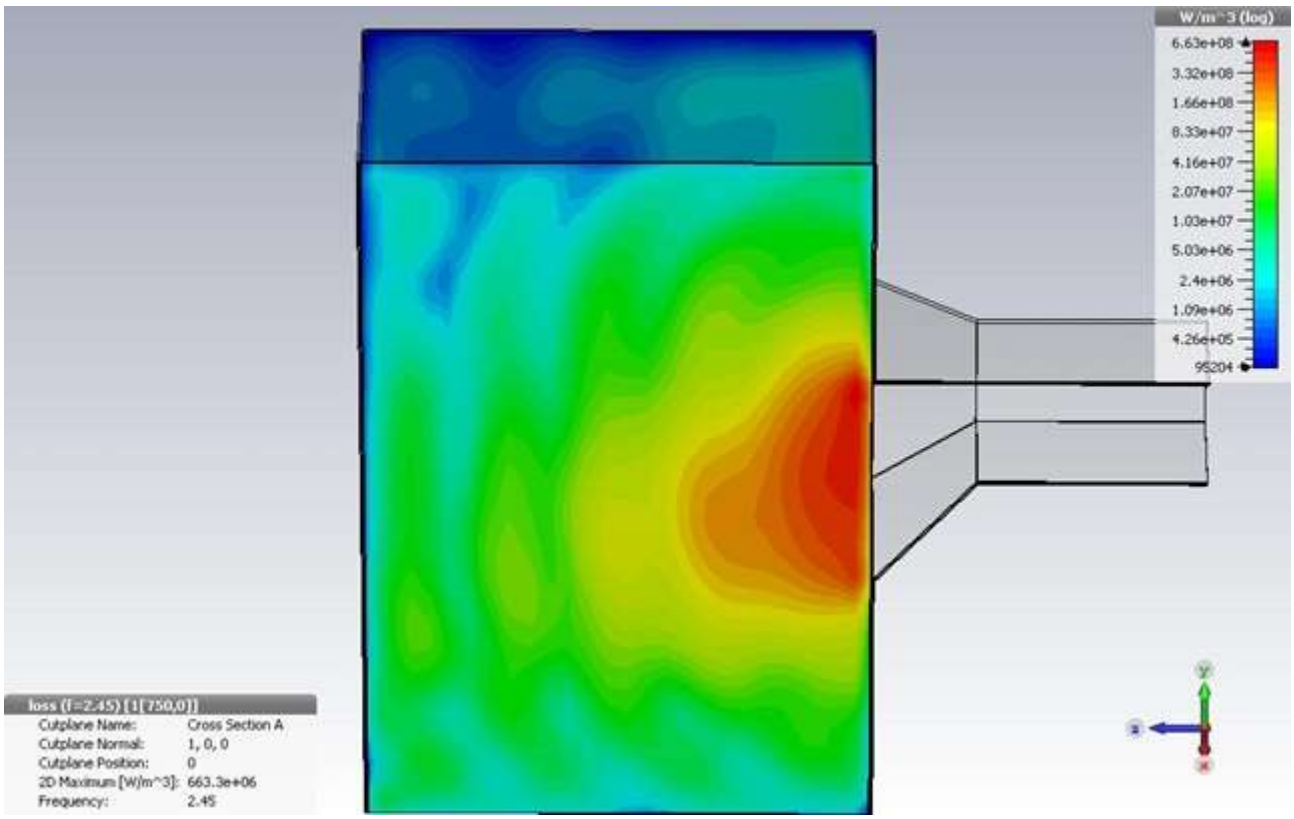
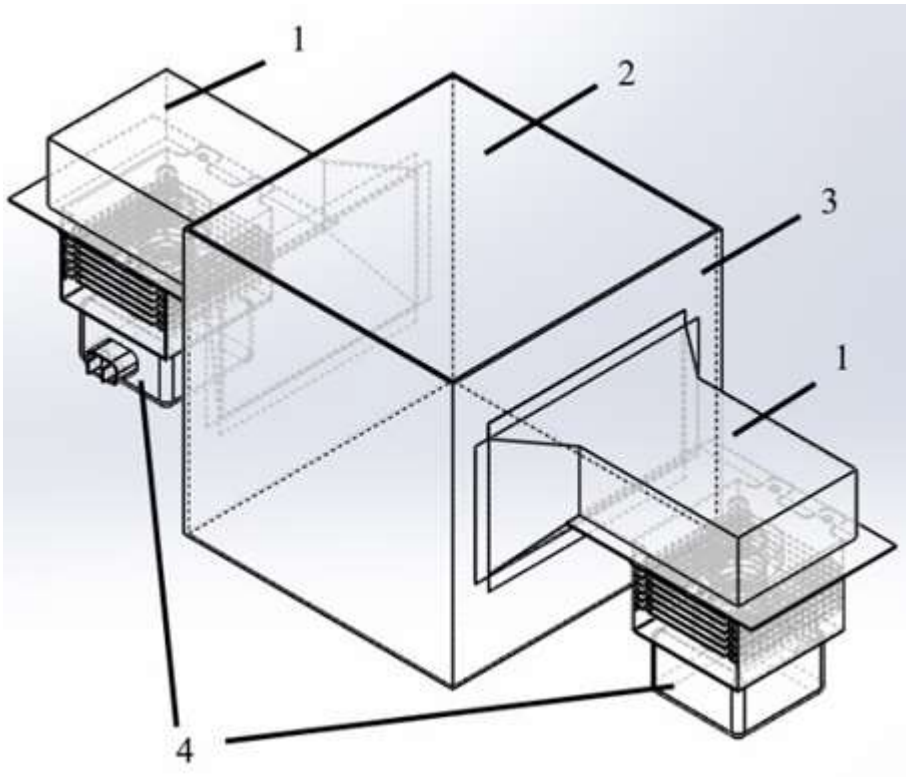


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования удельной мощности, выделяемой в слое обрабатываемого материала

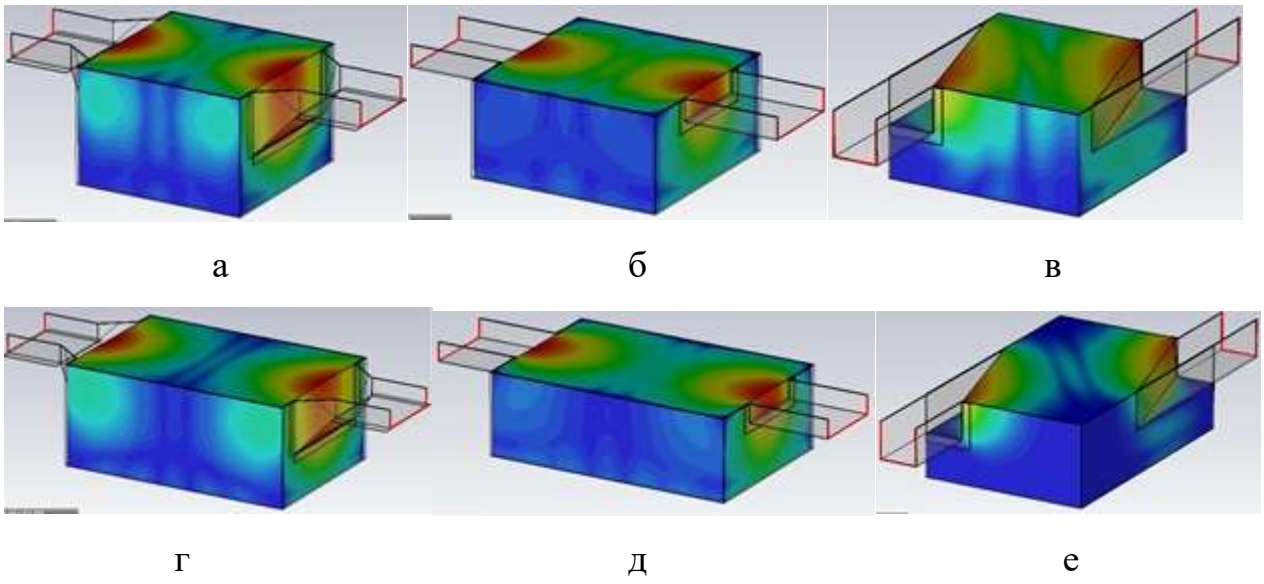
По результатам первичных результатов видно, что воздействие микроволновым полем от одного источника обладает высокой неравномерностью, не позволяющей обеспечить указанный ранее коэффициент равномерности распространения поля в объеме продуктопровода. Следовательно, целесообразно рассмотреть возможность использования нескольких источников микроволновой мощности, работающих на одну и ту же нагрузку и расположенных на одном уровне. Такой вариант реализации был представлен ранее [51, 71, 91, 115, 133, 111]. Указанный вариант реализации для продуктопровода сечением 200×200 мм и двумя источниками микроволновой мощности, направленных встречно представлен на рисунке 3.12.



1 – волновод; 2 – зерновой слой; 3 – продуктопровод; 4 – магнетрон

Рисунок 3.12 – Трехмерная модель зоны СВЧ воздействия на зерно без внешнего корпуса

На исходном этапе проведено моделирование распространения микроволнового поля для продуктопровода сечением 200×200 мм (рисунок 3.13 а, б, в) и 200×200 мм (рисунок 3.13 г, д, е) для указанных форм волноводов.



а б в

г д е

Рисунок 3.13 – Результаты моделирования поглощения электромагнитной мощности пшеницей W=16% в процессе СВЧ нагрева f=2,45 ГГц

Данный коэффициент может быть не только рассчитан на основе представленного моделирования, но и на основе экспериментальных измерений по контрольным точкам. Результаты расчета указанного коэффициента для приведенных размеров продуктопровода и 3-х видов применяемых волноводов (рисунок 3.14) по распространению микроволнового поля в плотном слое пшеницы влажностью 16% представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные значения коэффициента равномерности, $K_{равн}$, распространения электромагнитного поля в пшенице

W	Позиция на рисунке 2.15					
	а	б	в	г	д	е
пшеница						
14	0,4946	0,4481	0,4961	0,3128	0,2742	0,34579
16	0,4332	0,407	0,4553	0,3022	0,265	0,32657
20	0,3827	0,3449	0,4311	0,2702	0,2122	0,26851
24	0,3502	0,3117	0,4159	0,2546	0,1905	0,24403
26	0,3278	0,2861	0,3882	0,2519	0,1757	0,22954

Полученные данные о зависимости коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия от влажности пшеницы, W, % аппроксимированы полиномом третьей степени вида:

$$K_{\text{равн}} = b_0 + b_1 \cdot W + b_2 \cdot W^2 + b_3 \cdot W^3, \quad (3.23)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты пропорциональности.

Для данных, соответствующих результатам моделирования распространения поля в пшенице и приведенных в таблице 3.5, значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.6 – Значения коэффициентов пропорциональности для расчета коэффициента равномерности, $K_{\text{равн}}$, распространения электромагнитного поля в пшенице для продуктопроводов, представленных на рисунке 3.13

Поз.	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2
а	2,2753	-0,2525	0,0114	-0,0002	0,9992
б	1,4207	-0,1282	0,0053	$-8\cdot10^{-5}$	0,9987
в	2,2153	-0,2581	0,0125	-0,0002	1
г	0,1887	0,0336	-0,0023	$4\cdot10^{-5}$	0,9972
д	0,0852	0,0454	-0,003	$-5\cdot10^{-5}$	0,9862
е	0,4174	0,009	-0,0014	$3\cdot10^{-5}$	0,9928

На дальнейших этапах работы требуется разработать методику определения напряженности микроволнового поля и провести проверку значений коэффициента равномерности распределения в лабораторной установке.

1. Результаты моделирования распределения электромагнитного поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия установки, содержащей 2 источника СВЧ мощности для обработки зернового слоя, свидетельствуют о высоком уровне ее неравномерности в объеме продуктопровода.

2. Для оценки равномерности распределения электромагнитного поля в рабочей зоне лабораторной установки может быть применен коэффициент, представляющий собой отношение среднего значения напряженности в зоне СВЧ-

конвективного воздействия к ее среднему значению напряженности волны, проходящей через выход волновода.

3. Значения коэффициента равномерности в рассматриваемых вариантах реализации находятся в диапазоне 0,1757 – 0,4946 для плотного слоя пшеницы.

4. Для обеспечения достаточного уровня равномерности распределения электромагнитной волны в объеме зоны СВЧ-конвективного воздействия коэффициент равномерности должен быть выше 0,37.

5. Зависимость коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля от влажности обрабатываемого материала может быть представлена полиномом третьей степени с коэффициентом детерминации выше 0,98.

6. Для подтверждения уровней полученных значений коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля и его зависимостей от влажности требуется лабораторная проверка.

3.6 Разработка методики определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки

Как уже отмечалось выше, для разработки энергоэффективного оборудования на основе применения электромагнитной волны необходимо знание закономерности распространения поля в зоне СВЧ-конвективной обработки. Распространение электромагнитного поля в материалах, в том числе зерновом слое подчиняется известным физическим законам. Сложность построения картины заключается в том, что зерновой слой представляет собой набор отдельных зерновок, размеры, влажность и ее распределение по объему могут отличаться. При этом наряду с поглощением в зерновом слое происходит множественное пере-отражение электромагнитной волны.

Существующее оборудование для определения параметров электромагнитного поля обычно применяется для оценки безопасности работы персонала и зоны безопасной эксплуатации оборудования. Так измеритель ЭМП до 40 ГГц П3-41 разработан с целью обнаружения и контроля биологически опасных уровней электромагнитных излучений напряженности, плотности потока энергии и экспозиции для

обеспечения выполнения требований общего технического регламента об электромагнитной совместимости и безопасности, действующего в странах Европейского Союза и РФ. При этом предел измерения плотности потока энергии ограничивается диапазоном 0,26-24000 мкВт/см^2 для (2,0-5,64) ГГц Иностранные аналоги также имеют аналогичное назначение и предел измеряемых параметров [302, 315, 319, 330]. Кроме того, зонд для измерения в этих устройствах имеет значительные геометрические размеры, что не позволяет проводить измерения непосредственно в зоне обрабатываемого материала.

Одним из методов, позволяющих проводить измерение плотности ВЧ и СВЧ энергии является метод лазерной интерференционной термометрии (ЛИТ). Он наиболее часто (по сравнению с другими) применяется для дистанционного контроля температуры полупроводниковых и диэлектрических подложек в микроэлектронике [35]. Не смотря на преимущества указанный метод не применим для технологических процессов тепловой обработки зерна с применением СВЧ, т.к. обрабатываемый материал непрозрачен и не имеет жестких геометрических размеров.

Существует оборудование для контроля температуры в зоне микроволнового воздействия также не может быть применена для зон СВЧ-воздействия, полностью заполненных зерновым материалом [35, 54, 58]. Таким образом, для случая зоны СВЧ-конвективного воздействия, необходима разработка методики измерения параметра электромагнитного поля, в роли которого можно принять напряженность, E, В/м.

3.6.1 Общие сведения об измерении параметров ЭМП

При необходимости измерения мощности микроволнового излучения наиболее распространенным является измерение поглощаемой мощности. В зависимости от вида приёмных преобразователей используются различные методы измерения поглощаемой мощности. Известно, что ваттметры делятся на три типа по уровню измеряемой мощности: ваттметры малой мощности (до 10 мВт); ваттметры средней мощности (свыше 10 мВт до 10 Вт; ваттметры большой мощности (свыше 10 Вт до 10 кВт) [238].

Начиная с десятков мегагерц предпочтительным и более точным становится непосредственное обеспечение мощности, а на частотах свыше 1 ГГц – это естественный вид измерений, однозначно характеризующий интенсивность электромагнитных колебаний [35].

Существует множество методов измерения мощностей: тепловые, метод вольтметра, метод с использованием частотно-избирательных ферритовых элементов. Однако, для измерения высоких значений мощности СВЧ сигнала (до 10 кВт) используются, в основном, тепловые ваттметры, в частности, калориметрические методы измерения мощности [35, 238].

Калориметрические методы измерения мощности основаны на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую в сопротивлении нагрузки, являющейся составной частью измерителя [35, 58, 238]. Для существующего в нашей стране ряда СВЧ частот, построение установок термической обработки зернового слоя возможно на частотах 2,45 ГГц, 915 МГц, 433 МГц. Для этих частот количество выделяемого тепла определяется на основе контроля температуры в регистрирующей части (нагрузке или в среде).

Калориметры могут быть статическими (адиабатические) и поточными (неадиабатические). В первых мощность СВЧ рассеивается в термоизолированной нагрузке, а во-вторых, предусмотрено непрерывное протекание калориметрической жидкости. Калориметрические измерители позволяют измерять мощность от единиц милливатт до сотен киловатт. Статические калориметры измеряют малый и средний уровни мощности, а поточные – средние и большие значения мощности.

Применение калориметрического метода для измерения СВЧ мощности является частным случаем его использования в области физических исследований [35]. Этот метод прост и основан на преобразовании энергии электрического поля в теплоту, что может быть зафиксировано и измерено. Калориметрические ваттметры, для измерения СВЧ мощности могут быть разнообразны, при этом их конструкция определяется диапазоном частот, уровнем измеряемой мощности, а также

требуемой точностью. Калориметры могут быть с переменной и постоянной температурой. В калориметрах с постоянной температурой мощность определяется по изменению температуры рабочего тела.

Калориметрические измерители мощности делятся на две группы: калориметры с переменной температурой, в которых мощность определяется по изменению температуры рабочего тела калориметра, и калориметры с постоянной температурой. При этом, калориметрические ваттметры также могут делиться как на статические, так и на проточные. В статических приборах, рабочее тело приемного преобразователя, где энергия СВЧ колебаний превращается в тепловую, неподвижно и в процессе измерения не изменяет формы и физических свойств [35, 238, 330].

Структурная схема проточного калориметра показана на рисунке 3.14 [35, 238].

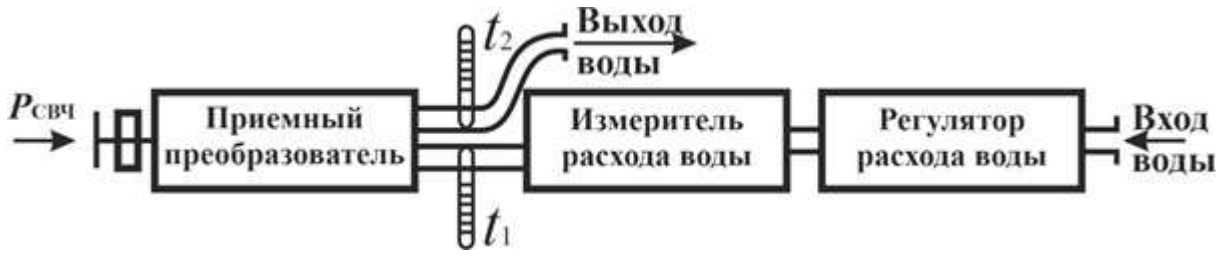


Рисунок 3.14 – Структурная схема проточного калориметра [35, 238]

Если принять, что вся СВЧ мощность полностью расходуется на разогрев воды, а удельная теплоемкость воды и ее расход постоянны, то измеряемую мощность, $P_{СВЧ}$ в установившемся режиме можно определить согласно выражению:

$$P_{СВЧ} = c_в \cdot q_в \cdot \rho_в \cdot \Delta T_в, \qquad (3.24)$$

где $c_в$ – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·°С;

$q_в$ – расход воды, м^3/с;

$\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3;

$\Delta T_в$ – разность температуры воды на входе и выходе приемного преобразователя, °С.

Конструкция воспринимающей части калориметров отличаются в зависимости от диапазона воспринимаемых частот, а также степени согласования с передающим трактом. В таблице 3.7 [238] приведен ряд выпускаемых отечественных ваттметров, способных измерять высокие значения мощности СВЧ сигнала.

Таблица 3.7 – Отечественные СВЧ калориметрические ваттметры [238]

Название	Мощность, Вт	Диапазон частот, ГГц	КСВН
М3-11,А	0,01-10	0,001-11,5	- от 100 МГц до 1 ГГц - не более 1,25; - от 1 ГГц до 5 ГГц - не более 1,4; - от 5 ГГц до 10 ГГц - не более 1,5; -от 10 ГГц до 11,5 ГГц - не более 1,6.
М3-13	6-2000	0,03-1,6	1,3
М3-13/1	6-2000	2,59-37,5	1,3
М3-45	10-6000	0,001-3	1,2 до 1 ГГц, 1,3 выше 1 ГГц
М3-46	10-6000	2,59-5,64	1,4
М3-47	10-1000	5,67-37,5	1,4
М3-48	10-1000	0,001-1,6	1,2 до 1 ГГц, 1,3 выше 1 ГГц
МКЗ-68	10-6000	0,001-1,6	1,2 до 1 ГГц, 1,3 выше 1 ГГц
МКЗ-69	10-6000	0,001-3	1,2 до 1 ГГц, 1,3 выше 1 ГГц
МКЗ-70	10-6000	2,59-5,64	1,4
МКЗ-71	10-1000	5,67-37,5	1,4
М3-96	до 100 Вт	0-12,05	1,25
М3-104	0,1-100	1,6	не более 1,2
М3-105	1-500	1,6	не более 1,2
М3-106	1-1500	1,2	не более 1,2

Основная часть ваттметров приходится на диапазон частот до 1,6 ГГц, для измерения мощности сигнала на частотах выше используются следующие ваттметры: М3-11,А; М3-13/1; М3-46, М3-47, МКЗ-70, МКЗ-71, М3-96. Кроме того,

КСВН большинства измерителей мощности на данном диапазоне частот равен 1,4. Следует отметить также то, что во всех калориметрических ваттметрах между подводящим волноводом и рабочим (калориметрическим телом) используется согласованная нагрузка, что в свою очередь ограничивает такие измерители мощности по диапазону частот и степени согласования, кроме того, часть мощности может рассеиваться в данных согласованных нагрузках, что также виляет на точность измерения высокой мощности.

Калориметрический метод позволяет измерять СВЧ от сотен микроватт до десятков и сотен киловатт. К примеру, в 1965 г., П. Л. Капицей при создании ниготрона в качестве нагрузки использовалась вода, а мощность излучения при этом достигала 300 кВт [238], однако, технических характеристик нагрузки представлено не было.

Основными причинами, влияющими на величину погрешности измерений, являются: неточность определения температуры рабочего тела; неточность определения расхода жидкости; неточность определения затухания СВЧ мощности в тракте; несоответствие импеданса ваттметра и генератора характеристическому сопротивлению линии передачи; изменение температуры окружающей среды и т.д.

Для случая колориметрического датчика необходимо составление баланса тепла в нагрузке, которое имеет следующий вид:

$$P_{\text{СВЧ}} = k_{\text{расс}} \cdot \left(T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}}\right) + c \cdot m_{\text{тела}} \cdot \frac{\Delta T}{\tau}, \qquad (3.25)$$

где $P_{\text{СВЧ}}$ – мощность СВЧ, рассеиваемая в нагрузке, Вт; $T_{\text{нагр}}$ и $T_{\text{окр}}$ – температура нагрузки и окружающей среды соответственно, °С; $m_{\text{тела}}$ –масса калориметрического тела, кг; $k_{\text{расс}}$ – коэффициент теплового рассеяния, Дж/с·°С.

Решение данного уравнения может быть представлено в виде:

$$T_{\text{нагр}} = \frac{P_{\text{СВЧ}}}{r_{con}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] + T_{\text{окр}}, \qquad (3.26)$$

где $r_{con} = \frac{c \cdot m_{\text{тела}}}{k_{\text{расс}}}$ – тепловая постоянная времени, с/°С.

В общем случае калориметрическое тело не обладает идеальной изоляцией и уравнение теплового равновесия (3.1) для него можно выразить в следующем виде [35]:

$$P_{\text{СВЧ}} = c \cdot m_{\text{тела}} \cdot \frac{\Delta T}{\tau} + \frac{(T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}})}{R_{\text{тпл}}}, \quad (3.27)$$

где $R_{\text{тпл}}$ – тепловое сопротивление между рабочим телом и окружающей средой, с·°С/Дж.

Общий вид зависимости температуры рабочего тела от времени приведена на рисунке 3.15 [35]. На ней можно увидеть, как на параметры измерительного прибора повлияют свойства выбранного рабочего тела.

Обычно, в статических приборах рабочее тело приемного преобразователя неподвижно и не изменяет формы и свойств в процессе измерения. В проточных калориметрах содержится жидкость, выступающая в качестве переносчика тепла от рабочего тела во внешнюю среду.

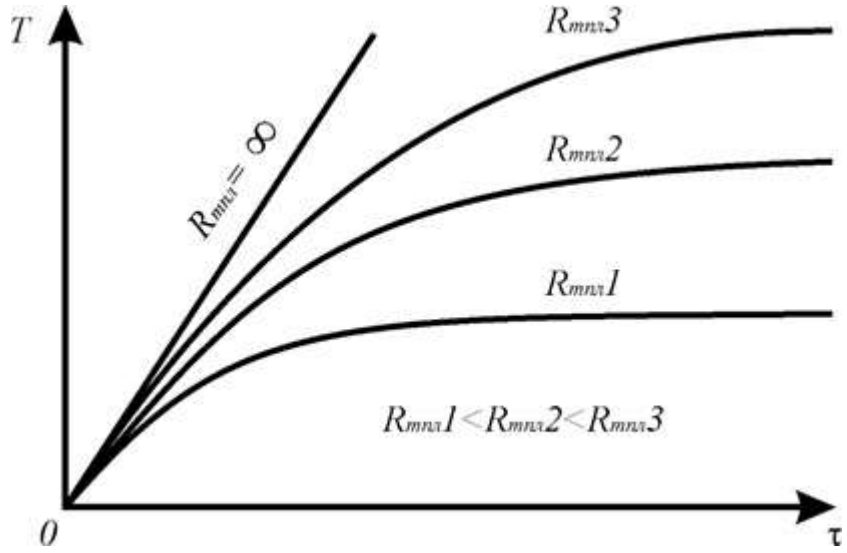


Рисунок 3.15 – Зависимость температуры рабочего тела от времени [35]

Для статического калориметра время измерения много меньше постоянной τ и мощность СВЧ определится как:

$$P_{\text{СВЧ}} = c \cdot m_{\text{нагр}} \cdot \frac{\Delta T}{\tau}, \quad (3.28)$$

Статические калориметры состоят из термоизолированной нагрузки и прибора для измерения температуры. Нетрудно рассчитать поглощаемую мощность СВЧ по измеренной скорости повышения температуры и известной теплоемкости нагрузки. Нагрузка может быть выполнена из твердого или жидкого диэлектрического материала с потерями, а также в виде пластинки или пленки высокого сопротивления. Температура может контролироваться термопарой или другим средством контроля температуры.

3.6.2 Обоснование калориметрического датчика

3.6.2.1 Расчет мощности

Удельная мощность, выделяемая в диэлектрическом материале, $Q_{\text{уд}}$, Вт, определяется по следующей зависимости [24, 125, 200, 244, 330]:

$$Q_{\text{уд}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E^2, \tag{3.29}$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м (Вт·с/В^2·м);

ε'' – коэффициент диэлектрических потерь материала;

f – частота поля, Гц.

При необходимости определения напряженности поля, удельную мощность, выделяемую в диэлектрическом материале необходимо приравнять к удельной мощности, выраженной через теплотехнические параметры. Ее можно выразить из (3.4) как:

$$Q_{\text{уд}} = \frac{c \cdot \rho \cdot \Delta T}{\tau}, \tag{3.30}$$

где c – теплоемкость материала, Дж/кг·°С; ρ – объемная плотность материала, кг/м^3; ΔT – разница между конечной и начальной температурой материала, °С; τ – время измерения, с.

Из (3.5) и (3.6) получаем, напряженность электрического поля, E, В/м, как:

$$E = \sqrt{\frac{Q_{\text{уд}}}{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon'' \cdot f}} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \Delta T}{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot \tau}}. \tag{3.31}$$

Таким образом необходимо выбрать материал и параметры рабочего тела, а также контрольно-измерительное оборудование.

При учете того, что в качестве рабочего тела калориметрических ваттметров наиболее часто применяется вода или водосодержащие растворы, необходимо обосновать возможность ее применения и изучить физические свойства для условий применения в установках СВЧ-конвективной обработки зерна.

3.6.2.2 Рабочее тело

В нашем случае, конструктивные особенности как установки обработки зернового слоя, так и необходимость контроля непосредственно в слое зернового материала не позволяют применить существующее оборудование. Таким образом, для контроля тепловой мощности, выделяемой в конкретной зоне материала, необходимо принять рабочее тело воспринимающей части прибора измерения.

Так как помимо измерения мощности, рассеиваемой в материале, необходимо контролировать напряженность электрического поля, Е, В/м, то материал, принимаемый в качестве рабочего тела, должен быть хорошо изучен как с точки зрения тепловых, так и с точки зрения электрофизических свойств, в том числе на применяемых частотах. В качестве такого материала может быть принята дистиллированная вода. Свойства которой наиболее широко изучались как нашими, так и зарубежными учеными [245, 282, 299, 300, 308, 321, 330].

Вода, находящаяся в жидком состоянии, является одним из наиболее показательным примером полярного диэлектрика. Диэлектрические свойства воды на микроволновых частотах приведены в таблице 3.8 [330]. Как видно из таблицы 3.8, с увеличением частоты, диэлектрическая проницаемость (действительная и мнимая её части) уменьшаются.

Под действием переменного электромагнитного поля диполь воды стремится переориентироваться. Скорость переориентирования диполя конечна и в зависимости от частоты воздействующего поля переориентация может быть неполной. В случае, когда диполь отстает от поля, взаимодействие между диполем и полем приводят к потере энергии на нагревание [330]. Легкость переориентирования диполей зависит от вязкости и подвижности электронных облаков. В воде это движение происходит на частотах в ГГц (микроволны), тогда как в случаях «связанной» воды это

происходит на частотах в МГц (короткие радиоволны), а в состоянии льда на частотах в кГц (длинные радиоволны) [321, 330, 365].

На рисунке 3.16 приведена зависимость диэлектрических свойств воды от ее температуры и частоты воздействующего электромагнитного поля [365].

Таблица 3.8 – Диэлектрическая постоянная, ε', и фактор диэлектрических потерь, ε", воды [330]

Частота, ГГц	20 °C		50 °C	
	ε'	ε"	ε'	ε"
0,6	80,3	2,5	69,9	1,25
1,7	79,2	7,9	69,7	3,6
3,0	77,4	13,0	68,4	5,8
4,6	74,0	18,8	68,5	9,4
7,7	67,4	28,2	67,2	14,5
9,1	63,0	31,5	65,5	16,5
12,5	53,6	35,5	61,5	21,4
17,4	42,0	37,1	56,3	27,2
26,8	26,5	33,9	44,2	32,0
36,4	17,6	28,8	34,3	32,6

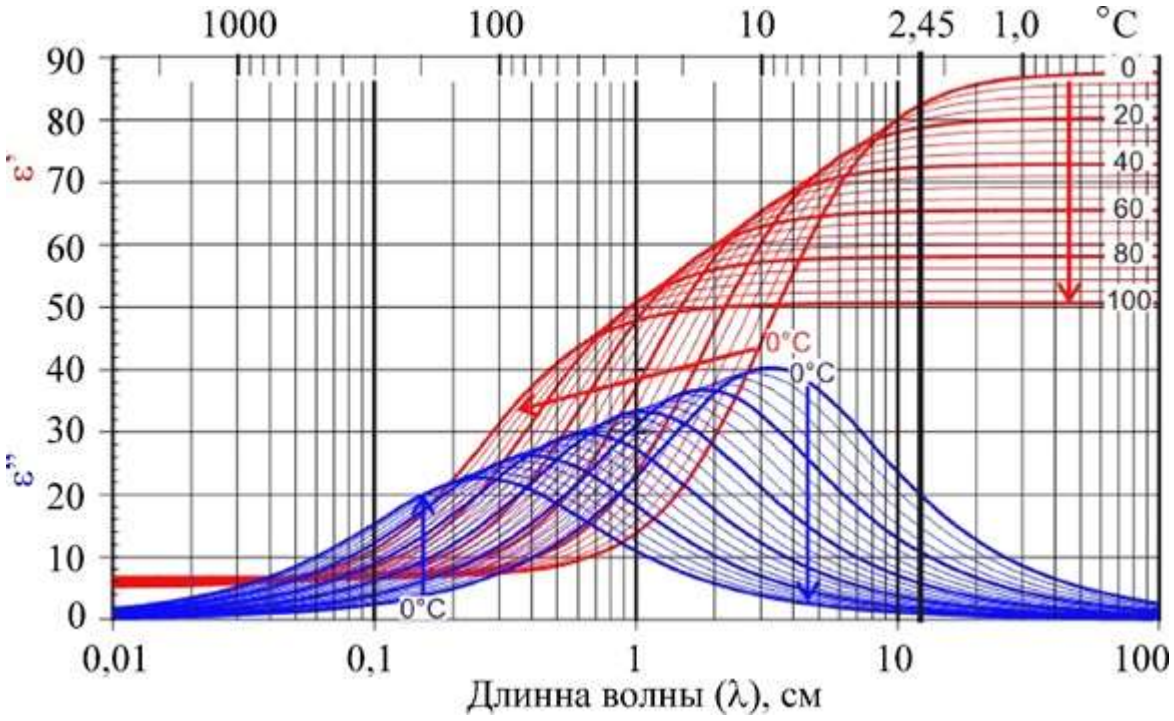


Рисунок 3.16 – Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери воды при температурах от 0 °C до 100 °C [365]

На рисунке 3.16 стрелками, показаны повышения температуры. Данные являются ориентировочными только на основе [246, 330, 365]. По мере увеличения температуры сила и протяженность водородной связи снижаются. Частота максимальных диэлектрических потерь лежит выше 2,45 ГГц (длина волны 12,24 см). На рисунке 3.17 приведена температурная зависимость диэлектрических свойств воды от температуры при частотах воздействующего поля 1 ГГц и 2,45 ГГц [365].

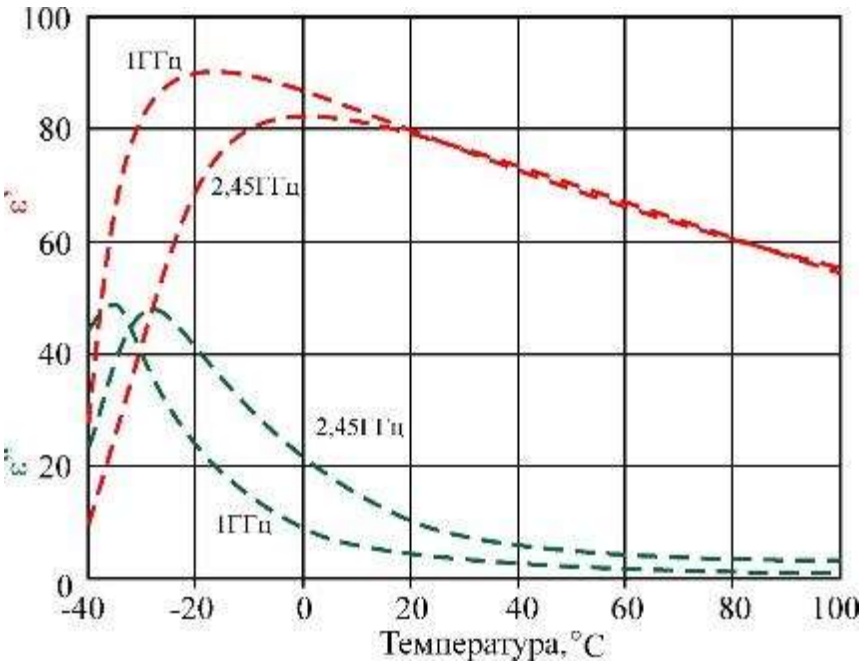


Рисунок 3.17 – Зависимость диэлектрической постоянной и фактора диэлектрических потерь от температуры [365]

Стоит отметить, что сдвиги диэлектрических свойств с температурой приводит к возникновению максимумов температурной зависимости при постоянной частоте.

Существуют достаточно детальные сведения по теплофизическим свойствам воды [244-247, 281, 321, 330]. Ключевым показателем для рассматриваемого случая будет зависимость теплоемкости воды от изменения температуры. Измерения будут происходить при температурах от 5 до 90 °С. Данные из литературных источ-

ников [245, 330] для указанного диапазона температур представлены в виде графика (рисунок 3.18). При этом искомая зависимость может быть аппроксимирована в виде полинома пятой степени, приведенного на графике.

Плотность аналогично теплоемкости можно аппроксимировать в заданном диапазоне температур (рисунок 3.19) [245, 330].

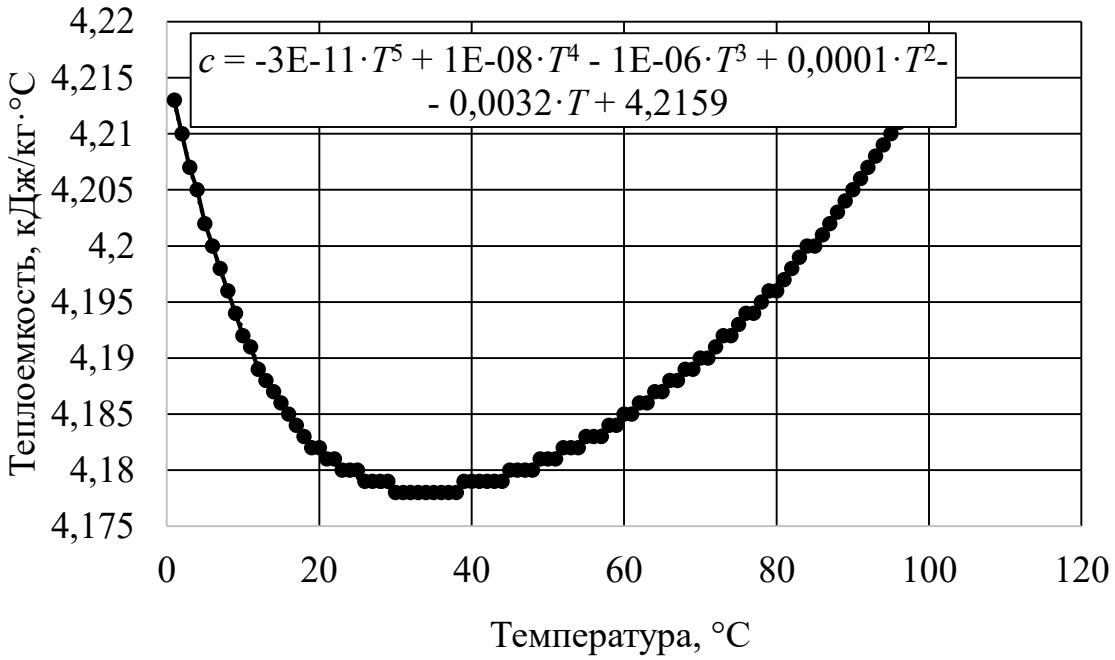


Рисунок 3.18 – Зависимость теплоемкости воды от температуры

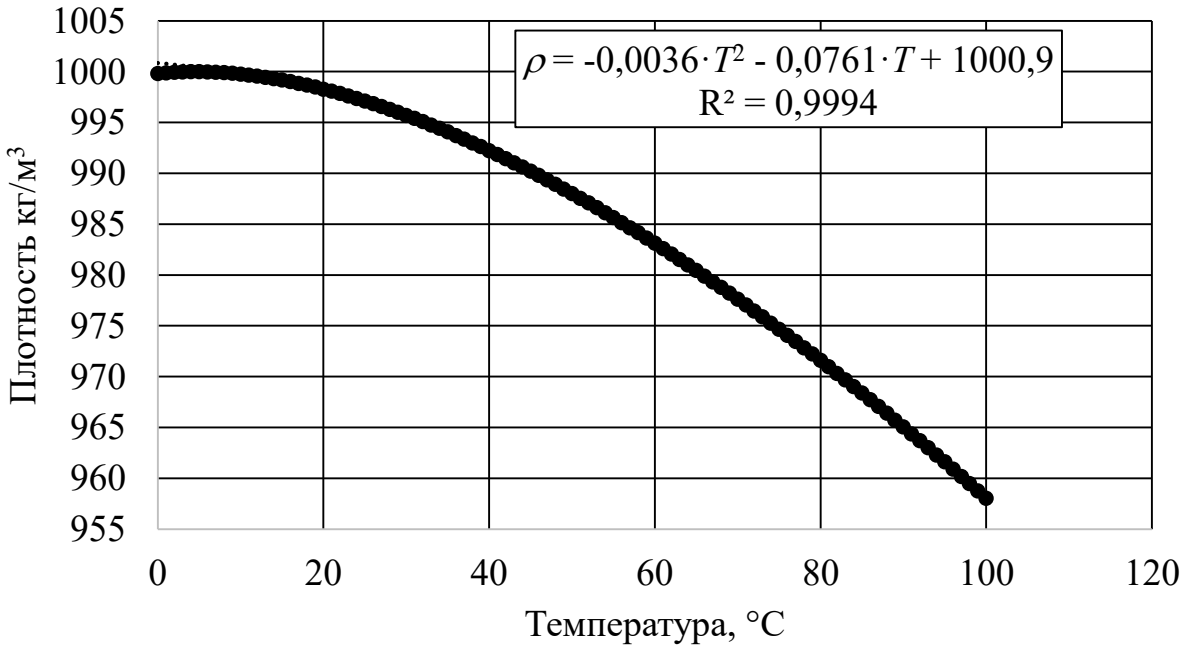


Рисунок 3.19 – Зависимость плотности воды от температуры

В качестве формы воспринимающего органа примем шар диаметром, равным ¼ длины волны воздействующего поля. В случае 2,45 ГГц λ=12,24 см, при этом диаметр воспринимающей части составил 3,06 см.

3.6.2.3 Контрольно-измерительные приборы

На рисунке 3.20 приведена структурная схема предлагаемого измерителя. Осуществление работы поясняется рисунком 1, на котором приведена структурная схема. Устройство содержит: детектор 1, включающий шарообразную емкость 2, заполненную материалом 4, для которого известны зависимости теплоемкости и диэлектрических свойств от температуры на исследуемой частоте, датчик температуры 3, устройство опроса сигнала термодатчика 6 и устройство обработки и вывода данных результатов измерений на экран и их запись в файл 7, при этом 6 и 7 могут быть выполнены в едином корпусе 5. Измерение изменения температуры производится в течение времени $\tau_{изм}$, при этом воздействие СВЧ-поля производится в течение времени $\tau_{СВЧ}$, которое реализуется за счет включения установки через устройство обработки и вывода информации 7 [223].

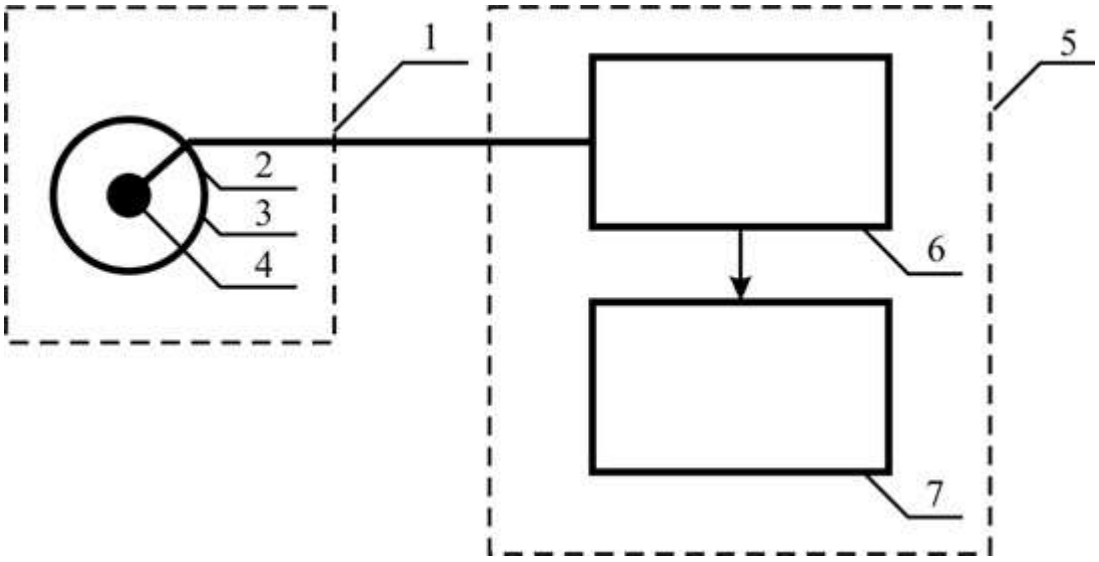


Рисунок 3.20 – Структурная схема

В качестве датчиков температуры были приняты термопары К-типа (рисунок 3.21а). Диапазон измерений от -30 до +400 °С, погрешность измерений ±1°С, мате-

риал сплав хромель-алюмель. Термопара хромель-алюмель предназначена для измерения температуры в окислительных и инертных средах. Содержание кислорода (O_2) в окислительной среде должно быть не менее 2-3% или его присутствие должно быть практически исключено. В противном случае в хромеле резко увеличивается селективное окисление хрома, его концентрация уменьшается, что приводит к существенному изменению уменьшению термо-ЭДС данного сплава [178].

Для опроса термопар применялся модуль аналогового ввода производства OWEN (РФ) МВА8 (рисунок 3.21б). Основные функции модуля ввода [178]:

- восемь универсальных входов для подключения широкого спектра датчиков температуры, давления, влажности, расхода, уровня и других физических величин;
- цифровая фильтрация и коррекция входных сигналов, масштабирование показаний датчиков с унифицированным выходным сигналом (активных датчиков);
- передача измеренных значений по интерфейсу RS-485;
- поддержка распространенных протоколов Modbus (ASCII, RTU), DCON, ОВЕН;
- помехоустойчивость благодаря импульсному источнику питания 90...264 В частотой 47...63 Гц.

Для преобразования сигнала RS-485 использовался модуль АС4 (рисунок 3.21в).

Основные функции преобразователя интерфейсов ОВЕН АС4:

- Взаимное преобразование сигналов интерфейсов RS-485 и USB;
- Автоматическое определение направления передачи данных;
- Гальваническая изоляция интерфейсов;
- Создание виртуального ком-порта при подключении прибора к ПК, что позволяет без дополнительной адаптации использовать информационные системы (SCADA, конфигураторы), работающие с аппаратным COM-портом;

– Питание от шины usb;
– Встроенные согласующие резисторы.



а б в

Рисунок 3.21 – Контрольно-измерительное оборудование

Настройка адреса устройства опроса, скорость передачи, протокола обмена данными, выбранного типа датчиков осуществляется через конфигуратор (рисунок 3.22).

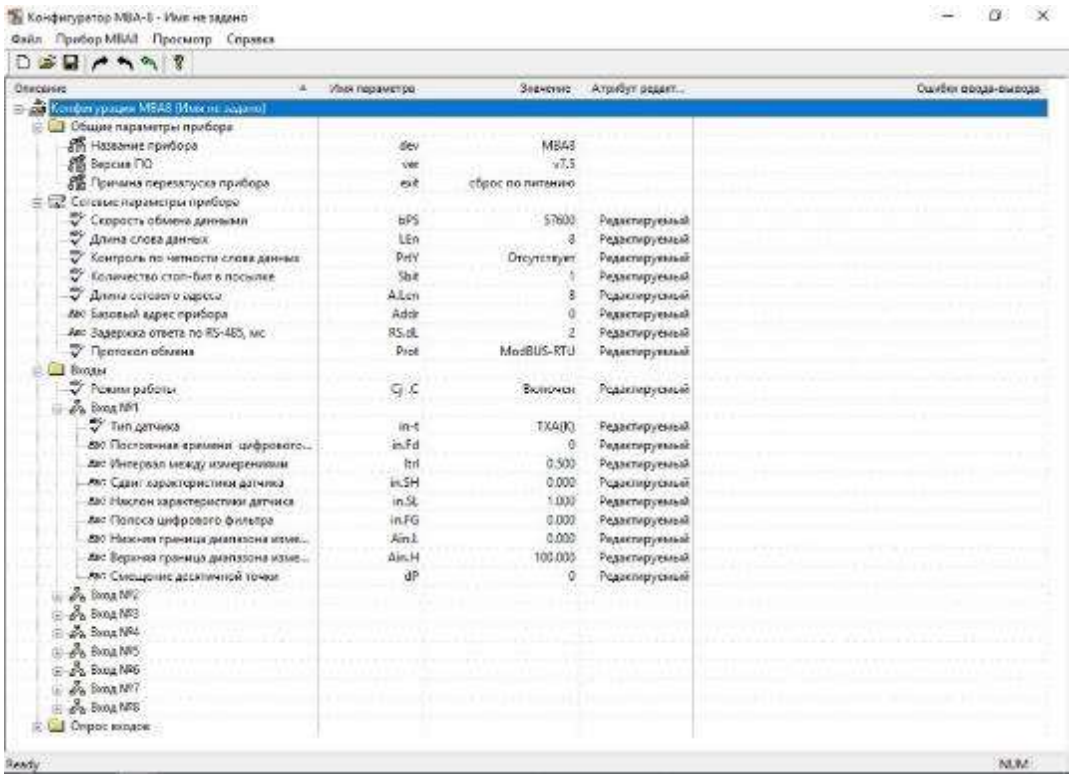


Рисунок 3.22 – Интерфейс конфигуратора MBA8

Далее необходимо прописать алгоритм измерения и систему вывода информации. Реализация может быть осуществлена, например, в ПЛК с выводом информации на интерфейсный модуль или в SCADA-системе с выводом информации на монитор. В данной работе принято решение реализовать SCADA систему для расчета, отображения и записи показаний измерений.

3.6.2.4 Разработка SCADA системы

Для разработки SCADA датчика был выбран программный пакет для проектирования систем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) – MasterSCADA. Его основными свойствами являются модульность, масштабируемость и объектный подход к разработке. Система предназначена для сбора, архивирования, отображения данных, а также для управления различными технологическими процессами [178].

Из представленной разработчиком линейки продуктов была использована версия MasterSCADA 3.X RT32. Данная версия является бесплатной локальной версией и включает в себя интегрированную среду разработки, отладки и исполнения на 32 точки без ограничений по времени работы. В нашем случае предполагался опрос до 8 каналов модуля ввода, таким образом выбранная версия полностью подходит для реализации требуемой системы измерений.

Для взаимодействия оборудования и среды разработки необходимо применение OPC-сервера. В качестве которого был выбран Modbus Universal MasterOPC Server (MSRT32). Modbus Universal MasterOPC Server сочетает в себе возможности OPC-сервера наиболее распространенного промышленного протокола передачи Modbus RTU/ASCII/TCP, а также инструментария для разработки новых OPC-серверов, как для поддержки специализированных расширений Modbus, так и для поддержки любых иных протоколов. MasterOPC реализует два набора OPC-интерфейсов – DA (Data Access – текущие данные) и HDA (Historical Data Access – архивные данные). Для организации хранения архивов опрашиваемых переменных MasterOPC использует встроенный SQL-сервер [178]. Выбранная версия Modbus Universal MasterOPC Server 32 является бесплатной, с ограничением в 32 тега (входных/выходных сигналов).

В OPC-сервере прописывается интерфейс, через который происходит передача данных, а также все опрашиваемые каналы. На рисунке 3.23 приведен интерфейс выбраного OPC-сервера, в котором прописано выбранное устройство опроса MBA8.

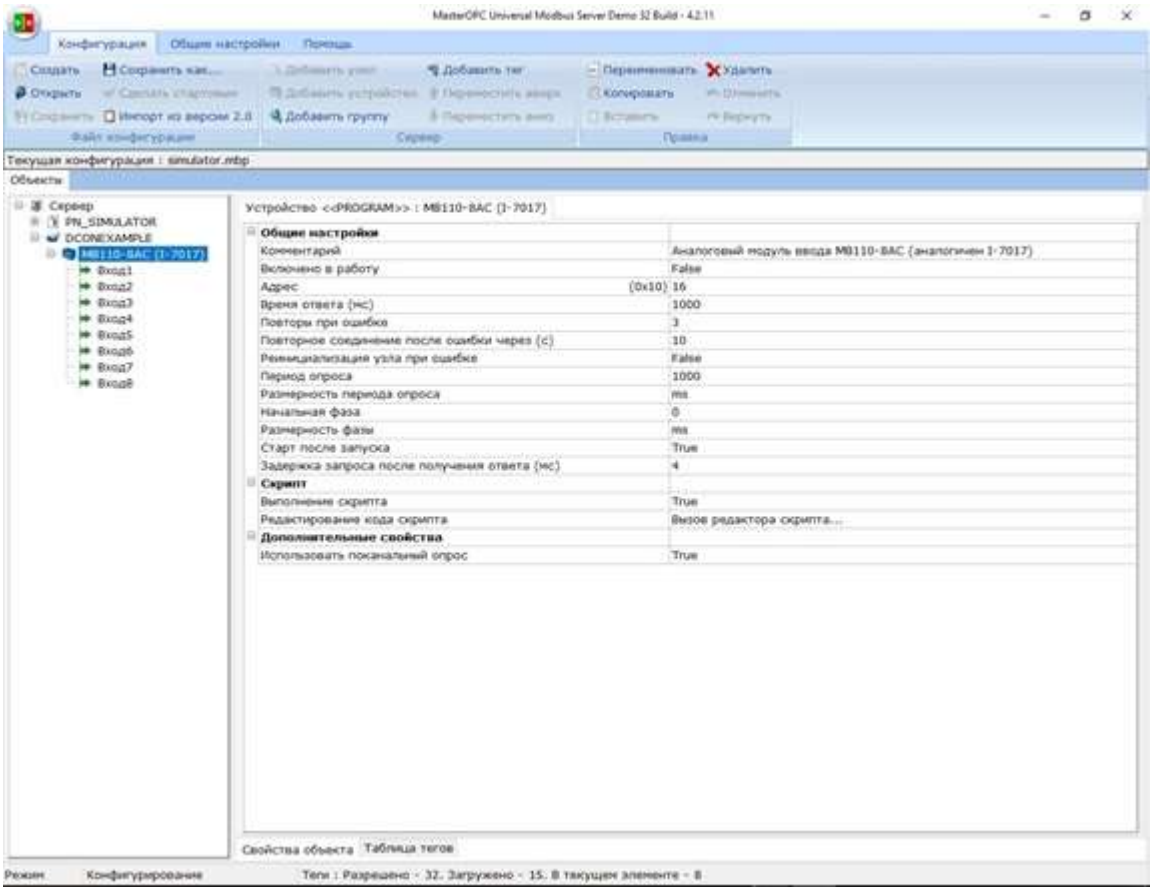


Рисунок 3.23 – Интерфейс Modbus Universal MasterOPC Server 32

Далее в выбранной среде били прописаны входные каналы и указанные зависимости расчета измеряемых параметров (рисунок 3.24). Также был разработан интерфейс пользователя, отображающий динамику изменения температуры рабочего тела, наружного воздуха и воздуха в межзерновом пространстве.

Вид разработанного устройства для определения параметров электромагнитного поля в исследуемом материале представлен на рисунке 3.25. Реализованная SCADA-система установлена на ПК, на экран которого выводятся текущие значения температур, напряженностей и удельных мощностей в контролируемых точ-

ках. Также отображается временной график температур с регулируемым масштабом. Запись протокола ведется в файл формата csv, импорт данных из которого поддерживается MS Excel, Matlab и другими прикладными программными средствами. Это позволяет, при необходимости, проводить дальнейшую детальную обработку результатов измерений.

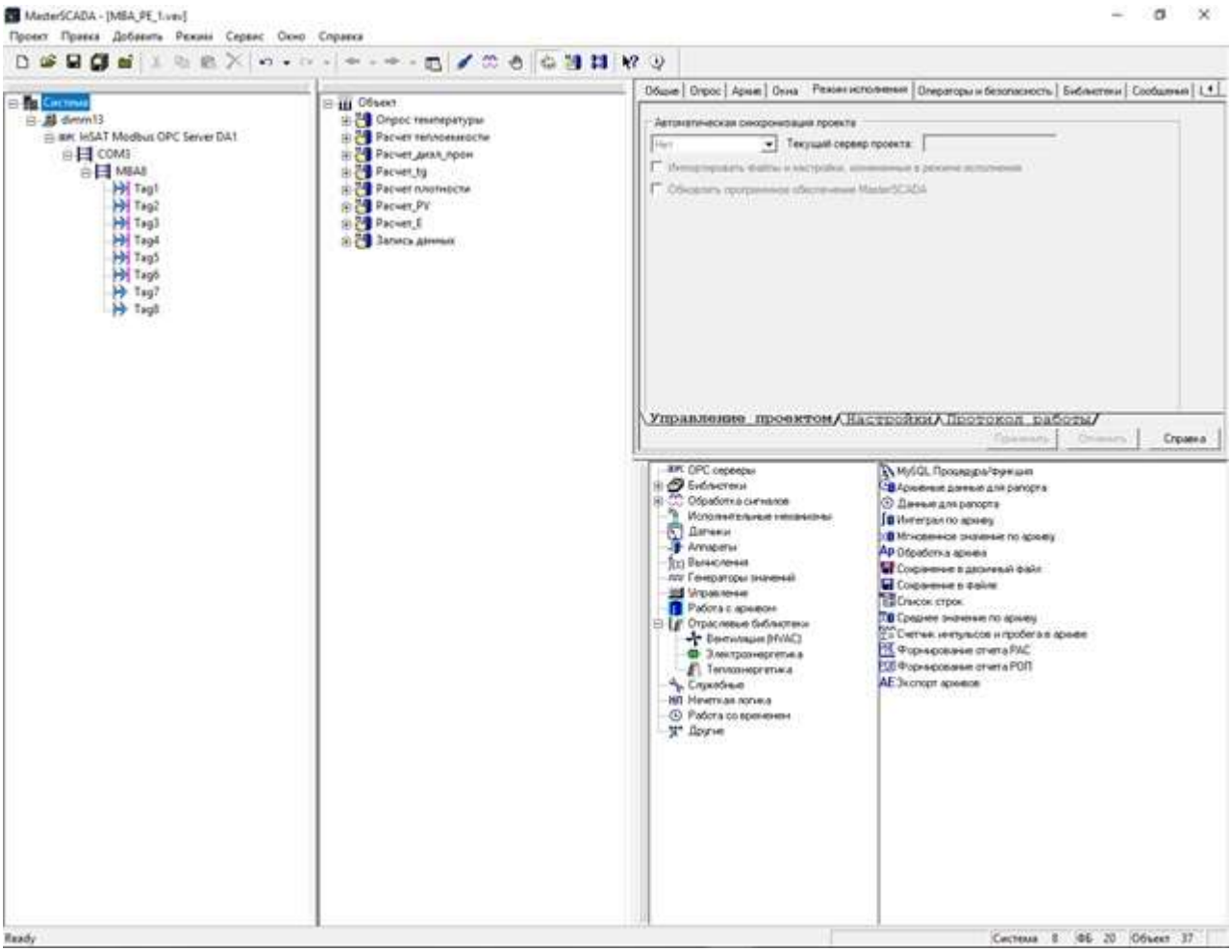
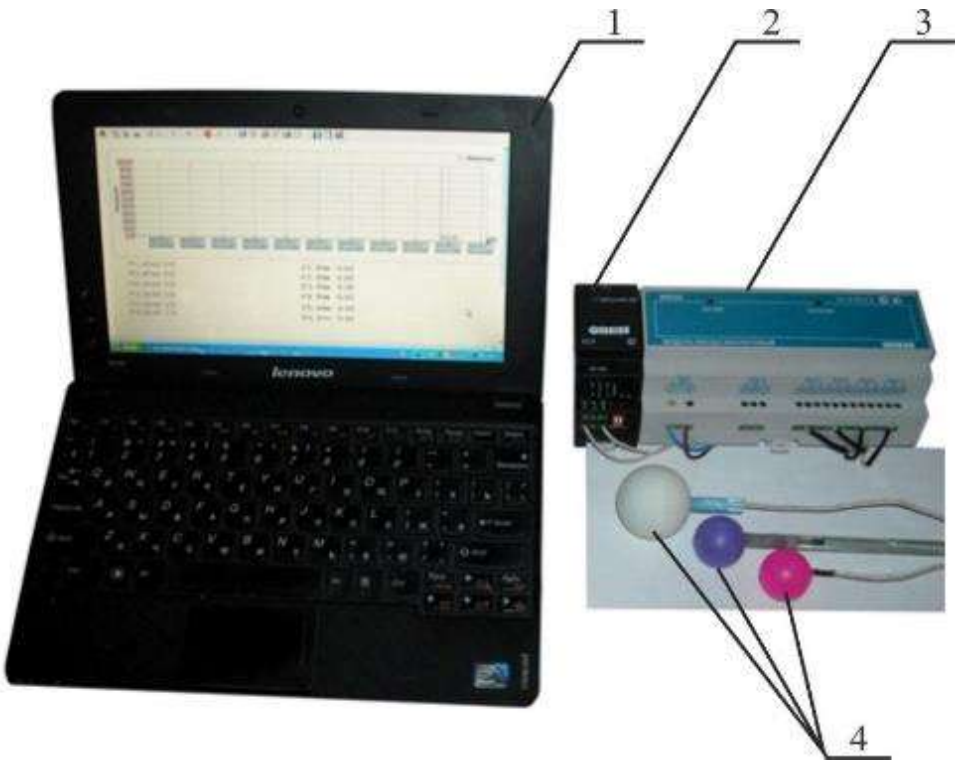


Рисунок 3.24 – Интерфейс MasterSCADA RT32

На рисунке 3.26 приведен пример графика, построенного на основе экспериментальных данных измерения температуры материала 4, заполняющего емкость 2 детектора 1, показывающие динамику нагрева и дальнейшее установление температуры, характеризующее поглощенную мощность в точке установки детектора. Измерение изменения температуры производится в течение времени $\tau_{изм}$, при этом воздействие СВЧ-поля производится в течение времени $\tau_{СВЧ}$, которое реализуется

за счет включения установки через устройство обработки и вывода информации 7. Для снижения этой погрешности, а также для выравнивания температуры в воспринимающей части датчика, измерение ведется в течении времени, равным четырехкратному времени нагрева. В приведенном случае измерения проводились в сплошном слое пшеницы влажностью 15% на расстоянии 6 см от выхода волновода.



1 – ПК с запущенной SCADA-системой; 2 - преобразователь интерфейсов; 3 - модуль ввода сигналов (до 8 датчиков); 4 – датчики

Рисунок 3.25 – Устройство для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ выделяемой в зерновом слое

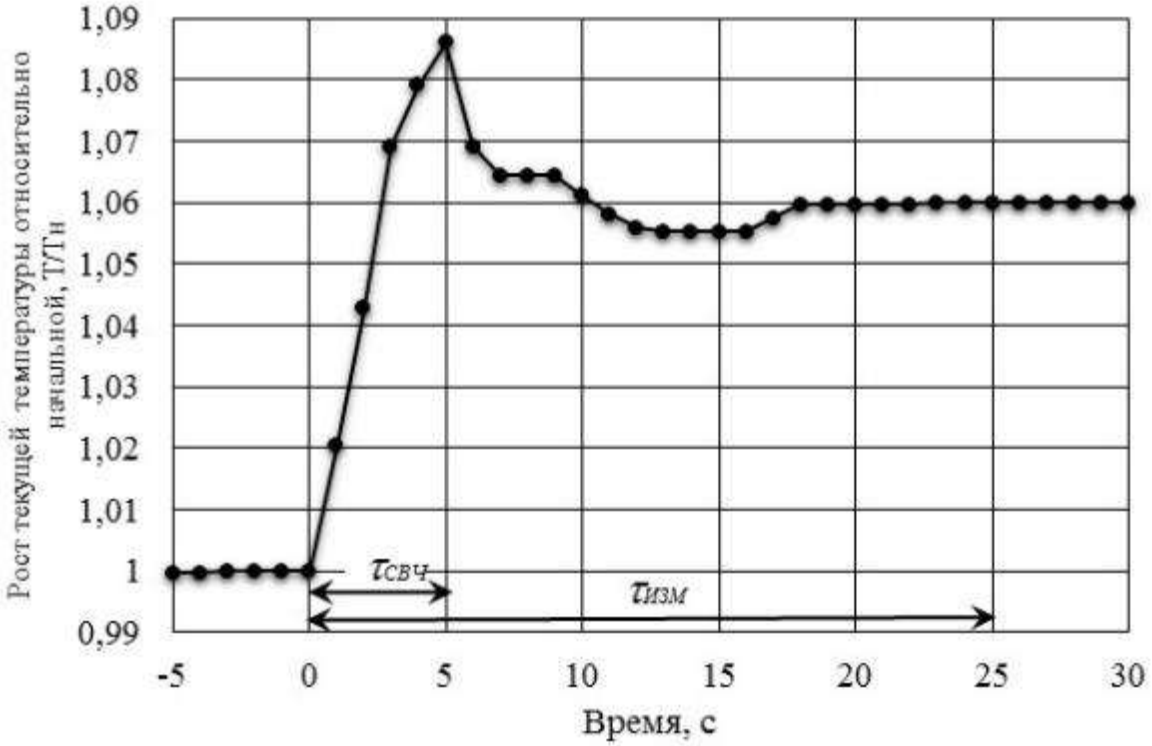
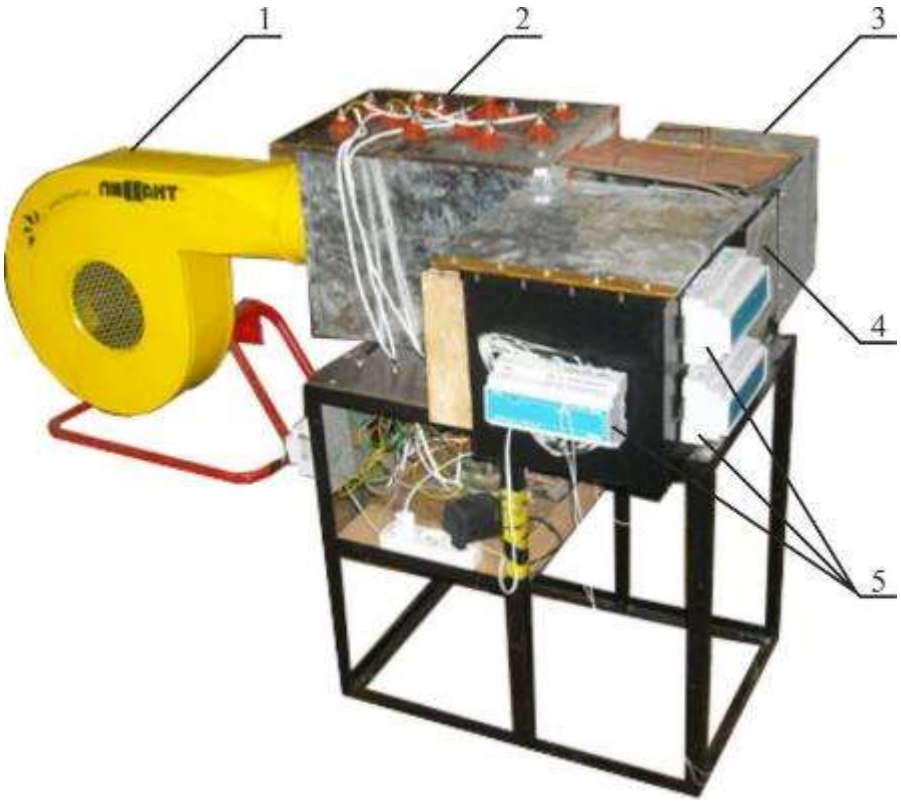


Рисунок 3.26 – График процесса измерения параметров ЭМП

Для большей наглядности, в данном случае приведен график роста температуры относительно начальной. Далее необходимо провести экспериментальную проверку работы устройства и сформулировать порядок проведения измерений.

3.6.3 Экспериментальная установка

Проверки устройства проводились на лабораторной установке для исследования СВЧ-конвективного воздействия на плотный неподвижный слой. Внешний вид лабораторной установки приведен на рисунке 3.27. Параметры установки следующие: размеры зоны СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерном 200×200×300 мм, мощность магнетрона P_c=900 Вт. Условия проведения экспериментов: температура наружного воздуха T=18°С, обрабатываемая культура – пшеница, влажность зернового материала W = 12÷18% с шагом 3%; воздействие СВЧ полем проводилось в непрерывном режиме в процессе измерения.



1 – нагнетающий вентилятор; 2 – блок ТЭНов; 3 – магнетрон; 4 – зона СВЧ-конвективного воздействия; 5 – модули сбора сигналов

Рисунок 3.27 – Лабораторная установка

На рисунке 3.28 представлена схема расположения датчиков при проведении эксперимента. Прямоугольная область 1 представляет собой выход волновода в слой обрабатываемого материала. Датчики 2 устанавливались на центральной оси выхода волновода, Расстояния L от центра выхода волновода до центра воспринимающей части датчика составляла 30, 60, 90 мм.

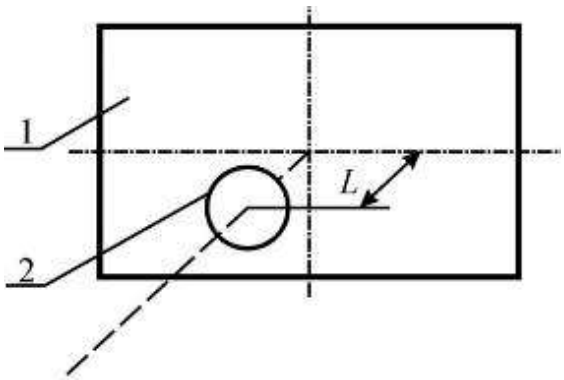


Рисунок 3.28 – Схема расположения датчиков

На рисунках 3.29, 3.30 приведены результаты измерений удельной мощности и напряженности СВЧ поля частотой 2,45 ГГц в плотном слое пшеницы в зависимости от расстояния до источника. На графиках без штриха указаны начальные влажности зернового слоя. Индексом «'» обозначены зависимости зерна начальной влажностью 15% далее высушенного СВЧ-конвективным способом до указанной влажности, индексом «"» обозначены зависимости для зерна начальной влажностью 18% далее высушенного СВЧ-конвективным способом до указанной влажности.

Как видно из графиков, общий вид и закономерность изменения параметров поля остаются неизменными, при этом прослеживается зависимость не только от текущей влажности материала, но и от предварительной обработки. В случае сушки зерна с исходной влажности до текущей СВЧ-конвективным способом измеренные параметры поля позволяют судить о изменении диэлектрических свойств материала, что говорит о разнице диэлектрических свойств материала начальной влажности и высушенной до требуемой влажности за счет изменения формы связи влаги. Данные, полученные для ячменя, имеют аналогичный вид [144, 149, 223].

На рисунке 3.31 приведены графики, отображающие соответствие результатов экспериментальных и теоретических данных по зависимости напряженности электромагнитного поля от расстояния до источника. Кривая 1 характеризует экспоненциальный закон затухания электромагнитной волны в материале, получена из зависимости [330, 335, 358]:

$$E = E_0 \cdot e^{-k_z x}, \tag{3.32}$$

где E_0 – амплитуда поля на выходе волновода, В/м^2; k_z – коэффициент затухания, обусловленный диэлектрическими свойствами, м$^{-1}$; x – координата, м.

Кривая 1 отражает данные, полученные при измерении указанным устройством. Кривые приведены в относительных единицах для того, чтобы исключить влияние КПД источника и отобразить соответствие характера полученных экспериментальных и теоретических зависимостей [50, 53, 104, 147].

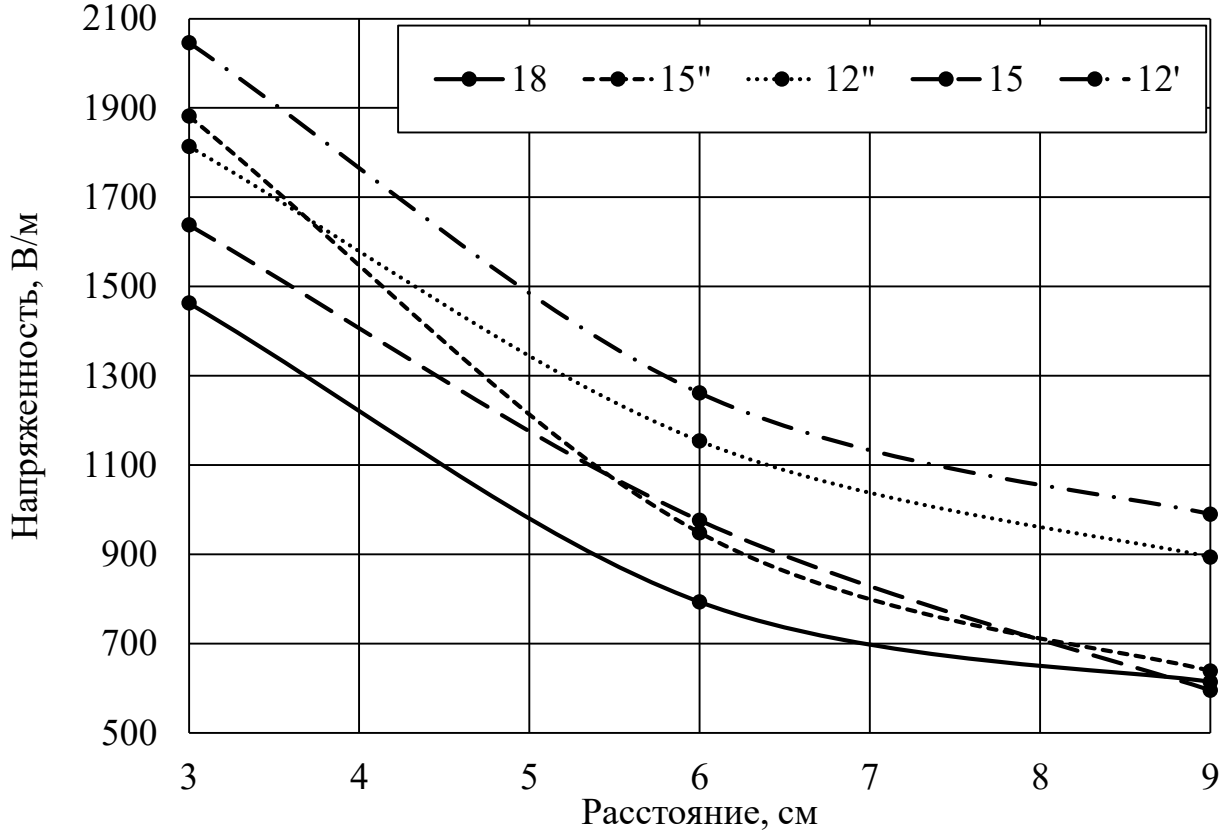


Рисунок 3.29 – Результаты измерения напряженности ЭМП

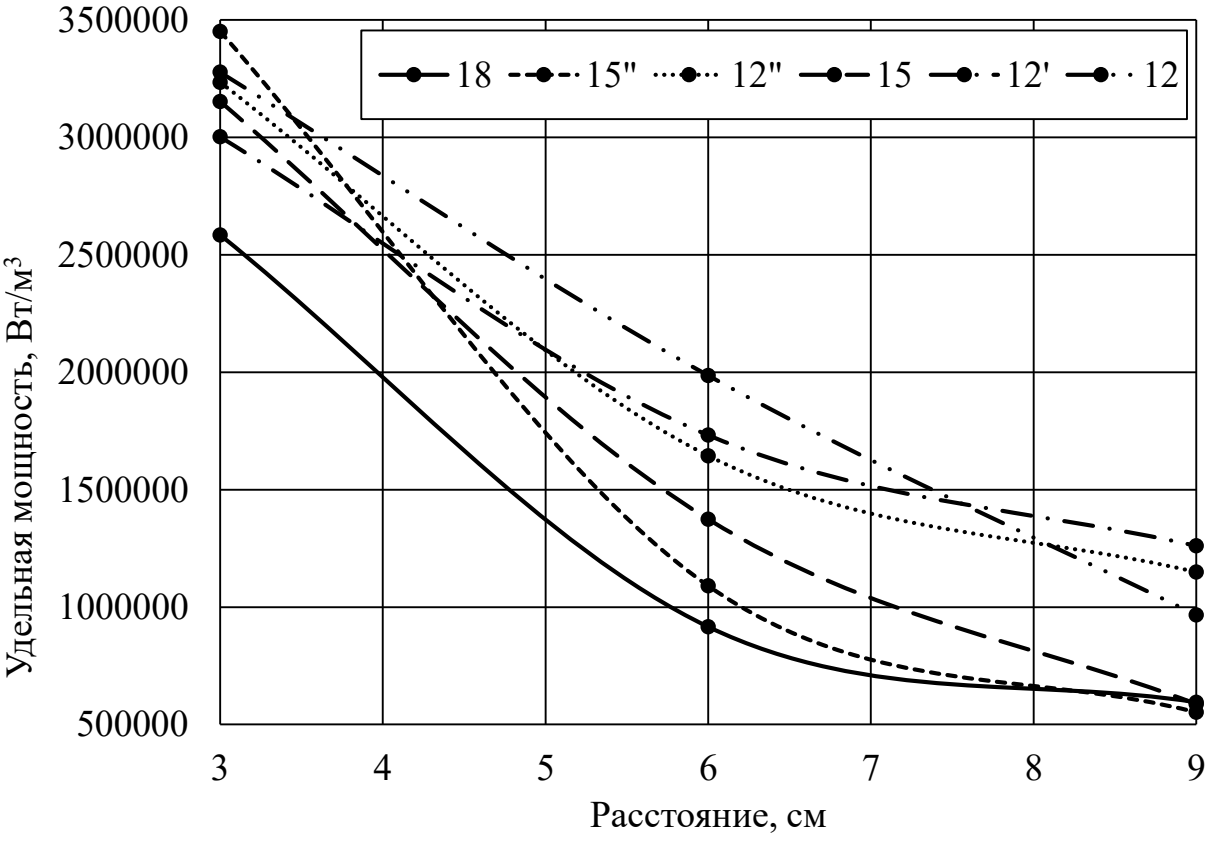
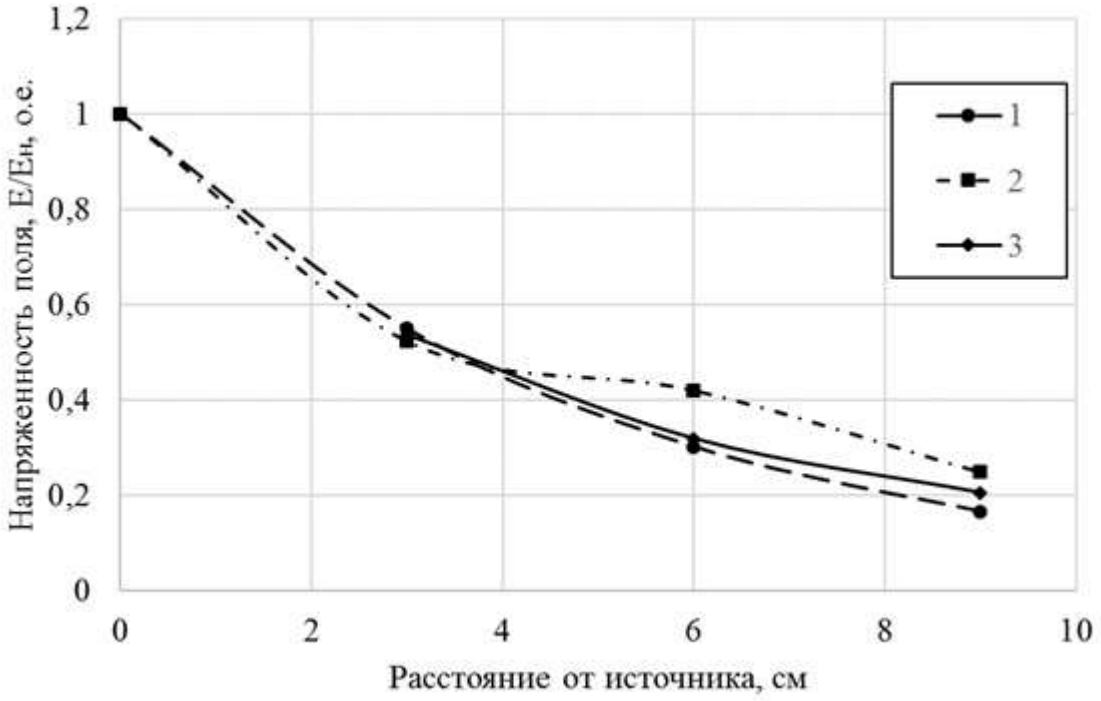


Рисунок 3.30 – Результаты измерения удельной мощности



1 – экспериментальные данные; 2 – экспоненциальный закон распределения (расчетная); 3 – результаты моделирования в ПО ЭМ моделирования

Рисунок 3.31 – Распространение напряженности поля при удалении от источника

Отклонения экспериментальных данных и данных, описываемых экспоненциальной зависимостью, для ячменя влажностью 17,6%, на расстоянии равном глубине проникновения поля в зерновой слой, находятся в пределах 10%.

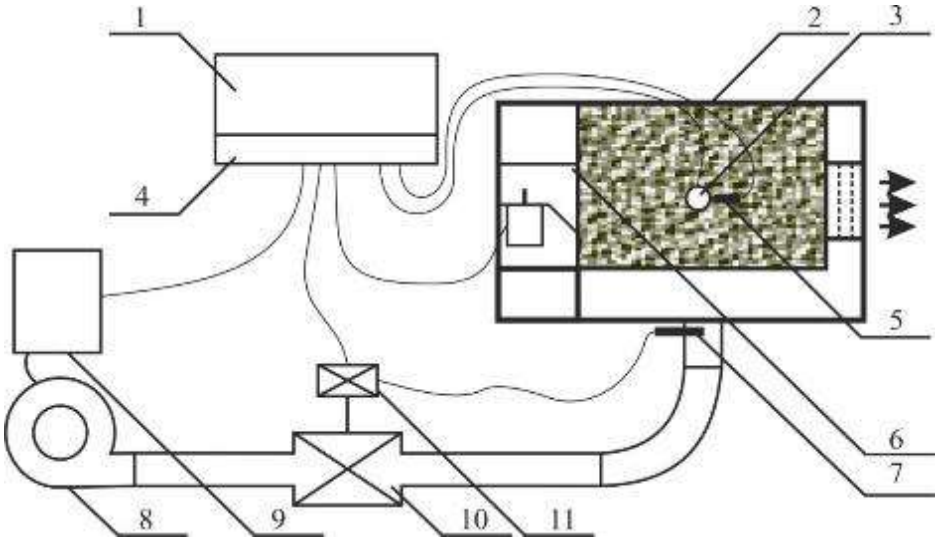
3.6.4 Методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки

Для измерений в диапазоне частот 0,4-2,5 ГГц используют образцы с относительной диэлектрической проницаемостью от 2 до 100, заполняющие зону СВЧ-конвективного воздействия. Особенностью метода является заполнение зоны измерения зерном с требуемой плотностью слоя.

3.6.4.1 Сущность методики:

3.6.4.1.1 Для измерений используют материал, заполняющий зону СВЧ-конвективного воздействия, с относительной диэлектрической проницаемостью от

2 до 100. Схематическое изображение лабораторной установки для проведения измерений приведено на рисунке 3.32 [49, 92, 99].



1 – ПК, 2 –зона СВЧ-конвективной обработки, 3 – калориметрический датчик, 4 – плата ввода/вывода, 5 – датчик температуры зернового слоя, 6 – источник СВЧ (магнетрон, блок питания, волновод, 7 – датчик температуры воздуха, 8 – вентилятор, 9 – ПЧВ, 10 – нагреватель, 11 - терморегулятор

Рисунок 3.32 – Схема лабораторной установки для определения напряженности микроволнового поля

3.6.4.1.2 Определение напряженности микроволнового поля заключается в измерении температуры нагрева жидкости, заполняющей объем калориметрического датчика, для которого известны зависимости теплоемкости и диэлектрических потерь от температуры и частоты поля, в зоне СВЧ-конвективной обработки.

3.6.4.2 Подготовка к выполнению измерений

При подготовке к выполнению измерений проводят следующие работы:

- собирают измерительную установку по схеме, приведенной на рисунке 3.32 при этом для исследования взвешенного или псевдоожиженного слоев, используется напор воздуха, регулируемый ПЧВ;
- все приборы, входящие в состав измерительной установки, подготавливают к работе в соответствии с их технической документацией, в том числе запускают SCADA-систему контроля измерений;

– образцы подготавливают к измерениям в соответствии с соответствующим технологическим процессом, для которого будут в дальнейшем использоваться полученные характеристики. При этом необходимо соблюсти отсутствие (наличие) примесей, равномерную влажность по объему, запыленность, и т.д.

3.6.4.3 Выполнение измерений

При выполнении измерений напряженности микроволнового поля предлагаемым методом проводят следующие операции:

– калориметрический датчик устройства для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ, выделяемой в зерновом слое, размещается в точке, для которой требуется измерение параметров ЭМП;

– производится изменения температуры в течение времени $\tau_{изм}$, при этом воздействие СВЧ-поля производится в течение времени $\tau_{СВЧ}$, которое согласовано с временем прописанном в SCADA измерителя (реализуется за счет включения установки через устройство обработки и вывода информации);

– контроль роста температуры осуществляется термопарами, размещенными в объеме калориметрического датчика.

3.6.4.4 Обработка результатов измерений

3.6.4.4.1 Для плотного слоя произвести определение удельной поглощенной мощности, выделяемой в объеме датчика (выполняется автоматически) по зависимости (3.28).

3.6.4.4.2 Для псевдоожиженного (или взвешенного) слоя произвести определение удельной поглощенной мощности, выделяемой в объеме датчика (выполняется автоматически) по зависимости:

$$Q_{\text{уд}} = \frac{c \cdot \rho \cdot \Delta T}{\tau} + k_{\text{расс}} \cdot \left(T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}}\right), \qquad (3.33)$$

где $T_{\text{нагр}}$ и $T_{\text{окр}}$ – температура нагрузки и окружающей среды соответственно, °С;

$k_{\text{расс}}$ – коэффициент теплового рассеяния, Дж/с·°С.

3.6.4.4.3 По зависимости (3.31) определить напряженность СВЧ-поля в контролируемой точке (выполняется автоматически).

3.6.4.4.4 При определении коэффициента диэлектрических потерь образцов исследуемого материала проводят не менее четырех измерений и за результат принимают среднеарифметическое значение.

3.6.4.5 Требования к неопределенности измерений

Если необходима оценка повторяемости (сходимости) и воспроизводимости измерений, ее осуществляют в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2.

Результаты исследования напряженности микроволнового поля в зерновой массе могут быть использованы при исследовании диэлектрических свойств обрабатываемого зерна, а также построении системы управления при проектировании установок СВЧ-конвективной обработки.

3.6.5 Экспериментальные исследования коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля

В связи с тем, что для экспериментальной проверки коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в слое пшеницы необходимо проведение существенного количества экспериментов, необходима избирательная проверка в лабораторной установке.

Проверка проводилась в установке, размер зоны СВЧ-конвективного воздействия которой соответствовал сечению продуктопровода 200×200 ×200 мм (рисунок 2.15а). Для измерения применялся указанный выше набор измерительного оборудования. При этом по сечению продуктопровода точки контроля принимались с шагом 50 мм по всей площади (X, Y – 5 уровней варьирования с шагом 50 мм), по высоте принималось 3 уровня (Z – 3 уровня варьирования с шагом 50 мм), соответствующие центральной оси зоны ±50 мм и трех уровней влажности пшеницы (W=16÷24% с шагом 4%). Измерения проводились по координатам, соответствующим данным, представленным в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Координаты точек контроля напряженности микроволнового поля

№	Координаты			№	Координаты			№	Координаты		
	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
1.	-100	-100	-50	2.	-100	-100	-50	3.	-100	-100	-50
4.	-50	-100	-50	5.	-50	-100	-50	6.	-50	-100	-50
7.	0	-100	-50	8.	0	-100	-50	9.	0	-100	-50
10.	50	-100	-50	11.	50	-100	-50	12.	50	-100	-50
13.	100	-100	-50	14.	100	-100	-50	15.	100	-100	-50
16.	-100	-50	-50	17.	-100	-50	-50	18.	-100	-50	-50
19.	-50	-50	-50	20.	-50	-50	-50	21.	-50	-50	-50
22.	0	-50	-50	23.	0	-50	-50	24.	0	-50	-50
25.	50	-50	-50	26.	50	-50	-50	27.	50	-50	-50
28.	100	-50	-50	29.	100	-50	-50	30.	100	-50	-50
31.	-100	0	-50	32.	-100	0	-50	33.	-100	0	-50
34.	-50	0	-50	35.	-50	0	-50	36.	-50	0	-50
37.	0	0	-50	38.	0	0	-50	39.	0	0	-50
40.	50	0	-50	41.	50	0	-50	42.	50	0	-50
43.	100	0	-50	44.	100	0	-50	45.	100	0	-50
46.	-100	50	-50	47.	-100	50	-50	48.	-100	50	-50
49.	-50	50	-50	50.	-50	50	-50	51.	-50	50	-50
52.	0	50	-50	53.	0	50	-50	54.	0	50	-50
55.	50	50	-50	56.	50	50	-50	57.	50	50	-50
58.	100	50	-50	59.	100	50	-50	60.	100	50	-50
61.	-100	100	-50	62.	-100	100	-50	63.	-100	100	-50
64.	-50	100	-50	65.	-50	100	-50	66.	-50	100	-50
67.	0	100	-50	68.	0	100	-50	69.	0	100	-50
70.	50	100	-50	71.	50	100	-50	72.	50	100	-50
73.	100	100	-50	74.	100	100	-50	75.	100	100	-50

В таблице 3.10 представлен пример экспериментальных данных, полученных при измерении распределения напряженности микроволнового поля в слое пшеницы влажностью 24%. Эксперимент проводился для трех уровней влажности пшеницы при пятикратной повторности.

Значения коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля, полученные на основе экспериментальных данных приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.10 – Экспериментальные данные измерения распределения напряженности микроволнового поля в слое пшеницы влажностью 24%

№	Коорд. отн. оси, мм			значения напряженности, В/м					
	X	*Y*	*Z*	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	$E_{ср}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-100	-100	-50	394,06	394,46	420,06	407,84	398,4	402,96
2	-100	-50	-50	3853,92	3738,3	3873,18	3684,34	3641,94	3758,34
3	-100	0	-50	5058,96	4981,32	4995,44	5051,9	5256,62	5068,84
4	-100	50	-50	3742,54	3768,74	3708,86	3514,24	3843,58	3715,6
5	-100	100	-50	385,94	400,98	368,96	393,26	397,9	389,4
6	-50	-100	-50	89,62	86,12	85,68	86,76	83,88	86,42
7	-50	-50	-50	1202,92	1186,08	1194,5	1230,58	1151,2	1193,06
8	-50	0	-50	2527,82	2479,8	2608,72	2439,36	2621,36	2535,42
9	-50	50	-50	1189,44	1259,6	1191,8	1241,76	1269,12	1230,34
10	-50	100	-50	84,36	84,36	81,32	86,46	86,38	84,56
11	0	-100	-50	19,14	20,2	18,06	19,24	19,62	19,24
12	0	-50	-50	81,7	83,82	85,94	76,3	75,98	80,74
13	0	0	-50	122,88	120,18	116,24	120,42	122,76	120,5
14	0	50	-50	82,54	80,3	80,14	88,22	83,1	82,86
15	0	100	-50	18,36	18,4	17,46	18,46	18,1	18,16
16	50	-100	-50	52,96	53,92	52,96	53,86	52,96	53,34
17	50	-50	-50	599,42	559,86	599,42	573,04	599,42	586,24
18	50	0	-50	1090	1081,28	1090	1136,88	1090	1097,64
19	50	50	-50	599,42	615	599,42	605,42	599,42	603,74
20	50	100	-50	52,96	50,96	52,96	49,42	52,96	51,86
21	100	-100	-50	385,92	380,92	385,92	411,4	385,92	390,02
22	100	-50	-50	3542,54	3443,34	3542,54	3386,66	3542,54	3491,52
23	100	0	-50	4647,74	5046,62	4647,74	5033,32	4647,74	4804,64
24	100	50	-50	3698,22	3809,18	3698,22	3664,94	3698,22	3713,76
25	100	100	0	402,18	378,46	402,18	406,6	402,18	398,32
26	-100	-100	0	217,92	214,22	215,74	216,62	198,74	212,64
27	-100	-50	0	3236,88	3405,2	3117,12	3547,62	3020,02	3265,36
28	-100	0	0	5758,04	5587,36	5331,34	5951,98	5713,5	5668,44
29	-100	50	0	3681,54	3887,7	3497,46	3825,12	3655,78	3709,52
30	-100	100	0	258,28	243,56	267,84	268,36	250,28	257,66
31	-50	-100	0	148,02	135,44	157,94	153,66	156,76	150,36
32	-50	-50	0	2418,06	2207,68	2384,2	2507,52	2497,86	2403,06
33	-50	0	0	4241,68	4428,3	3940,52	4271,36	4593,74	4295,12
34	-50	50	0	2490,6	2595,2	2707,28	2341,16	2266,44	2480,14
35	-50	100	0	101,8	93,14	98,94	106,38	104,34	100,92
36	0	-100	0	36,88	38,5	34,34	35,04	34,78	35,92
37	0	-50	0	151,76	148,28	161,48	165,28	141,9	153,74

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	0	0	0	243,92	222,94	232,22	231	250,02	236,02
39	0	50	0	150,22	137	149,92	137,3	147,36	144,36
40	0	100	0	36,88	34,38	39,4	35,18	39,5	37,06
41	50	-100	0	122,82	123,06	122,82	115,32	122,82	121,36
42	50	-50	0	1183,32	1235,38	1183,32	1073,26	1183,32	1171,72
43	50	0	0	2044,78	1840,3	2044,78	2077,5	2044,78	2010,42
44	50	50	0	1080,92	993,36	1080,92	1170,62	1080,92	1081,34
45	50	100	0	131,86	142,82	131,86	137,94	131,86	135,26
46	100	-100	0	206,46	188,7	206,46	220,5	206,46	205,72
47	100	-50	0	3477,64	3557,62	3477,64	3220,3	3477,64	3442,16
48	100	0	0	5135,42	5841,84	5135,42	5727,66	5135,42	5395,16
49	100	50	0	3399,98	3406,78	3399,98	3515,58	3399,98	3424,46
50	100	100	0	198,46	217,9	198,46	206	198,46	203,86
51	-100	-100	50	345,08	332,66	334,72	325,42	341,62	335,9
52	-100	-50	50	3082,6	3067,18	2987,04	3172	3020,94	3065,96
53	-100	0	50	4952,5	4577,06	5161,08	4792,6	5314,02	4959,46
54	-100	50	50	3236,74	3165,52	3405,04	3288,52	3482,72	3315,7
55	-100	100	50	326,82	316,04	325,52	308,86	325,84	320,62
56	-50	-100	50	152,58	158,98	151,06	155,94	152,12	154,14
57	-50	-50	50	1424,46	1410,22	1505,66	1341,84	1467,2	1429,88
58	-50	0	50	2462,28	2646,96	2353,94	2504,14	2585,4	2510,54
59	-50	50	50	1510,8	1454,9	1430,72	1628,64	1456,4	1496,28
60	-50	100	50	170,72	180,96	176,86	176,52	168,68	174,74
61	0	-100	50	68,58	67,7	71,46	70,84	70,1	69,74
62	0	-50	50	230,16	219,1	238,44	225,78	236,82	230,06
63	0	0	50	340,48	363,64	330,62	334,7	324,82	338,86
64	0	50	50	237,2	238,62	240,04	244,08	231,74	238,34
65	0	100	50	69,94	71,06	70	67,2	68,12	69,26
66	50	-100	50	162,86	172,64	162,86	167,74	162,86	165,8
67	50	-50	50	1366,9	1325,9	1366,9	1457,12	1366,9	1376,74
68	50	0	50	2343,9	2357,96	2343,9	2484,54	2343,9	2374,84
69	50	50	50	1410,08	1427	1410,08	1453,78	1410,08	1422,2
70	50	100	50	155	149,74	155	149,58	155	152,86
71	100	-100	50	236,38	228,1	236,38	233,06	236,38	234,06
72	100	-50	50	3175,06	3098,86	3175,06	3089,34	3175,06	3142,68
73	100	0	50	4233,12	4364,02	4233,12	4382,72	4233,12	4289,22
74	100	50	50	2928,46	2992,88	2928,46	3130,52	2928,46	2981,74
75	100	100	50	345,08	338,52	345,08	354,38	345,08	345,62

Таблица 3.11 – Значения коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля, полученные на основе экспериментальных данных

W, %	Номер измерения					
	$K_{равн\ 1}$	$K_{равн\ 2}$	$K_{равн\ 3}$	$K_{равн\ 4}$	$K_{равн\ 5}$	$K_{равн\ среднее}$
16	0,38128	0,390358	0,402989	0,426276	0,357204	0,391621
20	0,28125	0,340313	0,330938	0,300313	0,33	0,316563
24	0,252511	0,250549	0,271037	0,247713	0,256229	0,257601

На рисунке 3.33 приведены экспериментальная зависимость коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля от влажности обрабатываемой пшеницы. При этом линия 1 соответствует зависимости, полученной на основе моделирования (таблица 3.5); 2 – прямая, соответствующая 0,368; 3 – зависимость, полученная на основе экспериментальных исследований.

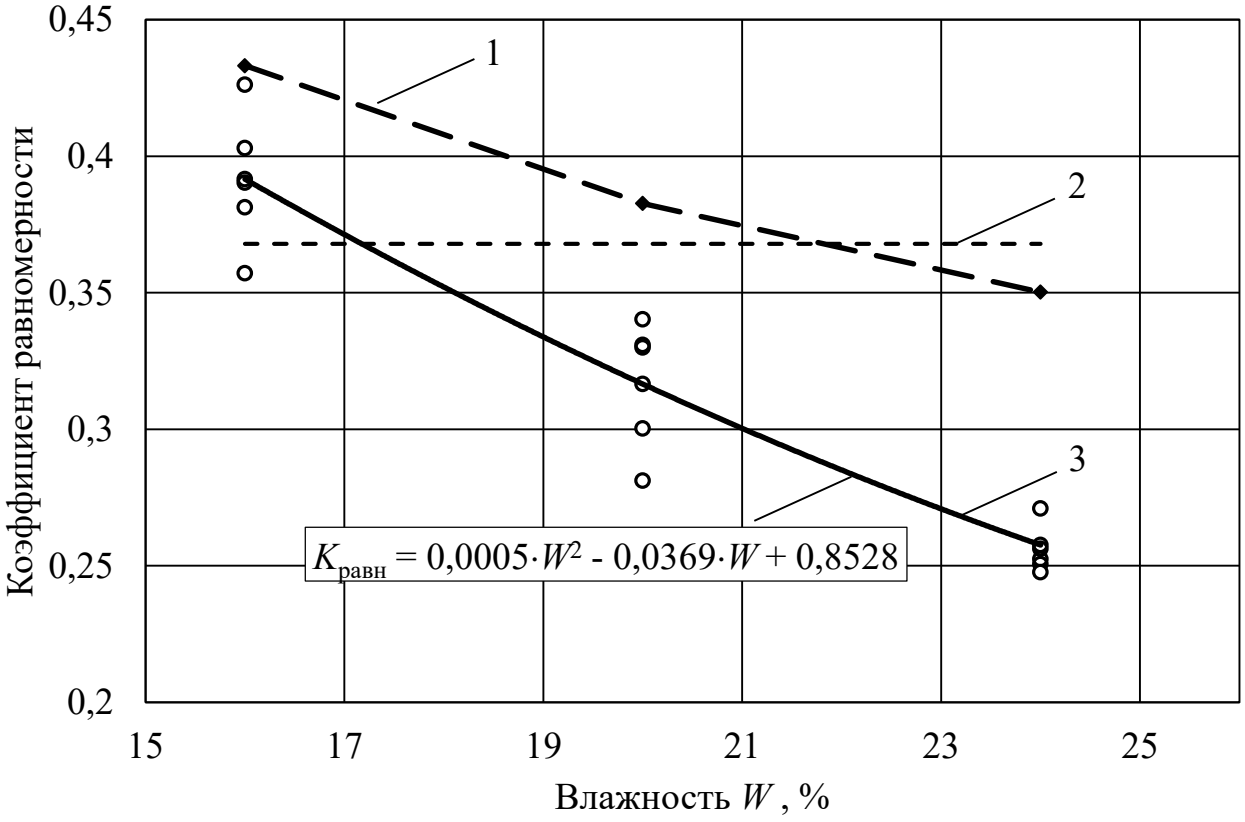


Рисунок 3.33 – Экспериментальные значения коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля

Как видно из таблицы 3.11 и рисунка 3.33, расчетные значения $K_{равн}$ значительно ниже расчетных, полученных на основе моделирования. Так для рассмотренных вариантов реализации зоны СВЧ воздействия при учете существующих данных требуемая равномерность распространения поля может быть обеспечена до 22% влажности пшеницы, однако по результатам экспериментальной проверки максимальный уровень влажности, при котором искомый коэффициент достигает требуемого уровня составляет 18,5-19%. Отличия от расчетных могут быть обусловлены неточностью сведений о диэлектрических свойствах рассматриваемого материала, его засоренностью, измерительными погрешностями, и т.д. Т.к. существующие данные получены для плотного слоя зерна при низких уровнях воздействующего поля, то необходимо разработать метод определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя, подвергающегося нагреву от источников мощности, применяемых в разрабатываемой установке.

3.7 Исследование изменение коэффициента диэлектрических потерь зерна

Исследование комбинированных способов воздействия на сельскохозяйственные материалы и разработка энергоэффективного оборудования во многом сопряжены с разработкой промышленного оборудования на основе математических и компьютерных моделей. Широкие возможности для разработки подобного оборудования дает применение специализированных программных средств. В итоге применение СВЧ полей позволит снизить затраты на тепловую обработку на 15-20%, в зависимости от процесса и вида обрабатываемого материала. Для обеспечения требуемых параметров, предъявляемых к сушильному оборудованию, необходимо обеспечить равномерный нагрев обрабатываемого материала по объемы продуктопровода. Современные средства компьютерного моделирования позволяют проводить прототипирование и визуальное представление зоны обработки материала. Для проведения моделирования и дальнейшей разработки перед проведением математического моделирования и изготовления образцов оборудование необходимо исследовать свойства зерновых культур.

3.7.1 Разработка метода косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя

Одним их первых серьёзных исследований, направленных на изучение диэлектрических свойств веществ является работа Дебая, начатая в 1929 году. В данной работе определение диэлектрической проницаемости веществ основывалась на измерении их электрического сопротивления и была ориентирована на решение задачи определения влажности исследуемых образцов.

При учете того, что диэлектрическая проницаемость связана с рядом других величин (напряжённость электрического поля, ёмкость, тип материала и др.), измерения носят косвенный характер. Основой идеей является экспериментальное получение в различных режимах измеряемых параметров, по которых можно вычислить ε. При этом средства и методы измерения зависят от соответствующих типов исследуемых сельскохозяйственных культур, частоты воздействующего электромагнитного излучения, требуемой степени точности измерения и т.д.

Для диапазона частот ниже 200 МГц используются мостовые схемы сопротивлений и резонансные контуры. При частотах выше 200 МГц линии передач, резонансная техника, волноводные и коаксиальные системы.

Исследование диэлектрических свойства зерна в диапазоне частот от 250 Гц до 20 кГц были начаты ещё в 1970-м году Коркораном. При этом определение искомых величин осуществлялось с помощью моста сопротивлений и резонансного контура.

Начиная с 1970-х годов широкое распространение получил метод определения диэлектрических свойств с помощью волноводов и коаксиальной техники. Основные измерения проводились такими приборами, как RX-метры. В то время проводились исследования на частотах от 50-и до 250 МГц.

К началу 1990-х был выполнен большой объем по определению диэлектрических свойств с помощью резонансной техники. Основная работа была направлена на измерения в диапазоне с 1-50 МГц с помощью Q-метра, работающего по принципу резонансного контура.

В 1998 году Лоуренсом был разработан и изготовлен коаксиальный держатель образца для измерения диэлектрических свойств. При этом измерения проводились при помощи растворителей, таких как спирт, с известными диэлектрическими параметрами. Измерения проводились для диапазона частот от 25-и до 350 МГц.

Согласно ГОСТ Р 8.623-2006 измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков в диапазоне частот от 1 ГГц до 20 ГГц производится методом металлодиэлектрического резонатора.

3.7.1.1 Существующие методы определения диэлектрических свойств

Электроизоляционные материалы, к которым относится зерно, могут обладать поляризацией различных типов: электронной, ионной, миграционной, спонтанной, упругой. Каждой из них присуща своя предельная частота. Поэтому, для измерения относительной диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ необходимо использовать соответствующие по частоте методы [13, 35, 238].

Зерно различных сельскохозяйственных культур является типичным диэлектриком. Измерение диэлектрических свойств веществ базируется на отражении или прохождении электромагнитного излучения через вещество, используя резонансные или нерезонансные системы с открытой или закрытой структурой для экспериментального определения параметров исследуемых образцов. Волноводы или коаксиальные линии передач представляют собой закрытые структуры, в то время как измерения отрытого распространения электромагнитного излучения и открыто-закрытого коаксиальной линии представляют собой открытые системы.

Резонансные методы измерения параметров материалов основаны на изменении свойств колебательных систем при введении в них образцов исследуемого вещества [238]. Их используют в широком диапазоне частот - от единиц мегагерц до десятков гигагерц.

Поскольку резонансную частоту и добротность колебательных систем можно измерить с достаточно высокой точностью, резонансные методы измерения пара-

метров вещества оказываются наиболее совершенными. На умеренно высоких частотах до 300 МГц в качестве колебательных систем обычно используют Q-метры или измерители полных проводимостей. Для проведения измерений применяют специальный образцовый конденсатор, между обкладками которого помещают пластину исследуемого диэлектрика. Этот конденсатор подключают параллельно контуру Q-метра.

Метод измерения параметров диэлектрика сводится к следующему. С помощью Q-метра измеряют емкость образцового конденсатора с образцом исследуемого диэлектрика и без него. Искомая диэлектрическая проницаемость определяется как отношение этих двух емкостей:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{зап}}}{C_{\text{возд}}}, \tag{3.34}$$

где $C_{\text{зап}}$ и $C_{\text{возд}}$ – соответственно электрические емкости заполненного семенами и пустого (с воздухом) измерительного конденсатора, Ф.

Для нахождения тангенса угла потерь материала необходимо измерить добротность контура с исследуемым материалом и без него. По результатам измерений можно рассчитать tan δ , воспользовавшись следующей зависимостью:

$$tg\delta = \frac{C_{\text{общ}}}{C_{\text{зап}}}\left(\frac{1}{Q_{\text{зап}}} - \frac{1}{Q_{\text{возд}}}\right), \tag{3.35}$$

где $C_{\text{общ}}$ – общая емкость контура, Ф;

$Q_{\text{зап}}$ – собственная добротность контура с исследуемым диэлектриком;

$Q_{\text{возд}}$ – собственная добротность контура без диэлектрика.

В диапазоне СВЧ в качестве колебательных систем могут использоваться коаксиальные объемные резонаторы. В этом диапазоне наиболее простой способ измерения параметров вещества состоит в измерении резонансной частоты и добротности резонатора, заполненного и незаполненного исследуемым веществом, и в расчете параметров этого вещества с помощью формул:

$$\varepsilon = \left(\frac{\omega_{\text{возд}}}{\omega_{\text{зап}}}\right)^2, \tag{3.36}$$

$$tg\delta = \left(\frac{1}{Q_{\text{зап}}} - \frac{1}{Q}\right), \qquad (3.37)$$

где $\omega_{\text{возд}}$, $Q_{\text{возд}}$ и $\omega_{\text{зап}}$, $Q_{\text{зап}}$ – резонансная частота и добротность незаполненного и заполненного исследуемым материалом резонатора.

Данный способ является одним из базовых для экспериментального определения диэлектрической проницаемости. При этом, в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц можно учесть влияние бокового электрического поля, возникающего на краях электродов плоского измерительного конденсатора [238, 330].

Указанный метод обычно используется для измерения параметров газов, жидкостей и сыпучих материалов. Основной его недостаток состоит в том, что если диэлектрическая проницаемость исследуемого материала существенно отличается от единицы, то при введении его в резонатор резонансная частота сильно изменяется, при этом изменяется собственная добротность резонатора. Поэтому вычисление может привести к большой погрешности. Кроме того, практически невозможно заполнить твердым диэлектрическим материалом всю внутреннюю полость резонатора так, чтобы не оставалось воздушных зазоров.

Волноводные методы. Для изучения диэлектрических свойств веществ и фактора диэлектрических потерь может применяться метод с использованием волновода и коаксиальных линий, впервые разработанный в Массачусетском технологический институте [330]. Волноводные методы измерения параметров материалов широко применяются в сантиметровом диапазоне волн. В диапазоне дециметровых волн те же методы могут быть реализованы с применением коаксиальных линий.

Диэлектрическая проницаемость в этом методе может быть получена из вычислений с помощью измерения фазы и амплитуды отражённого микроволнового излучения от образца.

Сущность волноводных методов состоит в том, что отрезок волновода заполняется исследуемым веществом. Для измерения параметров вещества достаточно экспериментально найти длину волны (фазовую скорость) и постоянную затухания волны в волноводе, заполненном этим веществом, затем из этих величин можно найти диэлектрическую проницаемость.

Методы свободного пространства. Квазиоптические методы, которые иногда называют методами свободного пространства, применяют для измерения параметров диэлектриков в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн, где являются основными методами измерения параметров вещества. Сущность методов основана на измерении фазовой скорости и затухания плоской электромагнитной волны в исследуемом диэлектрике.

Метод свободного пространственного определения не требует специального образца, что удобно для определения неоднородных диэлектриков [238, 330].

В этой технологии материал располагается между передающим излучателем и принимающим излучателем, по затуханию и сдвигу фаз можно вычислить значение ε. Измерение таким методом может расширить диапазон частот для определения требуемых параметров. Точность такого метода зависит от возможностей измеряющей системы.

Резонаторные методы. Более частным случаем резонансных методов являются методы объёмных резонаторов, применяемых для определения диэлектрических параметров твёрдых веществ [330].

Метод объемного резонатора при фиксированной резонансной частоте.

Определение относительной диэлектрической проницаемости заключается в измерении разности резонансной длины резонатора без образца и резонансной длины после помещения в него образца при фиксированной резонансной частоте. Определение тангенса угла диэлектрических потерь базируется на измерении собственной добротности резонатора с образцом и сравнение с собственной добротностью резонатора без образца с учетом изменения распределения поля и омических потерь в стенках резонатора после помещения образца.

Метод объемного резонатора при фиксированной резонансной длине.

Здесь диэлектрическую проницаемость можно найти из измерения резонансных частот резонатора до и после помещения в него образца при фиксированной резонансной длине, определение $tan\delta$ заключается в измерении собственной доб-

ротности резонатора с образцом и сравнении ее с собственной добротностью резонатора без образца с учетом изменения распределения поля, и также резонансной частоты и омических потерь в стенках резонатора после помещения образца.

Смешанные способы. Так называемая технология передающей линии довольно сложная, потому как образец должен быть сделан в виде круглой шайбы, подогнанный под волновод в зависимости от частоты излучения [330]. Данный метод широко используется в основном для определения параметров жиров и нефти и для определения зерна не совсем удобен. Размеры образца при этом должны быть такими, чтобы он входил внутрь резонатора без зазоров.

Открыто-закрытая коаксиальная линия представляет собой систему для широкополосного исследования (1- 20 ГГц) и может использоваться как для жидких, так и для твёрдых образцов [238, 330]. Это неразрушающий метод, он предполагает, что исследуемое вещество не магнитно и является анизотропным. Данный метод также достаточно сложен и имеет погрешность порядка 5 %.

Представленные выше способы имеют свои достоинства и недостатки, и целесообразность использования каждого из них определяется условиями эксперимента. Основная сложность заключается в том, что наиболее точные методы применительно для СВЧ-диапазона требуют, чтобы исследуемый объект представлял собой монолитный образец с определёнными геометрическими параметрами, только тогда будет достигнута корректность измерения, что не совсем удобно для зерновых культур в силу размера, наиболее корректными остаются на данный момент резонансные методы. При этом нет гостированных методов определения диэлектрических свойств сыпучих материалов, находящихся во взвешенном слое.

3.7.1.2 Контрольно-измерительные приборы

Как указывалось ранее, существующие методы измерения диэлектрических свойств являются косвенными и предназначены для измерения параметров непосредственно материала. В случае термической обработки зерновых с применением электромагнитных полей, мы имеем дело с зерно-воздушной смесью. При этом зерновой слой может находиться в различных состояниях (плотный неподвижный, плотный подвижный, псевдоожиженный, взвешенный).

С точки зрения разработки и моделирования зерносушильного оборудования, в котором применяется микроволновое поле нам необходимо знать именно свойства соответствующего слоя зерна.

Так как для определения удельной мощности, выделяемой в зерновом слое, требуется знание коэффициента диэлектрических потерь материала, то разрабатываемый метод будет направлен на определение именно этой характеристики.

При измерениях, помимо указанных ранее приборов будет применялось следующее оборудование:

– для контроля процессов и регистрации оптических сигналов от датчиков – унифицированный регистрирующий модуль (УРМ) FIU-44-1.55-40-S-A4-IP40-2 (рисунок 3.34). В таблице 3.12 представлены технические характеристики регистрирующего модуля;



Рисунок 3.34 – Унифицированный регистрирующий модуль (УРМ) FIU-44-1.55-40-S-A4-IP40-2

Таблица 3.12 – Технические характеристики

Параметр	значение
1	2
Спектральная ширина оптического канала, нм	1510 ÷ 1595
Состояние поляризации источника света	частично поляризованный
Количество каналов	2
Количество датчиков на канал	16
Диапазон интенсивностей регистрируемых оптических сигналов, дБм	-80 ÷ -20
Динамический диапазон, дБ	30
Интегральная оптическая мощность источника света, дБм	0
Частота опроса датчиков, кГц	2
Время обработки и вывода данных одного канала, с	< 0,05

Продолжение таблицы 3.12

1	2
Программное обеспечение	Полнофункциональное ПО URM_Control
Выходные интерфейсы	USB 2.0, USB 3.0, Ethernet RJ45, SVGA, DVI-I, HDMI
Потребляемая мощность, Вт	< 250
Степень защиты УРМ по ГОСТ 14254 - 96	IP40
Климатическое исполнение прибора по ГОСТ 15150 - 69, не хуже	УХЛ 4.1
Рабочий температурный диапазон, ºС	+10 ÷ +40
Влажность, % (без образования конденсата)	< 80
Электропитание, В/Гц	220/50
Изоляционные характеристики	
Электрическое сопротивление изоляции цепей питания	Более 20000 МОм
Прочность электрической изоляции цепей	2000В (в течение 60 сек)
Помехоустойчивость к ЭМС в соответствие с ГОСТ	
К электростатическим разрядам	ГОСТ Р 51317.4.2 - 2010
К радиочастотному магнитному полю	ГОСТ Р 51317.4.3 - 99
К наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р 51317.4.4 - 2007
К микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5 - 99
К кондуктивным помехам, наведенным р/ч э/м полями	ГОСТ Р 51317.4.6 - 99
К провалам, прерываниям, изменениям напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.11 - 2007
Виброустойчивость	
Синусоидальные вибрации с перегрузкой 1.0 g в диапазоне частот 7 ÷ 100 Гц в части вибрационных нагрузок	> 30 минут
Области применения	энергетика, в том числе - атомная и термоядерная; металлургия и химическая промышленность; нефтедобыча и газодобыча; трубопроводный транспорт; строительство; медицина; системы безопасности; научные исследования

– датчики температуры волоконно-оптические OSMT-313(рисунок 3.35). В таблице 3.13 представлены технические характеристики оптических датчиков;



Рисунок 3.35 – Датчики температуры волоконно-оптические OSMT-313

Таблица 3.13 – Технические характеристики волоконно-оптических датчиков температуры

Параметр	OSMT - 313
Материал датчика	керамическая трубка (призма)
Размер, мм	40 x 5 x 5
Способ крепления	клеевое соединение
Материал защиты оптического волокна	фторопластовая трубка
Центральная длина волны, нм	1510 ÷ 1590
Диапазон измерения температуры, ºС	-70 ÷ +300
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, С	± 0,75
Класс точности по ГОСТ 6651-2009	А

– термоанемометр ТТМ-2-02-2 (рисунок 3.36). В таблице 3.14 представлены технические характеристики термоанемометра;



Рисунок 3.36 – Термоанемометр ТТМ-2-02

Таблица 3.14 – Технические характеристики термоанемометра

Диапазон измерения скорости воздушного потока, м/с	0,1…30
1	2
Разрешающая способность в диапазоне, м/с:	
0,1…10	0,01
10…30	0,1
Погрешность измерения скорости воздушного потока, м/с	±(0,05+0,05·V), V - скорость потока
Интерфейс связи с компьютером	USB

Продолжение таблицы 3.14

1	2
Длина линии связи по USB, м, не более	3
Напряжение питания	3 В
Время непрерывной работы от элементов питания, час (не менее)	100
Потребляемая термоанемометром мощность, Вт (не более)	0,5
Масса блока измерения, кг	0,3
Габаритные размеры блока измерения с учетом присоединенных разъемов, мм, не более	180×80×35
Габаритные размеры первичного преобразователя, мм, не более	Ø13х360
Рабочие условия применения блока измерения:	
— температура воздуха, оС	-20...+50
— относительная влажность, % (без конденсации влаги)	10...95
— атмосферное давление, кПа	84...106
Средний срок службы, лет	5

– влагомер Фауна-М (рисунок 3.37). В таблице 3.15 представлены технические характеристики влагомера.



Рисунок 3.37 – Влагомер Фауна-М

Таблица 3.15 – Технические характеристики термоанемометра

Разрешающая способность -	0,1 %.
1	2
Диапазон измерений влажности:	
зерновых культур	от 4,5 до 35,0 %;
масличных культур	от 6,5 до 20,0 %.
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности:	
в диапазоне до 17 %	от 0,5 до 1,0 %.
в диапазоне свыше 17 %	от 1,0 до 1,5 %.

Продолжение таблицы 3.15

1	2
Время единичного измерения	12 с
Автоматическая термокомпенсация в интервале рабочих температур	от 5 до 40 °С
Объем измерительной камеры	270 см^3
Электропитание	батарея 9 В
Напряжение включения сигнализации о замене батареи	(7,0 ± 0,2) В
Габаритные размеры	191×104×56 мм
Масса	330 г

3.7.1.3 Плотный зерновой слой

Лабораторная установка, представленная на рисунке 3.32, позволяет провести исследование распределения напряженности микроволнового поля в плотном зерновом слое по методике, описанной выше.

Зная напряженность поля в конкретной точке, и измерив изменение температуры за время контроля, коэффициент диэлектрических потерь может быть определен аналитически по зависимости:

$$\varepsilon'' = \frac{c_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \Delta T}{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \tau}, \qquad (3.38)$$

где $c_м$ – теплоемкость материала, Дж/кг·°С;

$\rho_м$ – плотность вещества образца, кг/м^3;

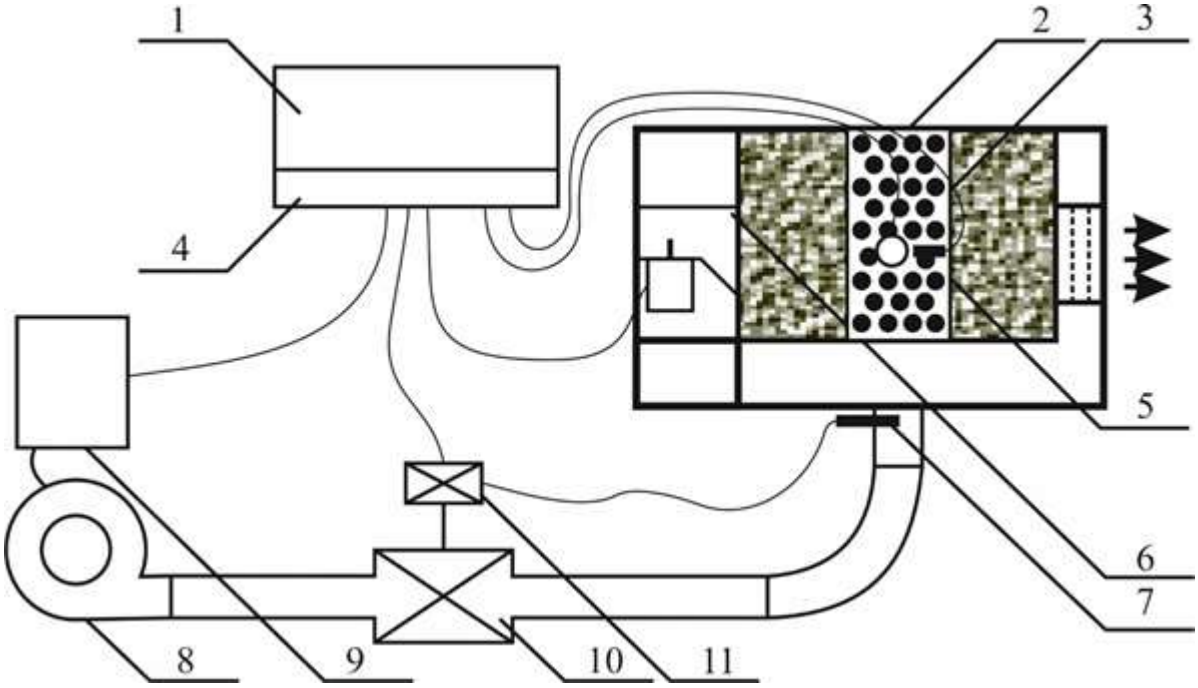
ΔT – нагрев материала в процессе измерения, °С;

E – напряженность электрического поля, В/м;

f – частота электромагнитного поля, Гц.

3.7.1.4 Псевдоожиженный зерновой слой

Для определения параметров взвешенного слоя необходимо проверить проникновение электромагнитного поля в слой зерна, находящийся во взвешенном слое. Зная напряженность поля и теплотехнические свойства материала, можно аналогично определить коэффициент диэлектрических потерь. При этом необходимо учесть теплоотдачу во окружающую среду. Для проведения этих исследований, лабораторная установка приняла вид, приведенный на рисунке 3.38 [59, 74, 78].

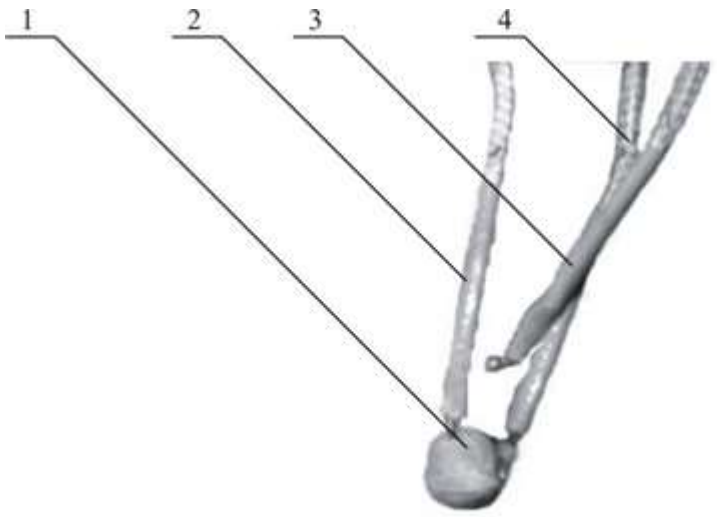


1 – ПК, 2 –зона СВЧ-конвективной обработки, 3 – калориметрический датчик, 4 – плата ввода/вывода, 5 – датчик температуры зернового слоя, 6 – источник СВЧ (магнетрон, блок питания, волновод, 7 – датчик температуры воздуха, 8 – вентилятор, 9 – ПЧВ, 10 – нагреватель, 11 - терморегулятор

Рисунок 3.38 – Лабораторная установка

При этом возможна реализация нагрузки изучаемым материалом как при полном, так и при частичном заполнении объема зоны СВЧ-конвективной обработки. Обеспечение состояния псевдоожиженного либо взвешенного слоя осуществляется

посредством продувания через слой воздуха с требуемой скоростью от вентилятора. Скорость потока воздуха регулируется через векторный преобразователь частоты (ПЧВ). Контроль температуры в зерновке осуществляется термопарами (встроенной в центр зерновки и закрепленной на поверхности зерновки – рисунок 3.39) [51, 57, 95, 107, 123], а также волоконно-оптическим датчиком температуры на поверхности зерновки.



1 – зерновка; 2 – термопара в центре зерновки; 3 – термопара в зоне сушки; 4 – термопара на поверхности зерновки

Рисунок 3.39 – Размещение термопар в зерновке исследуемого материала

Как указывалось ранее, влажность внутренних и наружных слоев зерновок в большинстве случаев обладает разным уровнем влажности, а, следовательно, рассеиваемая мощность, интенсивность нагрева и конечная температура в этих областях будут различными. Для указанных измерений будут приниматься средние значения центра и поверхности.

3.7.2 Метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя

Для измерений данным методом в диапазоне частот 0,4-2,5 ГГц используют образцы, заполняющие зону СВЧ-конвективного воздействия, с относительной диэлектрической проницаемостью от 2 до 100. Особенностью метода является заполнение зоны измерения зерном с требуемой плотностью слоя.

1 Сущность метода:

1.1 В предлагаемом методе для измерений используют образцы, заполняющую зону СВЧ-конвективного воздействия, с относительной диэлектрической проницаемостью от 2 до 100. Схематическое изображение лабораторной установки для проведения измерений приведено на рисунках 3.32 (для плотного слоя), 3.38 (для псевдоожиженного и взвешенного слоев).

1.2 Определение относительной диэлектрической проницаемости заключается в измерении температуры нагрева зернового слоя (зерновки) в зоне СВЧ-конвективной обработки с известными значениями напряженности действующего поля в точке контроля, зависимости теплоемкости исследуемого материала от его температуры и влажности. Для повышения точности измерения в плотном слое могут быть использованы волоконно-оптические датчики температуры.

2 Подготовка к выполнению измерений

При подготовке к выполнению измерений проводят следующие работы:

- собирают измерительную установку по схеме, приведенной на рисунке 4.8 (для плотного слоя) или 4.9 (для псевдоожиженного и взвешенного слоев);
- все приборы, входящие в состав измерительной установки, подготавливают к работе в соответствии с их технической документацией, в том числе запускают SCADA-систему контроля измерений;
- образцы подготавливают к измерениям в соответствии с соответствующим технологическим процессом, для которого будут в дальнейшем ис-

пользоваться полученные характеристики. При этом необходимо соблюсти отсутствие (наличие) примесей, равномерную влажность по объему, запыленность, и т.д.

3 Выполнение измерений

При выполнении измерений коэффициента диэлектрических потерь предлагаемым методом проводят следующие операции:

3.1 Для плотного слоя:

- производится контроль изменения температуры в течение 3 периодов нагрева (5 секунд СВЧ нагрев, 15 секунд на выравнивание температуры по объему зерновки);
- контроль роста температуры осуществляется термопарами в центре и на поверхности зерновки, а также волоконно-оптическим датчиком температуры на поверхности (в слое).

3.2 Для псевдоожиженного, взвешенного слоя:

- производится контроль изменения температуры в течение 3 периодов нагрева (5 секунд СВЧ нагрев, 15 секунд на выравнивание температуры по объему зерновки);
- контроль роста температуры осуществляется термопарами в центре и на поверхности зерновки.

4 Обработка результатов измерений

4.1 Коэффициент диэлектрических потерь исследуемого материала в плотном слое вычисляется по зависимости (3.38).

4.2 Коэффициент диэлектрических потерь исследуемого материала в псевдоожиженном и взвешенном слое (при наличии вентилирования) вычисляется по зависимости:

$$\varepsilon'' = \frac{c_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \Delta T + k_{\text{расс}} \cdot (T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}})}{5{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \tau}, \qquad (3.39)$$

где $T_{\text{нагр}}$ и $T_{\text{окр}}$ – температура нагрузки и окружающей среды соответственно, °С;

$k_{\text{расс}}$ – коэффициент теплового рассеяния, Дж/с·°С.

4.3 При определении коэффициента диэлектрических потерь образцов исследуемого материала плотного слоя параллельно вычисляют значения, получаемые волоконно-оптическим датчиком и средним значением между температурой и поверхности и центра зерновки.

4.4 При определении коэффициента диэлектрических потерь образцов исследуемого материала в псевдоожиженном и взвешенном слое (при наличии вентилирования) вычисления производят по среднему значению между температурой и поверхности и центра зерновки.

4.5 При определении коэффициента диэлектрических потерь образцов исследуемого материала проводят не менее четырех измерений и за результат принимают среднеарифметическое значение.

5 Требования к неопределенности измерений

Если необходима оценка повторяемости (сходимости) и воспроизводимости измерений, ее осуществляют в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2.

3.7.3 Результаты измерений

Экспериментальные исследования проводились для пшеницы с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 26 % и уровнями плотности слоя 800, 500, 200 кг/м^3; ячменя с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 28 % и уровнями плотности слоя 700, 450, 200 кг/м^3; овса с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 28 %; тритикале с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 28 % и уровнями плотности слоя 550, 400, 250 кг/м^3. В таблице 3.16 представлен пример промежуточных результатов вычислений, выполняемых измерительной системой в ходе эксперимента. В таблице 3.17 приведены результаты экспериментальных измерений диэлектрических свойств [75, 76, 79].

На рисунке 3.40 представлен пример полученных графиков определения коэффициента диэлектрических потерь для пшеницы при влажности от 11 до 30% для трех уровней плотности материала.

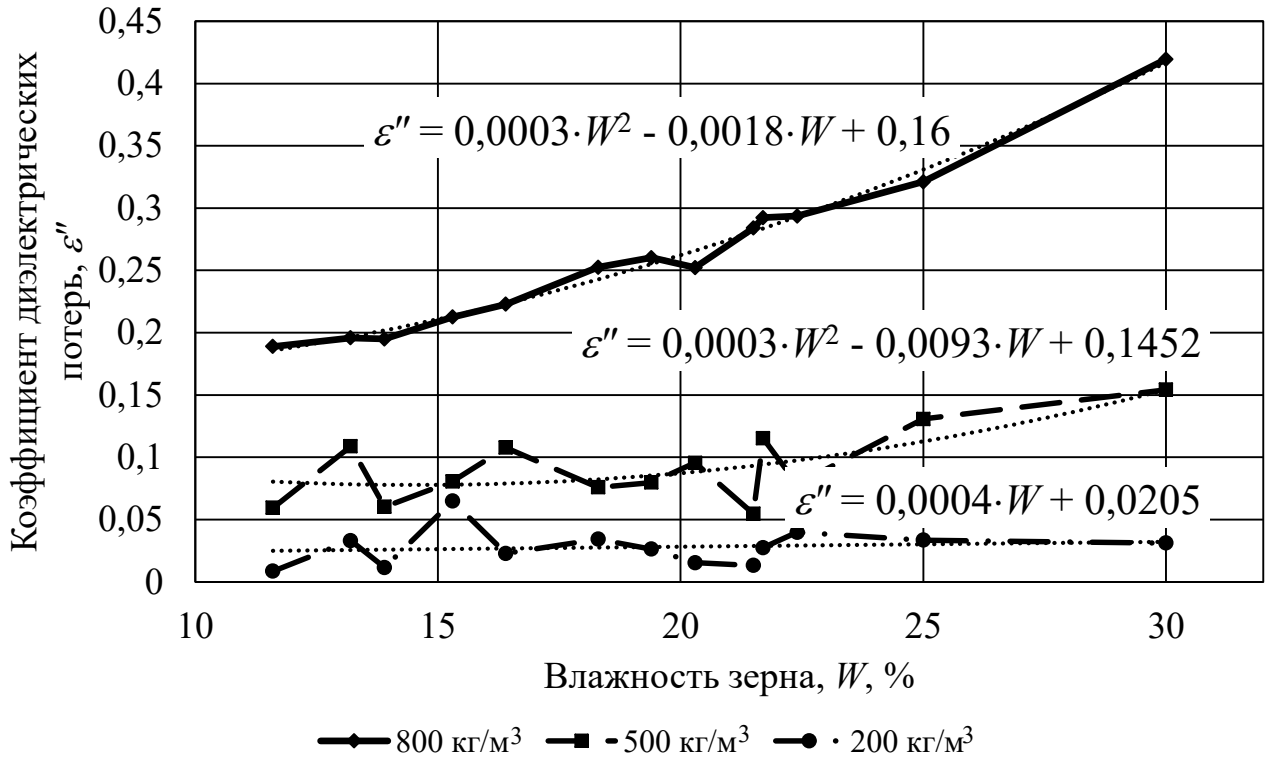


Рисунок 3.40 – Результаты определения коэффициента диэлектрических потерь

Полученные результаты для разных плотностей материала соответствуют общей динамике, но значительно отличаются по уровню. Так, для плотного слоя пшеницы, что соответствует плотности 800 кг/м^3 в диапазоне влажностей 11÷30% коэффициент диэлектрических потерь изменяется в диапазоне 0,18÷0,42; для псевдоожиженного слоя (500 кг/м^3) 0,06÷0,15; для взвешенного (200 кг/м^3) 0,1÷0,3. Достоверность данных для разных уровней плотности существенно отличается, так как в плотном слое погрешность обуславливается применяемыми датчиками, а также наличием воздушных промежутков в слое; для псевдоожиженного и взвешенного слоев помимо указанных добавляются потери, обусловленные тепловым взаимодействием воздуха с зерновым слоем и датчиком. Повысить качество измерений возможно за счет применения датчиков, на которые не действует микроволновое поле, например, оптические, а также изменением способа обеспечения требуемого слоя, например, механическим.

Таблица 3.16 – Пример экспериментальных данных по определению напряженности в зерновом слое

W	$\rho_з$	$T_н$	$T_к$	$c_н$	$c_к$	$c_{ср}$	$\rho_{в.н}$	$\rho_{в.к}$	$\rho_{в.ср}$	$\varepsilon'_{в.н}$	$\varepsilon'_{в.к}$	$\varepsilon'_{в.ср}$	$tg\delta_{в.н.}$	$tg\delta_{в.к.}$	$tg\delta_{в.ср.}$	$\varepsilon'_{з.н}$	$\varepsilon'_{з.к}$	$\varepsilon'_{з.ср}$	P_v	E	P_i	P_i	$dT/d\tau$
%	кг/м^3	°С	°С	Дж/кг·°С	Дж/кг·°С	Дж/кг·°С	кг/м^3	кг/м^3	кг/м^3										Вт/м^3	В/м	Вт	Дж	Град/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
11,6	660	27,1	34,29	4178,45	4177,59	4178,02	995,91	992,64	994,27	77,25	76,35	76,80	0,13	0,11	0,12	10,27	8,19	9,22	1194719,99	975,28	41,20	1029,91	0,23
	440	24,82	37,05	4179,23	4177,78	4178,51	996,71	991,04	993,88	77,55	76,06	76,80	0,14	0,10	0,12	11,07	7,54	9,29	2031611,54	1267,09	70,05	1751,36	0,38
	220	34,38	48,93	4177,60	4180,70	4179,15	992,59	981,41	987,00	76,34	75,60	75,97	0,11	0,07	0,09	8,16	5,54	6,85	2400649,94	1604,20	82,78	2069,49	0,61
13,2	660	24,06	53,02	4179,55	4182,23	4180,89	996,96	976,82	986,89	77,64	75,91	76,78	0,15	0,07	0,11	11,35	5,10	8,19	4779664,29	2069,89	164,81	4120,32	1,02
	440	31,43	55,22	4177,68	4183,13	4180,40	994,08	974,03	984,06	76,69	76,20	76,45	0,12	0,06	0,09	8,94	4,90	6,91	3914650,61	2038,75	134,99	3374,64	0,99
	220	25,14	44,73	4179,10	4179,36	4179,23	996,61	985,39	991,00	77,51	75,57	76,54	0,14	0,08	0,11	10,95	6,12	8,51	3245370,70	1673,40	111,91	2797,68	0,67
13,9	660	22,93	63,44	4180,10	4186,82	4183,46	997,30	961,25	979,28	77,79	78,31	78,05	0,15	0,06	0,10	11,79	4,46	8,14	6638401,37	2447,48	228,91	5722,65	1,43
	440	22,75	63,66	4180,19	4186,92	4183,56	997,36	960,85	979,10	77,81	78,39	78,10	0,15	0,06	0,10	11,86	4,45	8,17	33514634,64	5487,58	1155,66	28891,39	7,17
	220	26,25	54,5	4178,71	4182,83	4180,77	996,22	974,97	985,60	77,36	76,09	76,73	0,14	0,07	0,10	10,56	4,96	7,74	23281133,92	4700,12	802,78	20069,57	5,26
15,3	660	19,04	45,47	4182,61	4179,58	4181,09	998,32	984,74	991,53	78,25	75,56	76,90	0,17	0,08	0,13	13,46	6,01	9,67	21914022,72	4077,81	755,64	18891,05	3,96
	440	21,1	51,55	4181,15	4181,66	4181,41	997,81	978,56	988,19	78,01	75,76	76,89	0,16	0,07	0,12	12,54	5,24	8,84	25163959,68	4570,61	867,71	21692,67	4,97
	220	23,36	32,1	4179,88	4177,63	4178,76	997,18	993,76	995,47	77,73	76,61	77,17	0,15	0,11	0,13	11,62	8,75	10,18	7271374,61	2290,15	250,73	6268,31	1,25
16,4	660	28,36	63,34	4178,14	4186,77	4182,45	995,42	961,43	978,43	77,09	78,27	77,68	0,13	0,06	0,09	9,86	4,46	7,18	5725837,73	2419,88	197,44	4935,98	1,39
	440	30,45	67,47	4177,78	4188,82	4183,30	994,53	953,43	973,98	76,82	80,03	78,42	0,12	0,06	0,09	9,22	4,42	6,87	30167348,21	5677,68	1040,23	5201,17	7,68
	220	30,7	56,22	4177,75	4183,55	4180,65	994,42	972,68	983,55	76,79	76,37	76,58	0,12	0,06	0,09	9,15	4,82	6,98	20987033,01	4698,49	723,68	3618,39	5,26
18,3	660	28,51	49,34	4178,10	4180,85	4179,48	995,36	980,99	988,17	77,07	75,62	76,34	0,13	0,07	0,10	9,81	5,49	7,63	3441157,72	1819,45	118,66	2966,46	0,79
	440	27,03	62,18	4178,47	4186,22	4182,35	995,94	963,47	979,70	77,26	77,87	77,56	0,13	0,06	0,10	10,29	4,49	7,40	28805161,23	5344,30	993,26	4966,32	6,80
	220	28,77	45,54	4178,05	4179,60	4178,83	995,26	984,68	989,97	77,03	75,56	76,30	0,13	0,08	0,10	9,73	6,00	7,85	13875146,77	3602,93	478,44	2392,22	3,09
19,4	660	21,93	51,72	4180,65	4181,73	4181,19	997,59	978,37	987,98	77,91	75,78	76,84	0,16	0,07	0,11	12,20	5,23	8,66	4922403,82	2042,22	169,73	4243,37	0,99
	440	28,21	61,9	4178,17	4186,09	4182,13	995,48	963,95	979,72	77,11	77,78	77,44	0,13	0,06	0,09	9,90	4,50	7,22	27607615,51	5299,79	951,97	4759,85	6,69
	220	27,59	41,98	4178,32	4178,65	4178,48	995,72	987,64	991,68	77,19	75,68	76,43	0,13	0,09	0,11	10,10	6,58	8,32	11925628,72	3243,27	411,22	2056,10	2,50
20,3	660	27,59	59,24	4178,32	4184,87	4181,59	995,72	968,27	982,00	77,19	77,02	77,10	0,13	0,06	0,10	10,10	4,63	7,36	5198595,31	2276,75	179,26	4481,46	1,23
	440	27,11	52,32	4178,45	4181,96	4180,20	995,91	977,66	986,79	77,25	75,83	76,54	0,13	0,07	0,10	10,26	5,17	7,69	20798077,44	4455,46	717,16	3585,81	4,73
	220	28,38	45,31	4178,13	4179,53	4178,83	995,41	984,88	990,15	77,08	75,56	76,32	0,13	0,08	0,10	9,85	6,04	7,92	14010121,33	3602,66	483,10	2415,49	3,09

Продолжение таблицы 3.16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
21,7	660	27,83	49,24	4178,26	4180,81	4179,54	995,63	981,09	988,36	77,16	75,62	76,39	0,13	0,07	0,10	10,03	5,51	7,74	3537696,87	1831,31	121,99	3049,68	0,80
	440	28,57	51,73	4178,09	4181,73	4179,91	995,34	978,35	986,85	77,06	75,78	76,42	0,13	0,07	0,10	9,79	5,23	7,49	19106660,22	4327,85	658,84	3294,19	4,46
	220	29,36	49,7	4177,94	4180,98	4179,46	995,01	980,61	987,81	76,96	75,64	76,30	0,12	0,07	0,10	9,54	5,45	7,48	16794747,13	4059,82	579,12	2895,59	3,92
22,4	660	23,55	50,66	4179,79	4181,33	4180,56	997,12	979,56	988,34	77,71	75,69	76,70	0,15	0,07	0,11	11,55	5,34	8,40	4480543,87	1978,27	154,50	3862,47	0,93
	440	28,67	53,44	4178,07	4182,40	4180,24	995,30	976,31	985,80	77,05	75,95	76,50	0,13	0,07	0,10	9,76	5,06	7,39	20414883,89	4503,09	703,95	3519,74	4,83
	220	28,56	47,68	4178,09	4180,28	4179,19	995,34	982,67	989,01	77,06	75,57	76,31	0,13	0,08	0,10	9,79	5,70	7,73	15805504,12	3874,73	545,01	2725,04	3,57
25	660	37,64	58,76	4177,85	4184,65	4181,25	990,67	969,01	979,84	76,00	76,90	76,45	0,10	0,06	0,08	7,42	4,65	6,04	3461108,90	2050,42	119,35	2983,66	1,00
	440	30,2	61,27	4177,81	4185,79	4181,80	994,65	965,01	979,83	76,85	77,58	77,21	0,12	0,06	0,09	9,29	4,53	6,92	25461577,01	5196,46	877,97	4389,85	6,43
	220	27,6	49,81	4178,32	4181,02	4179,67	995,72	980,49	988,10	77,19	75,64	76,41	0,13	0,07	0,10	10,10	5,44	7,75	18345235,73	4169,49	632,58	3162,91	4,14
30	660	26,62	53,77	4178,59	4182,53	4180,56	996,09	975,90	985,99	77,31	76,00	76,65	0,13	0,07	0,10	10,43	5,03	7,71	4476502,65	2065,20	154,36	3858,98	1,02
	440	27,01	62,8	4178,48	4186,51	4182,50	995,94	962,39	979,17	77,26	78,08	77,67	0,13	0,06	0,10	10,30	4,47	7,40	29314629,07	5392,33	1010,83	5054,15	6,92
	220	27,52	61,68	4178,34	4185,98	4182,16	995,75	964,33	980,04	77,20	77,71	77,45	0,13	0,06	0,09	10,13	4,51	7,33	28002171,52	5296,00	965,57	4827,87	6,68
21,5	660	30,88	52,85	4177,73	4182,17	4179,95	994,34	977,03	985,69	76,76	75,89	76,32	0,12	0,07	0,09	9,09	5,11	7,09	3620755,40	1935,86	124,85	3121,28	0,89
	440	27,78	59,17	4178,27	4184,84	4181,55	995,65	968,38	982,01	77,16	77,00	77,08	0,13	0,06	0,10	10,04	4,63	7,33	25779655,21	5080,03	888,94	4444,69	6,14
	220	28,16	50,18	4178,18	4181,15	4179,67	995,50	980,09	987,80	77,11	75,66	76,39	0,13	0,07	0,10	9,92	5,40	7,64	18182607,70	4180,83	626,97	3134,87	4,16
21,7	660	27,83	49,24	4178,26	4180,81	4179,54	995,63	981,09	988,36	77,16	75,62	76,39	0,13	0,07	0,10	10,03	5,51	7,74	3537696,87	1831,31	121,99	3049,68	0,80
	440	28,57	51,73	4178,09	4181,73	4179,91	995,34	978,35	986,85	77,06	75,78	76,42	0,13	0,07	0,10	9,79	5,23	7,49	19106660,22	4327,85	658,84	3294,19	4,46
	220	29,36	49,7	4177,94	4180,98	4179,46	995,01	980,61	987,81	76,96	75,64	76,30	0,12	0,07	0,10	9,54	5,45	7,48	16794747,13	4059,82	579,12	2895,59	3,92
22,4	660	23,55	50,66	4179,79	4181,33	4180,56	997,12	979,56	988,34	77,71	75,69	76,70	0,15	0,07	0,11	11,55	5,34	8,40	4480543,87	1978,27	154,50	3862,47	0,93
	440	28,67	53,44	4178,07	4182,40	4180,24	995,30	976,31	985,80	77,05	75,95	76,50	0,13	0,07	0,10	9,76	5,06	7,39	20414883,89	4503,09	703,95	3519,74	4,83
	220	28,56	47,68	4178,09	4180,28	4179,19	995,34	982,67	989,01	77,06	75,57	76,31	0,13	0,08	0,10	9,79	5,70	7,73	15805504,12	3874,73	545,01	2725,04	3,57
25	660	37,64	58,76	4177,85	4184,65	4181,25	990,67	969,01	979,84	76,00	76,90	76,45	0,10	0,06	0,08	7,42	4,65	6,04	3461108,90	2050,42	119,35	2983,66	1,00
	440	30,2	61,27	4177,81	4185,79	4181,80	994,65	965,01	979,83	76,85	77,58	77,21	0,12	0,06	0,09	9,29	4,53	6,92	25461577,01	5196,46	877,97	4389,85	6,43
	220	27,6	49,81	4178,32	4181,02	4179,67	995,72	980,49	988,10	77,19	75,64	76,41	0,13	0,07	0,10	10,10	5,44	7,75	18345235,73	4169,49	632,58	3162,91	4,14
30	660	26,62	53,77	4178,59	4182,53	4180,56	996,09	975,90	985,99	77,31	76,00	76,65	0,13	0,07	0,10	10,43	5,03	7,71	4476502,65	2065,20	154,36	3858,98	1,02
	440	27,01	62,8	4178,48	4186,51	4182,50	995,94	962,39	979,17	77,26	78,08	77,67	0,13	0,06	0,10	10,30	4,47	7,40	29314629,07	5392,33	1010,83	5054,15	6,92
	220	27,52	61,68	4178,34	4185,98	4182,16	995,75	964,33	980,04	77,20	77,71	77,45	0,13	0,06	0,09	10,13	4,51	7,33	28002171,52	5296,00	965,57	4827,87	6,68

Таблица 3.17 – Экспериментальные данные о диэлектрических свойствах зернового слоя

№	Материал	Влажность, W, %	Плотность слоя, ρ, кг/м^3	ε''
1	2	3	4	6
1	Пшеница	14	800	1,4628
2			500	0,368
3			200	0,16008
4		16	800	1,9782
5			500	0,418
6			200	0,189
7		20	800	2,6353
8			500	0,4579
9			200	0,2184
10		24	800	3,2785
11			500	0,472
12			200	0,2508
13		26	800	4,0734
14			500	0,57327
15			200	0,28324
16	Ячмень	14	700	0,28
17			450	0,23572
18			200	0,1971
19		16	700	0,371397
20			450	0,32696
21			200	0,26961
22		20	700	0,60372
23			450	0,54662
24			200	0,44121
25		24	700	0,95452
26			450	0,8064
27			200	0,63656
28		28	700	1,3464
29			450	1,1882
30			200	0,9477

Продолжение таблицы 3.17

1	2	3	4	6
31	Овес	14	550	0,5565
32			400	0,40365
33			250	0,168
34		16	550	0,3322
35			400	0,33512
36			250	0,41553
37		20	550	0,4914
38			400	0,5115
39			250	0,61578
40		24	550	0,71052
41			400	0,6279
42			250	0,76248
43		28	550	0,88616
44			400	0,81585
45			250	0,996
46	Тритикале	14	750	0,9672
47			475	0,3276
48			200	0,2015
49		16	750	1,3172
50			475	0,42826
51			200	0,2655
52		20	750	1,8585
53			475	0,5871
54			200	0,369
55		24	750	2,295
56			475	0,7077
57			200	0,448
58		28	750	2,9441
59			475	0,8602
60			200	0,5704

Полученные данные о зависимости коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя от влажности и плотности зернового слоя могут быть аппроксимированы полиномом второй степени вида:

$$\varepsilon'' = b_0 + b_1 \cdot W + b_2 \cdot \rho_з + b_3 \cdot W^2 + b_4 \cdot \rho_з^2 + b_5 \cdot W \cdot \rho_з, \qquad (3.40)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – коэффициенты пропорциональности.

Значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 полиномиальной модели для данных, соответствующих результатам экспериментальных исследований фактора диэлектрических потерь зернового слоя, приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Расчетные значения коэффициентов пропорциональности для расчета фактора диэлектрических потерь

Материал	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	SSE	R^2	RMSE
Пшеница	0,4232	0,3525	1,042	0,03711	0,3813	0,7108	0,6609	0,9549	0,2710
Ячмень	0,562	0,3329	0,08991	0,06301	0,05348	-0,0114	0,0024	0,9987	0,0164
Овес	0,5041	0,2005	0,001605	0,03722	-0,0528	0,03904	0,07621	0,8968	0,0920
тритикале	0,5852	0,3525	0,6362	-0,003194	0,2487	0,3868	0,1801	0,9808	0,1414

Пример графического представления исследуемой зависимости фактора диэлектрических потерь зернового слоя ячменя представлен на рисунке 3.41.

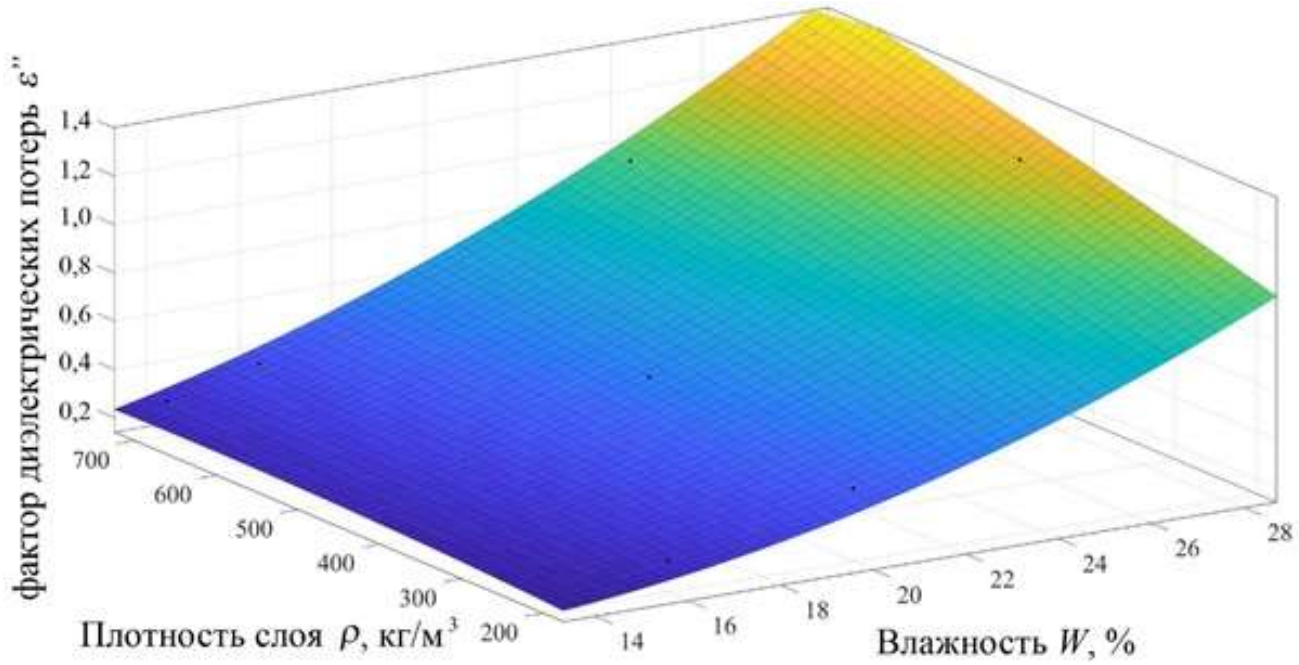


Рисунок 3.41 - Зависимость фактора диэлектрических потерь зернового слоя ячменя

Помимо указанных закономерностей отмечено отличие диэлектрических свойств зернового материала, измеряемых до обработки микроволновым полем и после прохождения зоны СВЧ-конвективного воздействия. Так при снижении влажности материала с 18 до 15 %, коэффициент диэлектрических потерь соответствует аналогичному показателю для зерна влажностью 17%, не подвергавшемуся воздействию. Спустя некоторое время для этого же материала коэффициент диэлектрических потерь принимает значения, характерные для материала, не подвергавшегося СВЧ обработке аналогичной влажности. Это можно связать с изменением состояния связи влаги, находящейся в зерновом слое. Как отмечалось ранее, в процессе обработки микроволновым полем происходит диффузия влаги на поверхностные слои и капилляры зерновки. Это свойство может быть использовано при дальнейшей разработке режимов управления оборудованием СВЧ-конвективной обработки. Однако, требуются дальнейшие исследования указанных свойств.

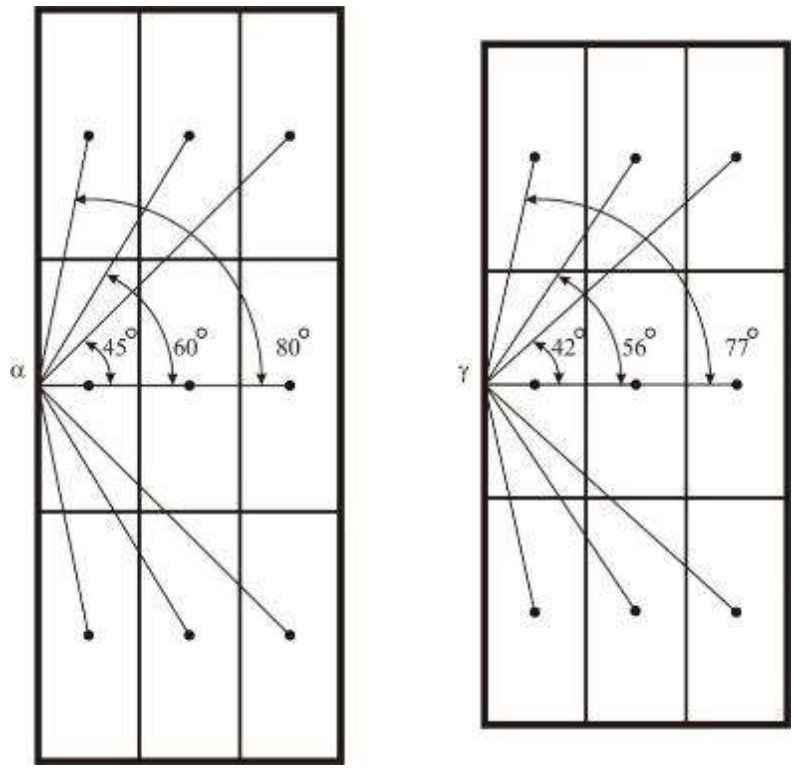
3.8 Исследование распределения СВЧ поля в продуктопроводе установки СВЧ-конветивной обработки зернового слоя

Как было показано выше, распространение электромагнитных полей в диэлектрических материалах с потерями отличается своей неравномерностью по объему обрабатываемого материала. Для изучения картины и закономерностей распространения поля разными учеными как аналитические, так и экспериментальные исследования.

3.8.1 Модель СВЧ-конвективного воздействия на зерновой слой

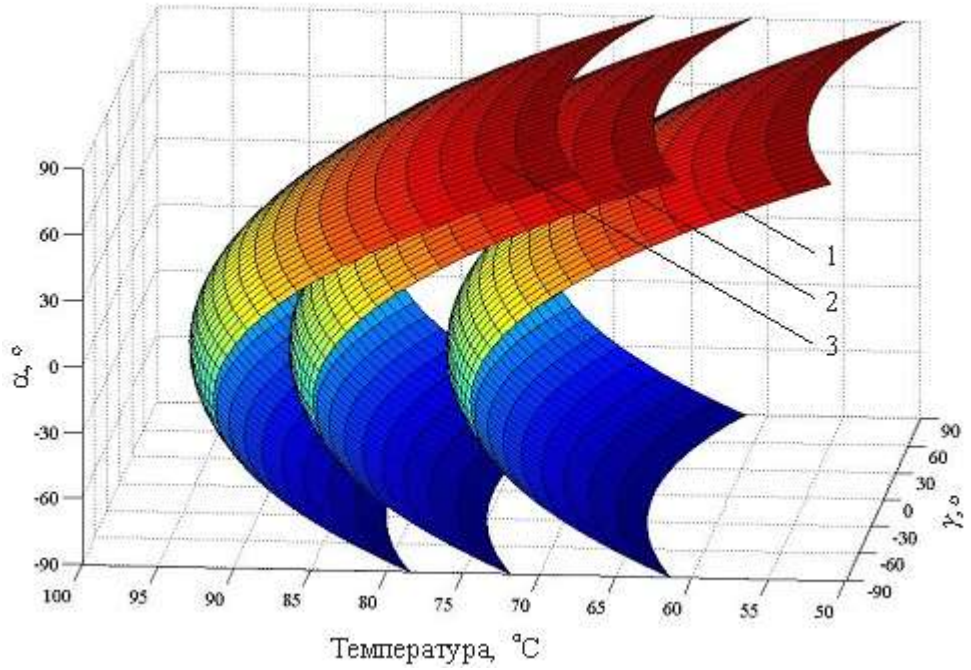
Так ранее [51, 95, 139] были получены регрессионные зависимости распространения температурного поля в зерновом слое под действием одного источника СВЧ-энергии от бытового магнетрона. На рисунке 3.42 приведена схема расположения точек контроля проводимого эксперимента, а на рисунке 3.43 пример визуального представления зависимостей по полученным экспериментальным данным [51].

Многие исследователи занимались исследованием численных методов при изучении микроволнового нагрева [13-16, 21, 194]. При этом, в качестве инструментов расчета, авторами использовались метод конечных элементов либо метод конечных разностей, а моделирования проводились для одномерных, двумерных и трехмерных задач. Анфиногентовым В.И. проводились исследования и математическое моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков [13]. В процессе работы автором разработаны математические модели нагрева диэлектриков на основе аналитических методов, что позволило проводить решение некоторых задач СВЧ нагрева. Как и в программах электромагнитного моделирования использовались конечностно-разностные методы для решения поставленных задач. По результатам работы сформулированы рекомендации по размещению контрольных точек для дальнейшего восстановления картины поля по результатам измерений. Еще одним отличием от предыдущего примера явилось то, что в качестве диэлектрика исследовались сплошные, в том числе жидкие диэлектрики.



а б

Рисунок 3.42 – Величины углов для точек контроля температуры зерна: а – вид сверху, величины углов α; б – вид сбоку, величины углов γ [51]



1 – l=10см; 2 – l=6см; 3 – l=4см на основе экспериментальных зависимостей

Рисунок 3.43 - Объемные графики распределения температур при t=10с, W=20%

Как видно из графиков, распространение поля крайне неравномерно, что при проникновении в материал может привести к перегреву участков, расположенных ближе к источнику поля и недостаточному прогреву более глубоких слоев. Для предотвращения подобных проблем исследователями разработаны множество различных видов конструкций оборудования для проведения сушки и обеззараживания. Одним из вариантов является конвейерное исполнение с подводом энергии от магнетронов малой мощности к слою малой толщины. В зависимости от частоты электромагнитного поля глубина проникновения в слой изменяется обратно пропорционально. Так для частоты 2,44 ГГц глубина проникновения в слой пшеницы влажностью 18% составит примерно 7-8 см, в то время как для пшеницы влажностью 14% эта глубина составит 11-12 см. Наибольшее выделение теплоты будет происходить в участках, обладающих большей влажностью либо в телах вредителей, обладающих большим фактором диэлектрических потерь [104].

Помимо вышеуказанного процесса термического обеззараживания в микроволновых полях, также следует отметить нетепловое воздействие электромагнит-

ных колебаний СВЧ - диапазона. Авторами [32, 111] отмечается резкое уменьшение активности микроорганизмов после обработки (P=300 Вт, $E_{y(a/2)}$=187 В/см, $E_{y(a/3)}$=162 В/см) в течение длительного времени t=5 мин.

Результаты проведенных исследований дают представление о распределении электромагнитных полей и его равномерности по объему. Несмотря на это, при разработке оборудования для тепловой обработки сыпучих материалов, необходимо не только иметь представление о распространении поля, но и обеспечить равномерность нагрева по всему объему зоны обработки. Кроме того, как уже показывалось выше, свойства зернового слоя в значительной степени зависят от множества факторов и для эффективного функционирования оборудования необходима наработка и систематизация большого количества данных по большой номенклатуре культур при изменении их параметров.

Полученные в предыдущих разделах данные и методы их получения могут быть применены при моделировании как зернового слоя, так и установок (зоны СВЧ-конвективного воздействия) для осуществления его обработки в технологических процессах.

В настоящее время при разработке нового оборудования, в том числе для тепловой обработки сельскохозяйственной продукции с применением электрофизических факторов все большую популярность приобретает использование программных сред электродинамического моделирования для быстрого прототипирования и оптимизации конструкции по заданным критериям [21, 62, 104, 194].

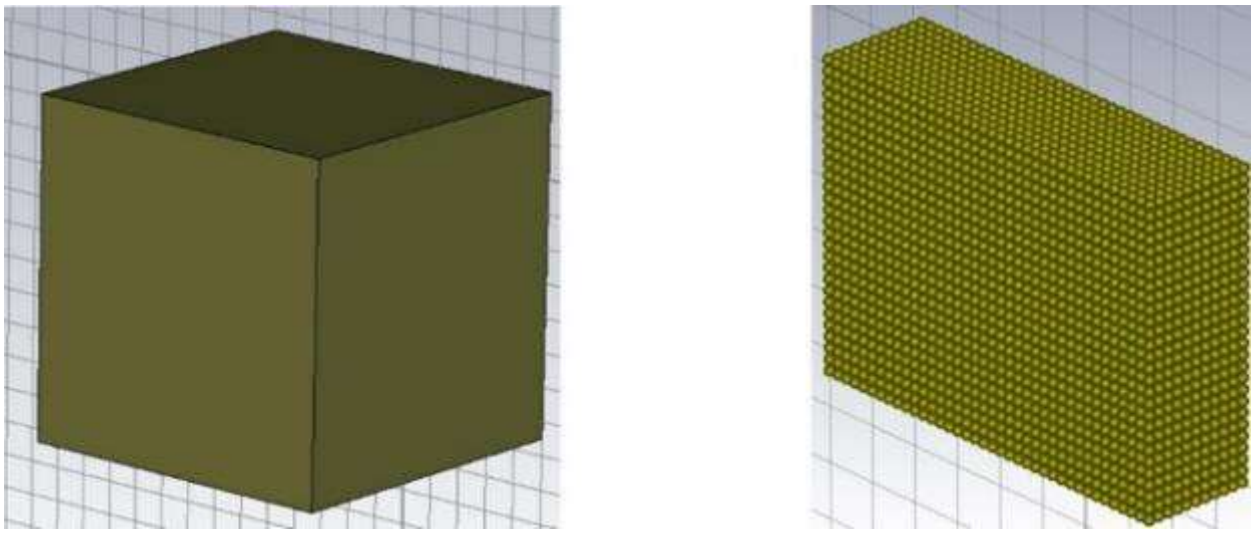
Прежде чем приступить к построению и моделированию зоны, содержащей несколько источников, стоит обратить внимание на представление зернового слоя при моделировании, так как неравномерность формы отдельных зерновок, наличие воздушных промежутков и их объем по отношению к общему объему слоя (порозность) зависят как от культуры, так и от текущей влажности зерна.

3.8.2 Моделирование зернового слоя

В процессе моделирования электромагнитного воздействия с помощью программ численного моделирования трехмерных электромагнитных структур материал, на который воздействует поле, обычно представляется в виде сплошной формы с заданными свойствами, описывающими данный продукт при определенных значениях плотности, влажности и прочих параметров (рисунок 3.44 а). На первом этапе моделирования проводилось именно таким образом и зерновому материалу задавались свойства, полученные учеными ранее [332, 334, 361, 366]. В случае моделирования воздействия поля на такие сельскохозяйственные материалы как зерно, комбикорма и прочие сыпучие материалы возникает некоторое несоответствие свойств отдельных зерновок, составляющих слой и непосредственно массы обрабатываемого материала. Кроме того, в этом случае весьма относительным представляется описание воздушных промежутков и учет порозности слоя [47, 48, 73]. Таким образом, стоит рассмотреть вариант представления слоя в виде объема, полностью заполненного объектами, в виде которых может быть представлен обрабатываемый материал. Так, на втором этапе моделирования, зерно при моделировании и математическом описании может быть заменена шариком эквивалентного диаметра. Объем зернового материала, изображенного таким образом представлен на рисунке 3.44 б.

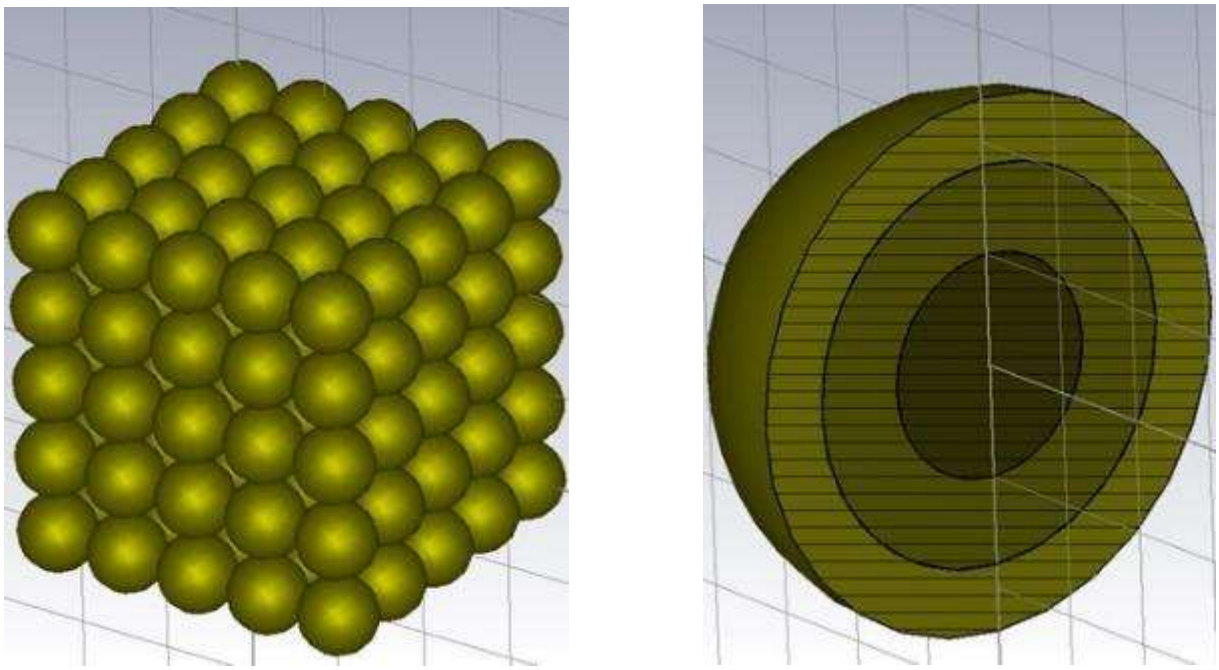
Представление материала безвоздушной областью от части обосновано тем, что при определении диэлектрических свойств производится определение свойств именно зерно-воздушной смеси определенной плотности, именно эти данные и задаются материалу. Помимо этого, материал может быть представлен набором частиц соответствующей формы (рисунок 3.45 а), однако при этом необходимо задавать свойства именно твердой составляющей того или иного сельскохозяйственного материала. Кроме этого, сама частица может рассматриваться как многослойный объект, каждая часть(слой) которой обладает собственными свойствами (рисунок 3.45 б). Это характерно в некоторых случаях для зерновых материалов, обладающих различной влажностью в связи с особенностями строения и характера

обработки. Так, например, при обеззараживании зерна кондиционной влажности с помощью электромагнитного поля требуется его увлажнить, при этом влага будет находиться в капиллярах, представляющих собой наружный слой.



а б

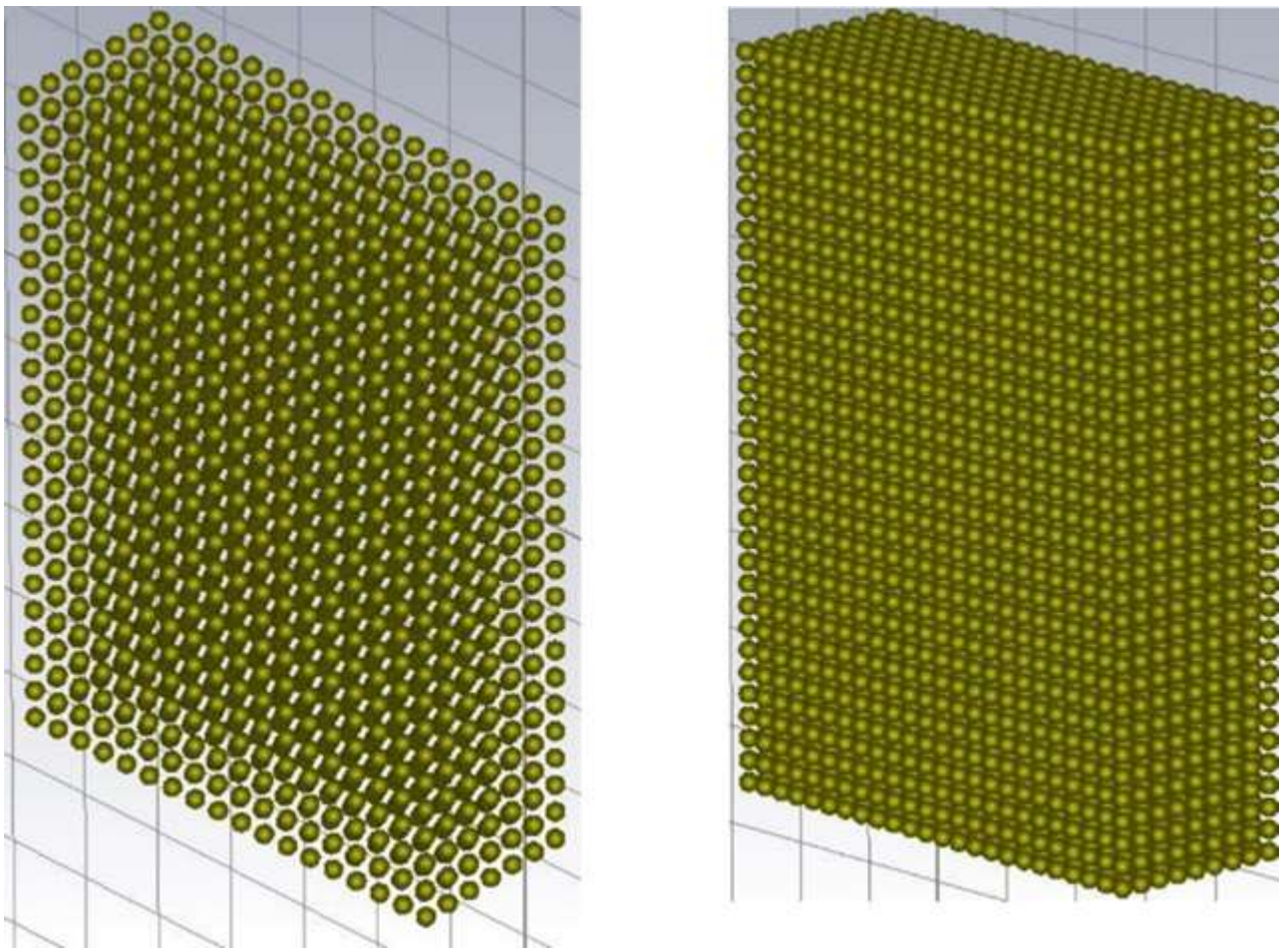
Рисунок 3.44 – Представление зернового слоя: а – в виде сплошной структуры; б – в виде плотного слоя форм замещения



а б

Рисунок 3.45 – Представление зерновки в эквивалентной форме: а – шарообразная, б – шарообразная многослойная

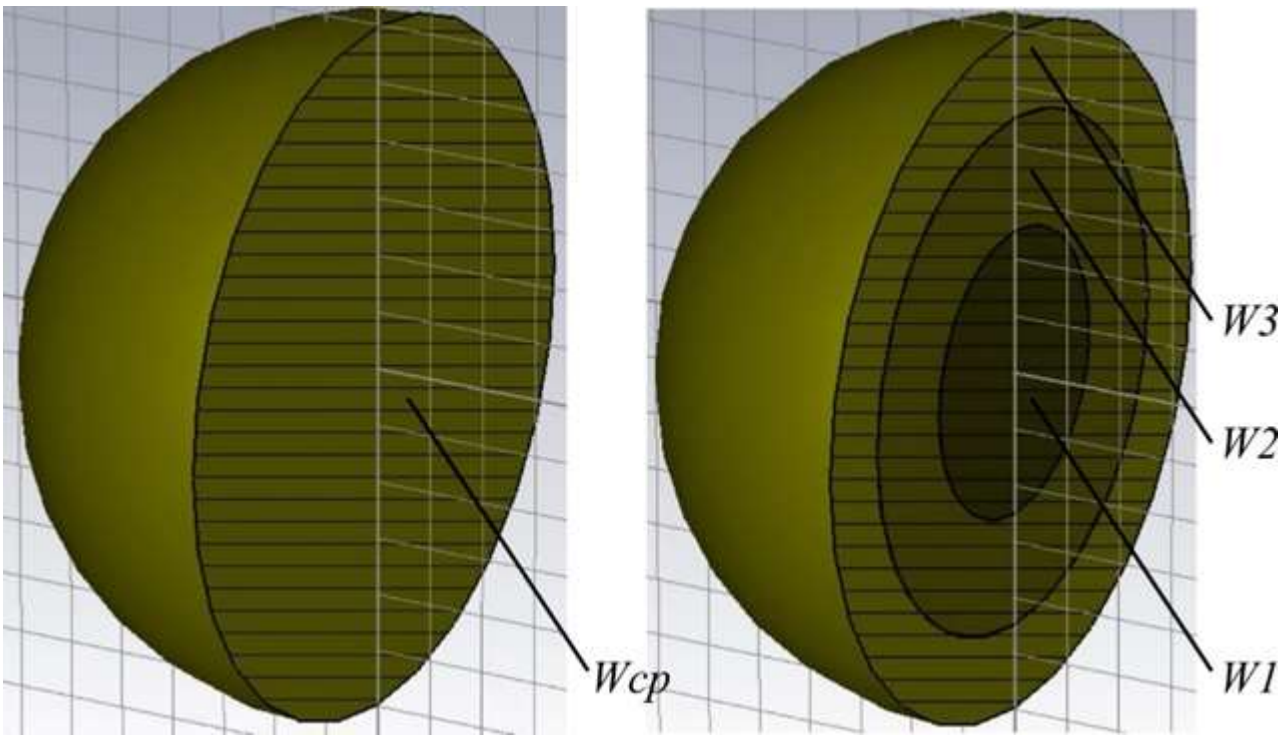
При послеуборочной обработке зерновой слой может находиться при различной плотности (плотный, разрыхленный, псевдоожиженный, вихревой кипящий). Измерение диэлектрических свойств в случаях неплотного слоя существующими способами затруднительно. [238, 330]. Для решения задач моделирования и определения зерновой слой может быть представлен эквивалентным объемом зерна с заданной порозностью, что дает возможность определить распределение электромагнитных полей в слое заданной плотности. На рисунке 3.46 приведен вид зернового материала различной плотности.



а б

Рисунок 3.46 – Представление зернового слоя: а – мягкая пшеница влажностью 16%, при плотности слоя 200 кг/м^3; б – мягкая пшеница влажностью 16%, при плотности слоя 500 кг/м^3

Имея в виду вариант представления слоя в виде набора зерновок, каждая зерновка может быть представлена с учетом неравномерности распределения влаги. На рисунке 3.47 представлен вид зерновки как вариант, учитывающий равномерное распределение влаги (рисунок 3.47 а), а также с учетом изменения влажности от центра зерновки к поверхности (рисунок 3.47 б), что характерно при сушке и обеззараживании зерна с применением электрофизических методов воздействия. При этом приведенная картина в большей степени соответствует процессу сушки, так как для проведения обеззараживания поверхность зерна зачастую специально смачивают, обеспечиваю более высокий уровень влажности на поверхности и в порах, что позволит проводить селективный нагрев в требуемых зонах зерновок.



а б

Рисунок 3.47 – Представление зерновки: а – с учетом равномерной влажности, *Wcp*; б – с учетом изменения влажности от центра к поверхности зерновки, *W1*>*W2*>*W3*

При моделировании свойства зерновых культур брались из различных источников [47, 48, 245, 330, 366, 368] и экспериментальных данных [73-75].

Моделирование [67, 69, 83, 90, 286], проведенное при представлении зернового слоя в виде набора зерновок, показало существенное увеличение затрачиваемого машинного времени, требуемого для получения результатов. Представление же зерновок с учетом неравномерности влажности по слоям внутри зерновки вовсе привело к необходимости существенного снижения количества слоев зерновок при моделировании.

Результаты моделирования распространения напряженности электромагнитного поля в пшенице влажностью 16% при трех различных уровнях плотности материала представлены на рисунке 3.48.

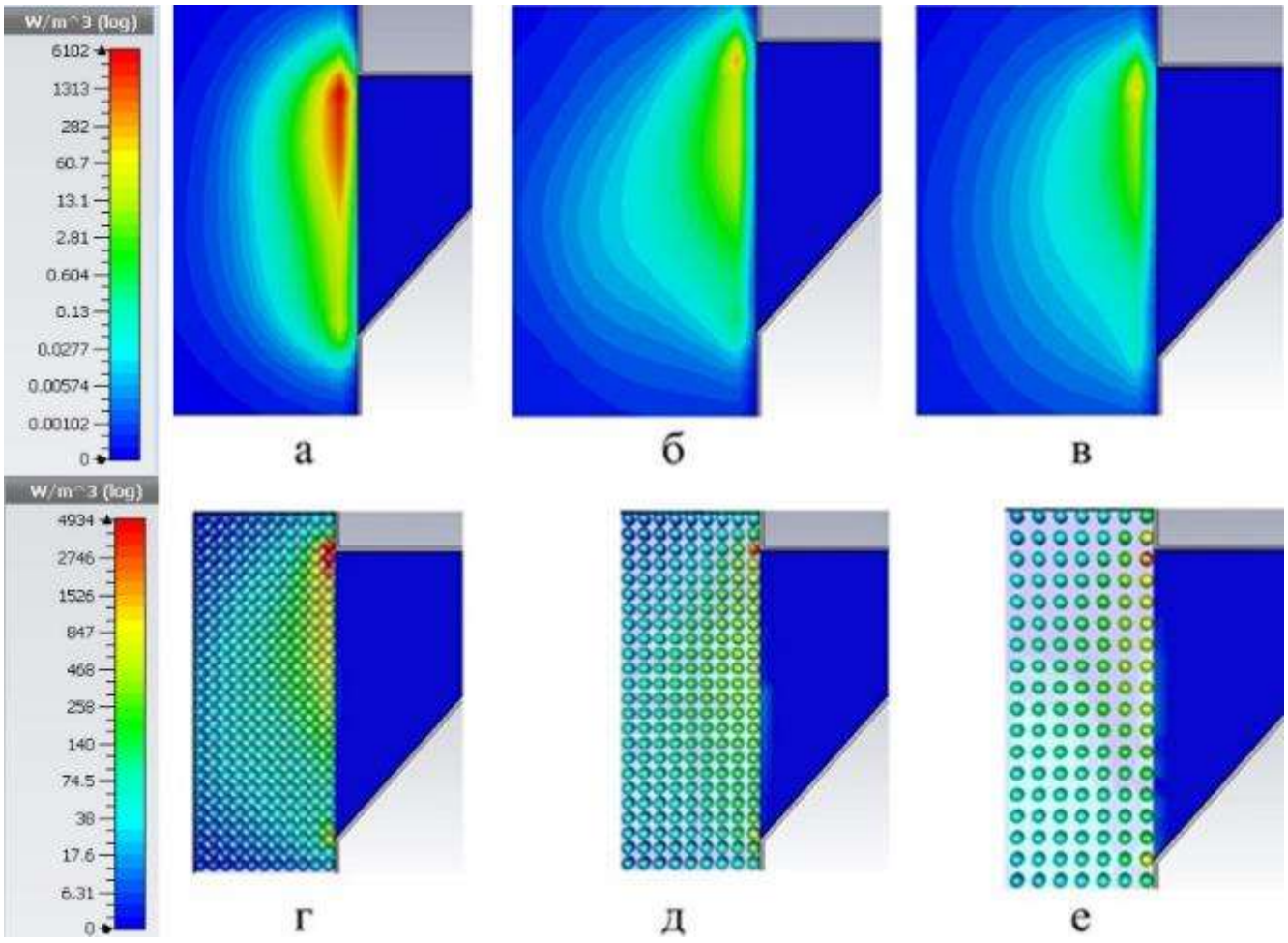


Рисунок 3.48 – Результаты моделирования распространения напряженности ЭМП: а-в – в виде сплошного слоя; г-е – в виде совокупности шарообразных зерновок

Приведенная в данном случае картина распространения электромагнитного поля в слое диэлектрика характеризуется потерями (выделением мощности) по мере распространения волны. Судя по результатам моделирования характер распределения электромагнитного поля указанных вариантов представления зернового слоя совпадает, что позволяет говорить о возможности дальнейшей замены представления в виде эквивалентных форм на сплошную. Это позволит существенно сократить требуемое на расчеты машинное время. Некоторые отклонения в численных значениях по сравнению с экспериментальными данными обусловлены отсутствием учета влияния переотражения волны с поверхности материала, неточностью данных о диэлектрических свойствах материалов. Из картины распространения ЭМП также следует, что может быть учтена избирательность нагрева, отмечаемая многими авторами [27, 60, 234, 244, 278, 239, 329, 350], характерная для областей с более высокой, относительно остального объема материала влажностью (более высокими показателями диэлектрических потерь).

Как указывалось ранее, моделирование выполняется для источника мощностью 1 Вт и далее может быть приведено к реальным мощностям источника. Среднее отклонение численных значений выделяемой мощности в объеме, ограниченном площадью раструба волновода и глубиной проникновения поля при текущей влажности, составило 15,4%. При этом несколько большими значениями характеризуется представление материала в виде сплошной формы. Картина распространения поля при этом не изменяется. Сопоставив результаты моделирования с экспериментальными данными можно получить коэффициент приведения.

Некоторым ограничением выступает отсутствие достаточного объема существующих в настоящее время данных о диэлектрических свойствах материалов, однако работы в этом направлении успешно ведутся как за рубежом, так и в нашей стране.

3.8.3 Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с несколькими источниками СВЧ мощности, работающими одновременно

Наличие дешевых источников малой мощности, работающих на частоте 2,45 ГГц, приводит к расширению исследований, как в нашей стране, так и за рубежом, направленных на создание конструкций с их применением при разработке линий поточной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции.

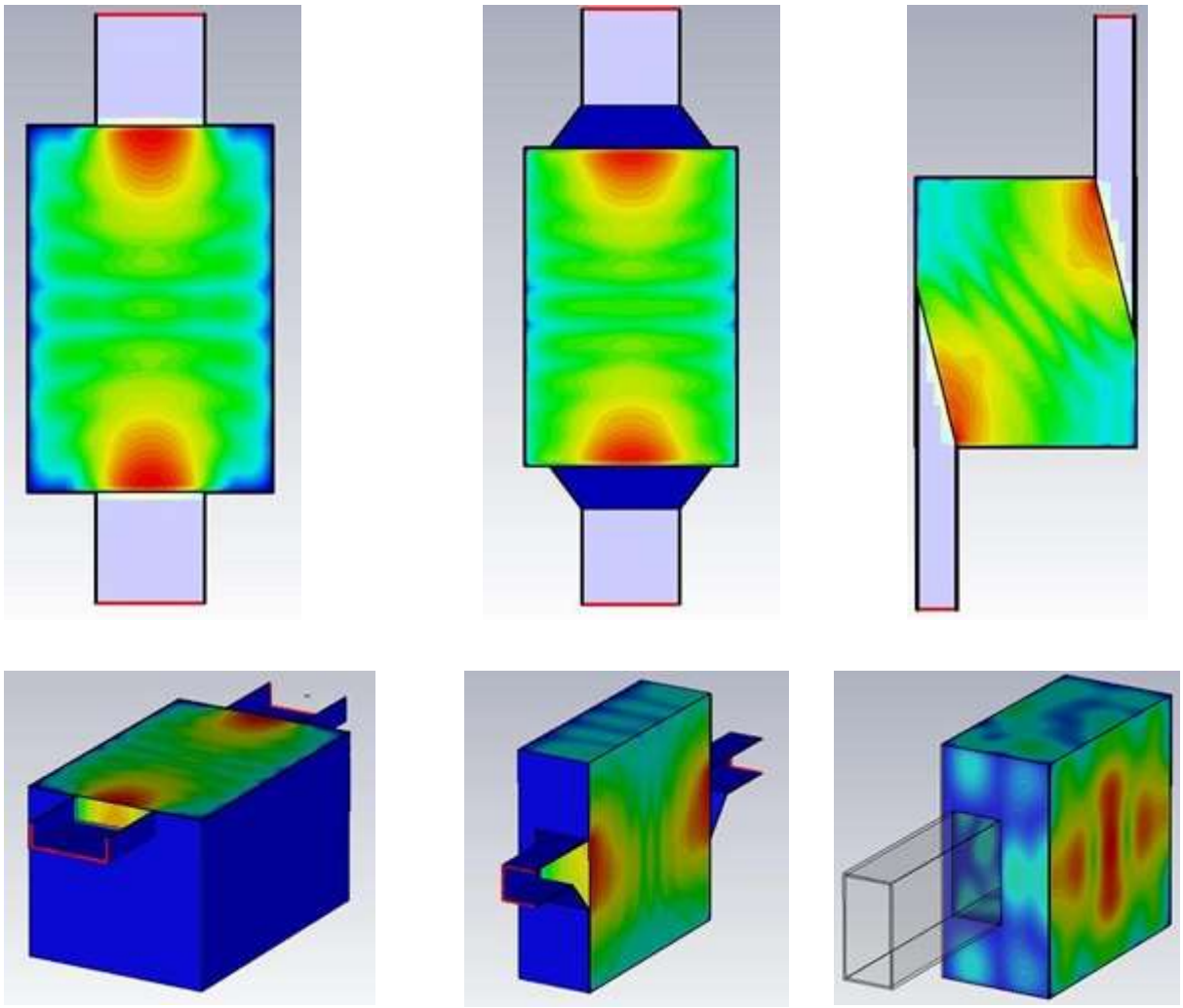
Не смотря на очевидные преимущества диэлектрического нагрева, применение его в промышленных установках ограничивается рядом объективных факторов. Многочисленные отчеты исследователей свидетельствуют о возможности создания энергоэффективных установок с применением микроволновых источников, однако большинство этих исследований выполнено в лабораторных условиях для малых партий и тонких слоев материала, что исключает возможность их масштабируемости для применения в коммерческих целях.

Для разработки промышленного оборудования необходима разработка масштабируемых моделей, предполагающих применение нескольких источников мощности, работающих одновременно.

3.8.3.1 Моделирование СВЧ зоны, содержащей 2 источника ЭМП

При моделировании зоны СВЧ-воздействия, содержащей 2 источника, моделирование проводилось для трех видов волноводов. Моделирование проводилось с учетом существующих в настоящий момент данных, характеризующих диэлектрические свойства зерновых материалов, которые предполагается обрабатывать. Пример результатов моделирования представлен на рисунке 3.49. По результатам моделирования видно, что вариант с волноводами прямоугольного сечения (рисунок 3.49 а) характеризуется наиболее симметричным распределением поля от одного источника, однако в нашем случае камера СВЧ-обработки полностью заполнена материалом, что приведет к отражению части падающей волны, которая, в свою очередь, может привести к выходу источника из строя. В случае применения моди-

фицированной формы волновода (рисунок 3.49 б) снижается риск выхода источника из строя, однако характеризуется существенной неравномерностью электромагнитного поля.



а б в

Рисунок 3.49 – Результаты моделирования зоны СВЧ воздействия, содержащей 2 источника СВЧ мощности: а – прямоугольный волновод; б – рупорный волновод; в –волновод со скошенным выходом

Для обеспечения равномерного протекания технологического процесса сушки по всему объему зоны СВЧ-конвективной обработки необходимо обеспечить не только равномерное прохождение агента сушки, но и тепловое поле посредством СВЧ нагрева. Это поле обеспечивает положительный температурный

градиент и способствует перемещению влаги из внутренних слоев зерновки на поверхность для дальнейшего удаления агентом сушки. Наиболее равномерного распределения поля по зоне воздействия можно добиться в случае, приведенном на рисунке 3.49 в. При этом расстояние между источниками целесообразно принимать из расчета 2-3 глубины проникновения поля в материал. Также следует иметь в виду что универсальность разрабатываемой установки, характеризующаяся различными обрабатываемыми культурами, может привести к снижению эффективности обработки некоторых материалов. Это связано с различным уровнем кондиционной влажности культур, а, следовательно, и существенным различием их диэлектрических характеристик.

Указанные исполнения участка продуктопровода можно рассматривать как минимальные исходные модули из которых набираются модули и установки СВЧ-микроволновой обработки с требуемыми характеристиками. Однако для определения их взаимного влияния рассмотрим распространение поля от большего количества источников.

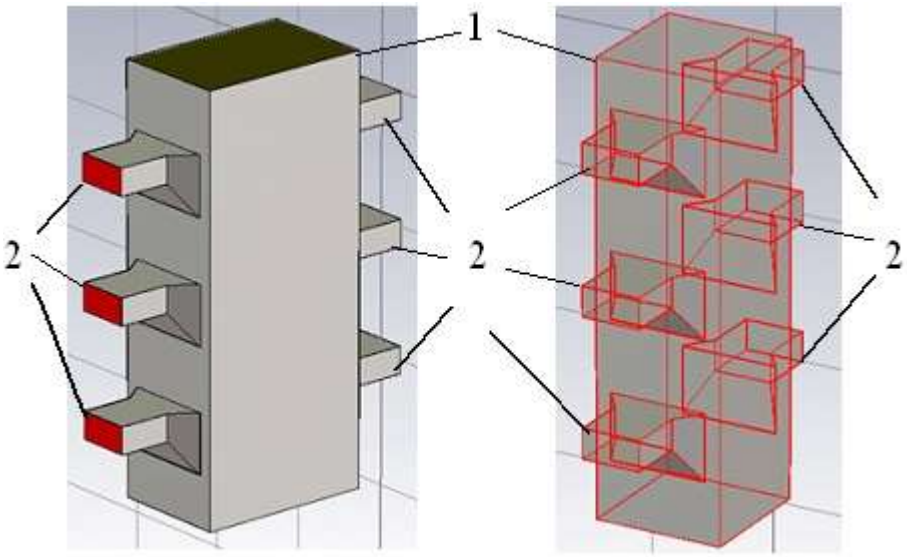
3.8.3.2 Моделирование зоны СВЧ воздействия

На основании проведенных ранее исследований [51, 89, 87, 106, 119, 117, 121, 131, 135] был разработана модульная конструкция зоны СВЧ-конвективного воздействия (рисунок 3.50). Трехмерная модель указанного модуля, выполненная в CST Microwave studio для дальнейшего моделирования и представляющая собой продуктопровод с волноводами, по которым происходит передача СВЧ мощности к материалу представлена на рисунке 3.51.

В данной модели модуль состоит из шести попарно – встречно включенных магнетронов, расположенных на трёх уровнях [63, 64, 66]. В процессе моделирования сечение продуктопровода изменялось для того, чтобы рассмотреть возможность применения модулей СВЧ обработки к различным материалам и распространение ЭМП в них.



Рисунок 3.50 – Модуль СВЧ-конвективного воздействия



1 – зона СВЧ – обработки; 2 – источники СВЧ с волноводами.

Рисунок 3.51 – Трехмерная модель зоны СВЧ воздействия

Такая модель позволяет определить распределение поля по высоте СВЧ – конвективной зоны в зависимости от формы волновода, размера самой зоны. В реальных СВЧ – конвективных установках их производительность увеличивается за счёт последовательного размещения зон и увеличения количества магнетронов в ряду. Геометрические размеры зоны СВЧ обработки обуславливаются требуемой глубиной проникновения электромагнитной волны в обрабатываемый материал, которая, в свою очередь, зависит от диэлектрических свойств материала. При этом следует учитывать, что по мере высыхания глубина проникновения в зерновой слой увеличивается.

Как указывалось, для обеспечения предотвращения повреждения излучающего оборудования отраженной частью волны от материала могут быть предприняты несколько вариантов, такие как разработка определенной формы излучающего волновода, согласование камеры обработки с источниками, согласование нагрузки (резонаторная камера). Расчет продуктопровода в качестве резонаторной камеры в таком случае возможен, однако так как в процессе тепловой обработки микроволновым полем происходит интенсивный тепло-влагоперенос, нельзя добиться устойчивого коэффициента стоячей волны (КСВН) и масштабируемых моделей. Это связано с изменением диэлектрических параметров обрабатываемого материала и образованию насыщенного влагой воздуха в зоне обработки. Еще одним негативным фактором таких камер является отражение воздействующей волны от влаги, насыщающей воздух. Это может привести к повреждению источника СВЧ мощности.

На рисунке 3.52 представлены результаты моделирования распространения ЭМП поля (рассеиваемая мощность, определяющая нагрев) в зерне пшеницы влажностью 14% при воздействии СВЧ поля частотой 2,45 ГГц в продуктопроводе сечением 200×200 мм. На данном рисунке приведены результаты моделирования от отдельных источников (действующий источник выделен красным цветом) без учета общей картины ЭМП в объеме продуктопровода. Так как уровень влажности в 14% для пшеницы является кондиционным и зерно при нем обладает низким

уровнем коэффициента диэлектрических потерь, то электромагнитная волна распространяется на достаточно большое расстояние и, в случае влажности существенно ниже кондиционной, возможно отражение от противоположной стенки продуктопровода.

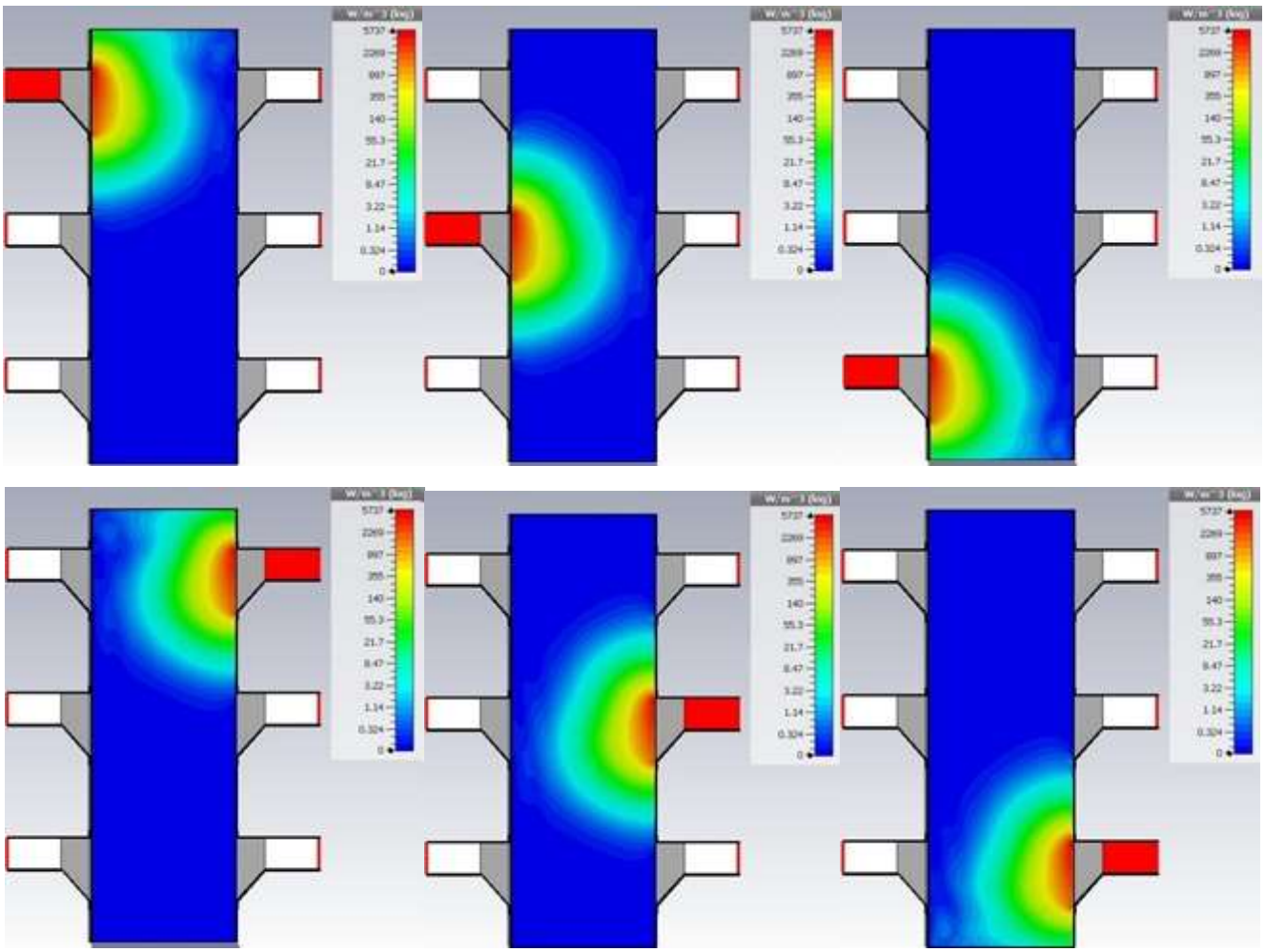
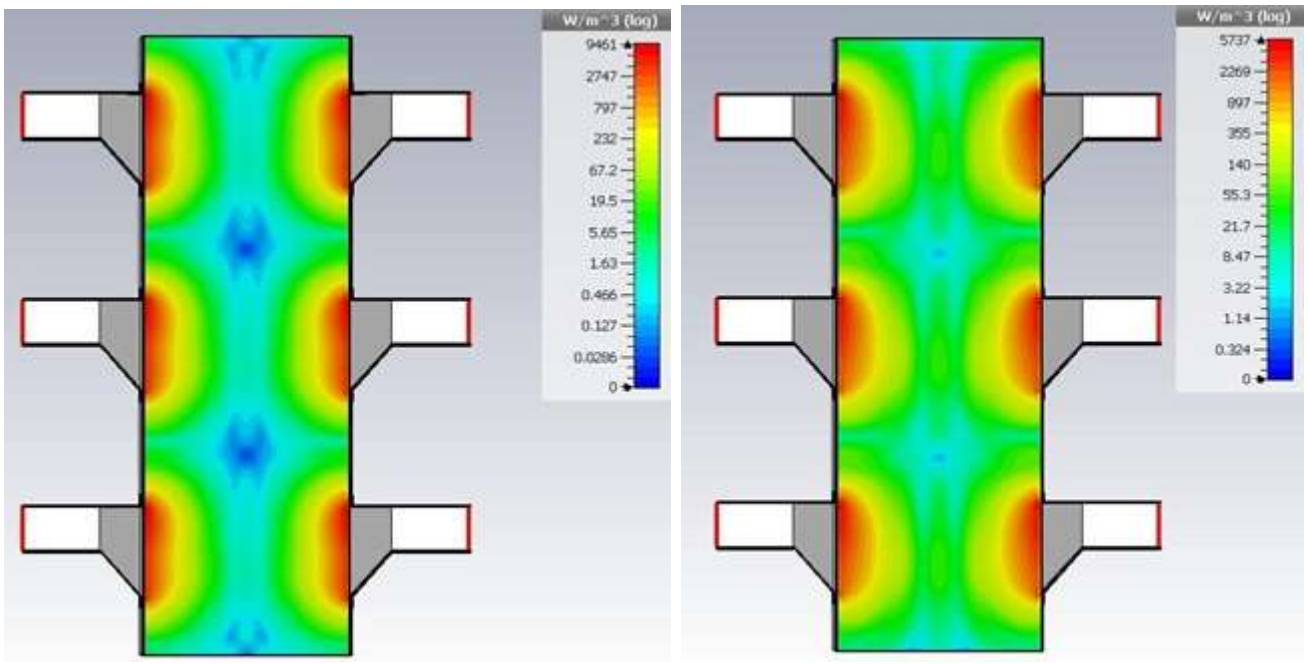


Рисунок 3.52 – Выделение мощности в пшенице при W=14%, f=2450 МГц

Следует учитывать, что данная картина характерна для окончания процесса сушки и практически не характеризует процесс сушки. В реальности зерно в сушильную камеру поступает с уровнем начальной влажности 20-25%, обладая при этом более высоким уровнем диэлектрических потерь и картина поля несколько меняется.

Так на рисунке 3.53 представлена суммарная картина распространения ЭМП от 6 источников для пшеницы двух уровней влажности.



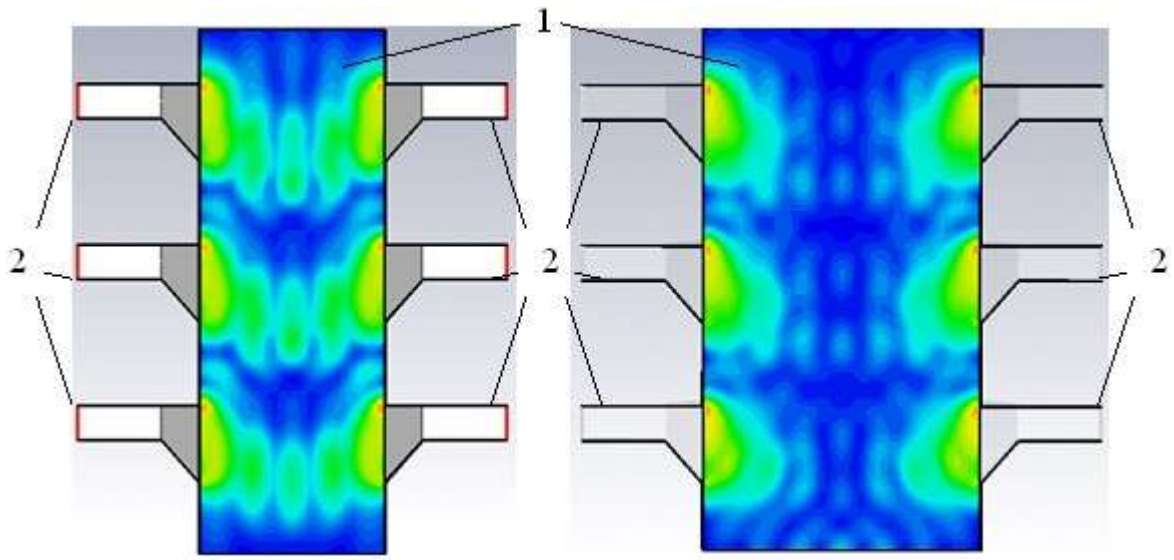
а б

Рисунок 3.53 – Выделение мощности в пшенице при *f*=2450 МГц:
а – *W*=26%, б – *W*=14%.

Из результатов моделирования видно, что в материале с более высоким уровнем влажности материала на выходе волноводов появляются зоны с высоким уровнем рассеиваемой мощности, при этом удаленные слои (ближе к центру продуктопровода) не подвергаются воздействию и выделение тепловой энергии за счет микроволнового поля в них не происходит (рисунок 3.53 а). По мере достижения материалом кондиционной влажности зерна глубина проникновения существенно увеличивается равномерность распространения микроволнового поля по объему материала увеличивается, позволяя вести нагрев всего объема материала. При этом стоит учитывать, что по мере сушки материала интенсивность нагрева снижается, что следует учитывать при разработке конструкции и режимов работы конечного оборудования. Исходя из результатов моделирования можно судить о диапазоне влажностей, для которых обработка будет происходить при более равномерном распространении ЭМП, а, следовательно, и более равномерном распространении тепловых потерь в материале. Для приведенной зоны при обработке зерна пшеницы, ячменя, тритикале, овса этот диапазон будет составлять 14-17%.

В тех случаях, когда необходима обработка материала в большем диапазоне влажности или необходимо увеличить скорость протекания зернового потока через продуктопровод, нужно рассмотреть другие варианты размеров сечения продуктопровода. Так на рисунке 3.54 приведены результаты сравнительного моделирования распространения электромагнитного поля в слое ячменя влажностью 15,2 % для двух вариантов сечения продуктопровода.

Результаты моделирования воздействия электромагнитного поля от 6 источников СВЧ на зерновой слой при условии сечения продуктопровода, полностью заполненного материалом, 200×200 мм и 200×300 мм приведены на рисунке 3.54 [63, 64, 66].



а б

1 – продуктопровод (зона СВЧ – обработки);

2 – источники СВЧ с волноводами

Рисунок 3.54 – Результаты моделирования для ячменя *W*=15,2%: а – сечение зоны воздействия 200×200 мм; б – сечение зоны 200×300 мм

По результатам моделирования явно виден волновой характер распространения электромагнитной волны при моделировании, что сглаживается в случае моделирования рассеиваемой в материале энергии микроволнового поля. В приведенном примере видно, что в обоих случаях происходит проникновение ЭМП на всю

глубину материала, однако для случая б выделяемая в центральной части продуктопровода энергия значительно ниже пристеночных слоев и эффективность применения поля будет существенно снижена. В примере, приведенном на рисунке 5.13 а равномерность распространения ЭМП значительно выше, что позволяет избежать необходимости применения конструктивных решения, позволяющих повышать равномерность нагрева, таких, как например устройство перемешивания зернового слоя на переходе между модулями (уровнями) электромагнитной обработки. Однако в центральной части продуктопровода может быть спроектирован и реализован воздуховод, обеспечивающий подвод либо отвод агента сушки и позволяющий реализовывать режимы комбинированной СВЧ-конвективной обработки.

Чтобы понять, как выглядит картина распространения ЭМП не только в вертикальном, но и в горизонтальном сечении, на рисунке 3.55 приведен вид сверху на распространение микроволнового поля в зерновом слое от двух встречно включенных магнетронов. На рисунке представлено сечение СВЧ – активной зоны по уровню горизонтальной оси магнетронов для продуктопровод сечением 200×300 мм.

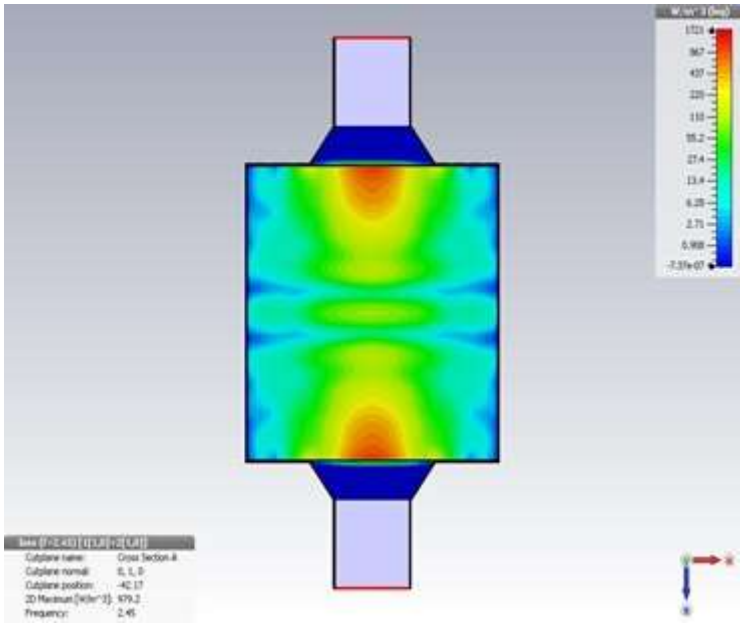


Рисунок 3.55 – Распределение микроволнового поля в зерновом слое от двух магнетронов включенных встречно

Из картины распространения ЭМП в поперечном сечении видим, что, с точки зрения нагрева, проблемными остаются угловые зоны.

Помимо приведенной конструкции, при котором источники СВЧ-мощности расположены только встречно друг другу, рассматривались варианты, в которых горизонтально в ряд расположено несколько источников СВЧ поля. Экспериментальное исследование такой конструкции проводилось раньше [51] и показало эффективность ее применения.

Результат моделирования распространения электромагнитного поля в слое зерна для 4 источников СВЧ мощности, расположенных на одном уровне попарно встречно друг другу приведен на рисунке 3.56. Данные результаты представляют собой картину распространения микроволнового поля от рядом расположенных магнетронов, что важно при проектировании конструкции СВЧ – конвективной зоны.

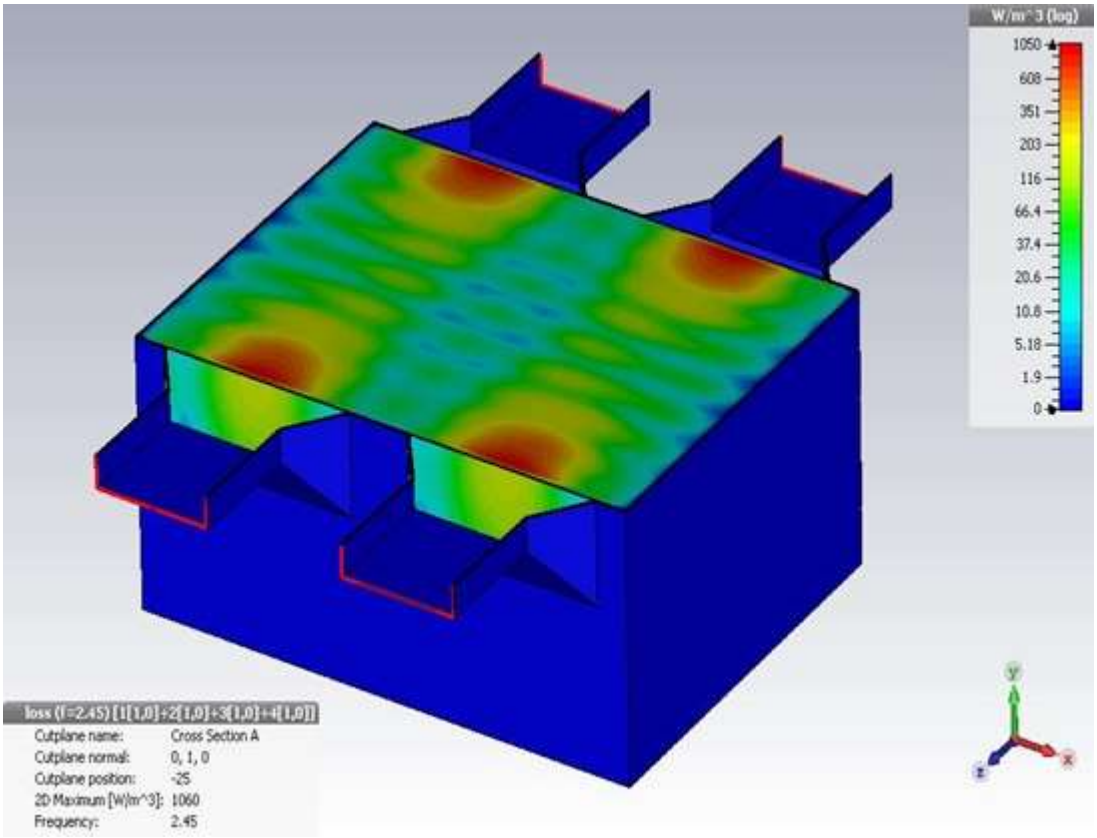


Рисунок 3.56 – Распространение поля СВЧ в зерновом слое от группы магнетронов

Результаты моделирования показывают, что при таком расположении магнетронов сохраняется неравномерность распределения микроволнового поля в зерновом слое, однако снижается общая площадь зон, в которых уровень поля минимален.

Одним из вариантов снижения неравномерности распространения микроволнового поля может быть разработанная конструкция с круговым размещением магнетронов [113, 354]. На рисунке 3.57 представлен вид сверху такой СВЧ – конвективной зоны. В корпусе 1 расположен восьмигранник 2, на гранях которого смонтированы магнетроны 3 с волноводами. Внутри многогранника расположена перфорированная труба 4. Между перфорированной трубой и многогранником располагается зона 5, в которой самотёком, сверху вниз, движется зерно. Воздух для обдува блоков питания подают через каналы 7. Отводится тёплый воздух через вытяжные каналы 8 и внутреннее пространство 9 перфорированной трубы 4.

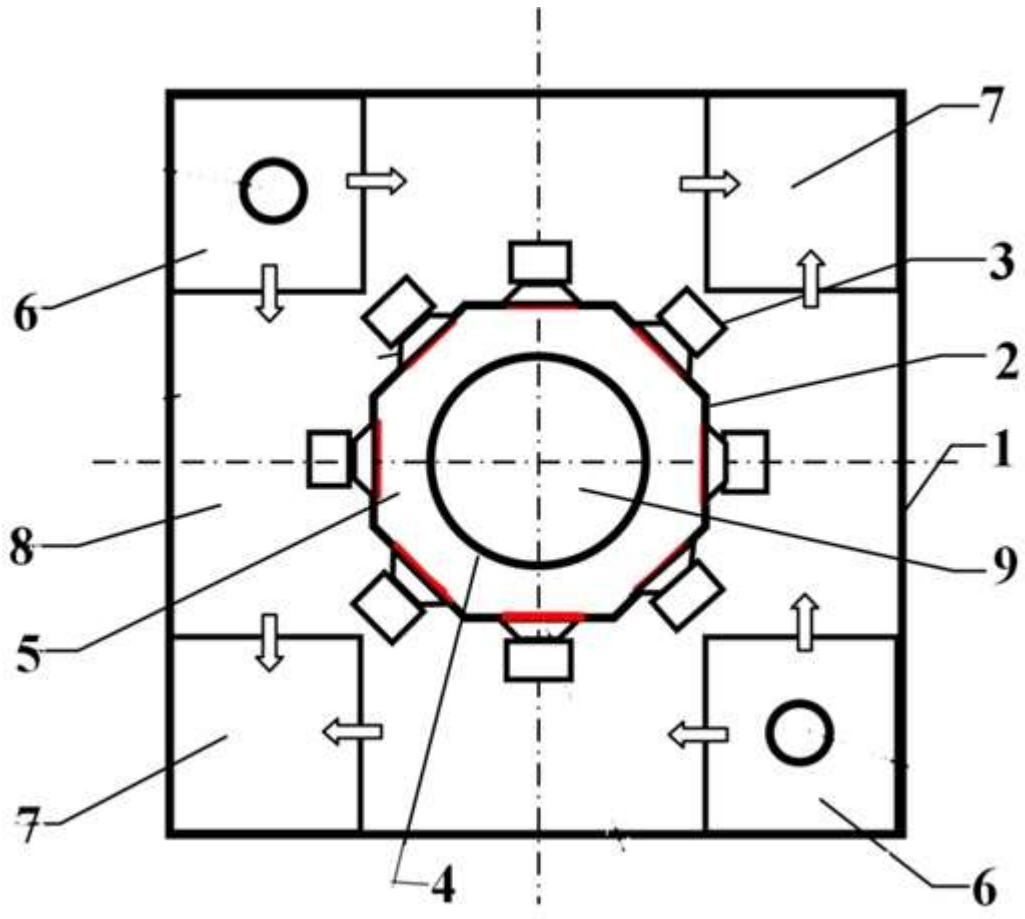


Рисунок 3.57 – СВЧ – конвективная зона с круговым размещением магнетронов

Моделирование распределения поля СВЧ в зерновом слое при таком исполнении зоны СВЧ-обработки осуществлялось для шести магнетронов, расположенных по кругу. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.58.

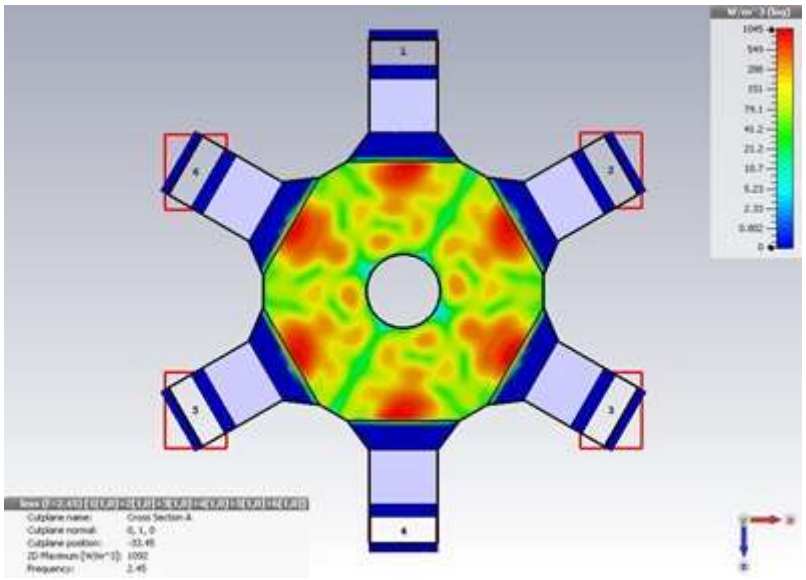
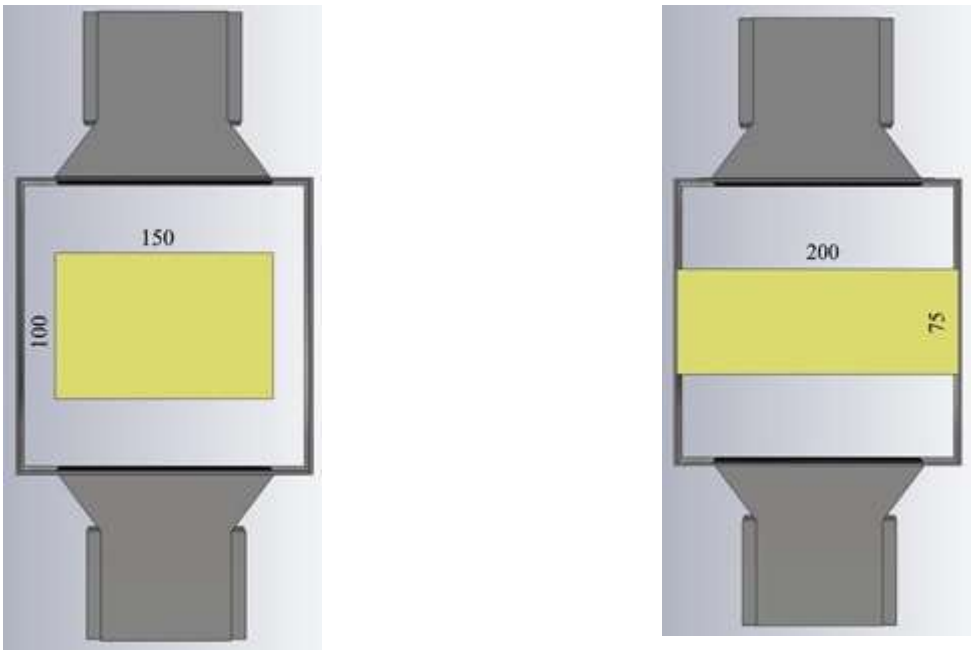


Рисунок 3.58 – Результаты моделирования распределения СВЧ поля в зерновом слое ячменя влажностью 15,2% при круговом размещении шести магнетронов

Результаты моделирования показывают, что при данном варианте размещения магнетронов обеспечивается большая равномерность распределения микроволнового поля в зерне. Однако, зоны между магнетронами менее подвержены воздействию поля. Есть ещё одна особенность, которая снижает эффективность такой конструкции. Центральный воздуховод подвергается воздействию поля, что вызывает его подогрев. Поскольку данный воздуховод работает на отвод воздуха из СВЧ активной зоны, то отводящийся воздух подогревается в воздуховоде уже после того, как он прошёл через зерновой слой. Воздух, из-за подогрева, повышает свой влагопоглощающий потенциал, который не используется. Кроме того, такая конструкция СВЧ активной зоны создаёт дополнительное сопротивление воздушному потоку, подаваемому в зерновой слой, что не способствует его равномерному распределению по зоне [113, 354].

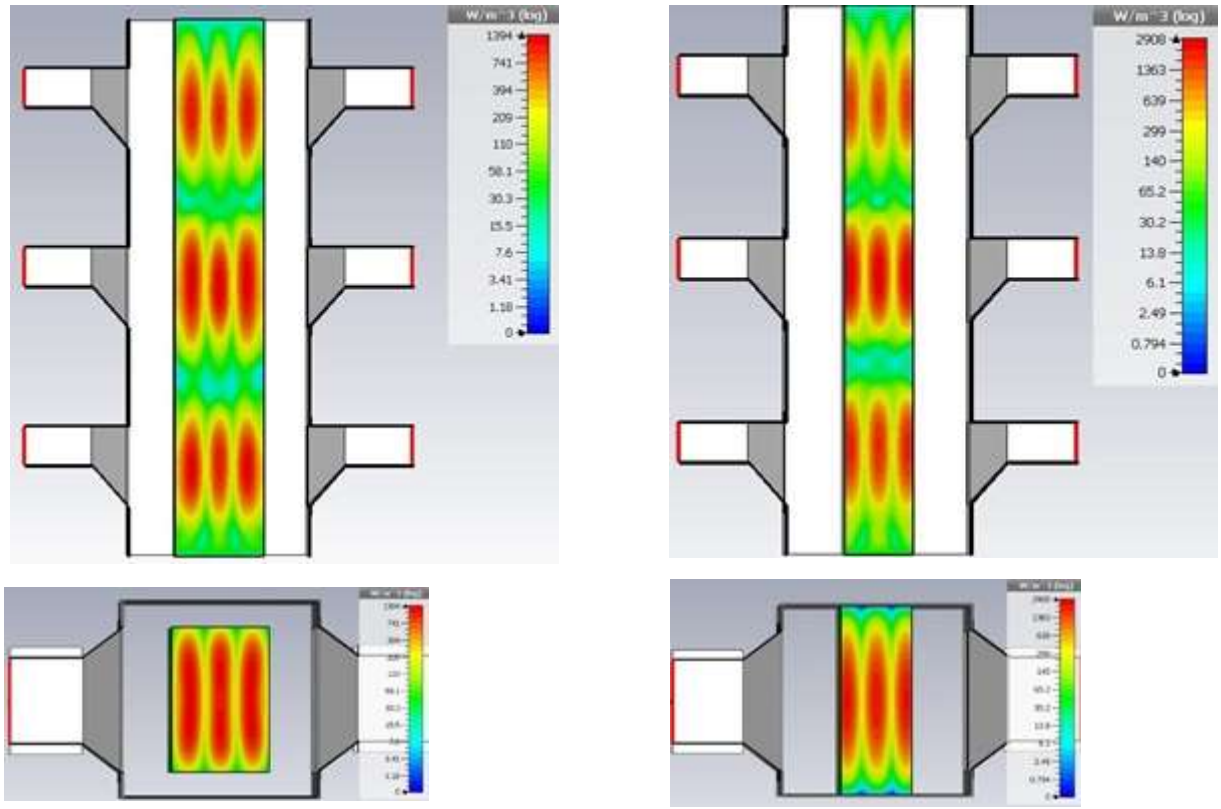
Ранее представленные результаты моделирования показывают, что при расстоянии между магнетронами 200 мм наблюдается прогрев слоя зерна на всю толщину, при толщине слоя 300 мм в его центральную часть поле проникает очень слабо. Поэтому было проведено моделирование распределения микроволнового поля в зерновом слое, частично заполняющем продуктопровод [113, 354]. В этом случае объем моделируемого зернового слоя (продуктопровод) составляет 30% от объема зоны СВЧ обработки. Моделирование проводилось для двух вариантов исполнения продуктопровода, в котором производится обработка: 150х100 мм и 75х200 мм (рисунок 3.59).



а) б)

Рисунок 3.59 – Вид сверху на СВЧ зону с продуктопроводом: а) – 150х100 мм, б) 75х200 мм

Результаты моделирования распределения поля СВЧ в зоне для указанных вариантов исполнения продуктопровода представлены на рисунках 3.60 (рассеиваемая мощность) и 3.61 (напряженность поля).

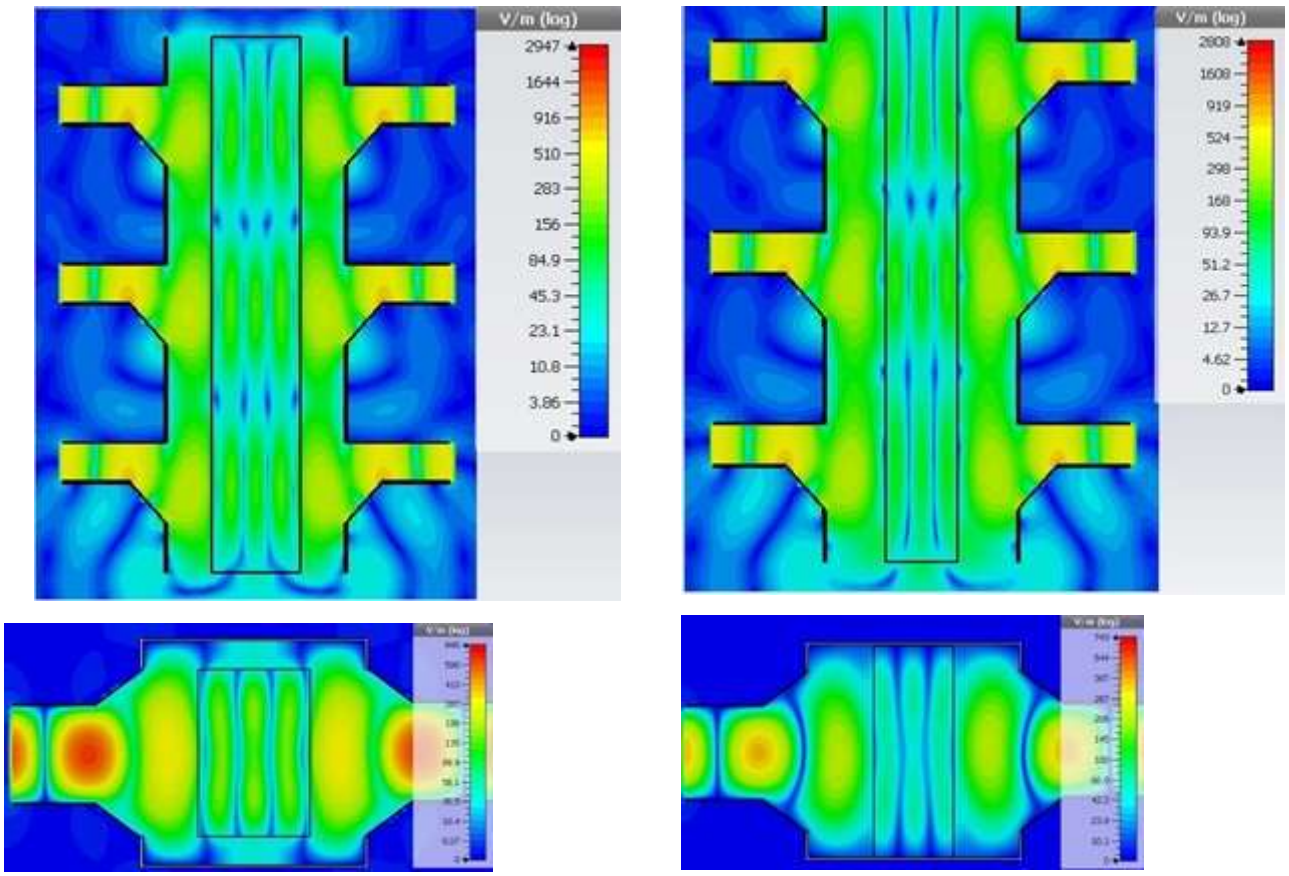


а б

Рисунок 3.60 – Результаты моделирования распределения поля СВЧ (рассеиваемая мощность) в зоне с продуктопроводом заполненным ячменём влажностью 16%. Сечение продуктопровода: а) – 150х100 мм, б) 75х200 мм

Размер продуктопровода и влажность материала существенно влияют и на распределение микроволнового поля в зерновом слое и на величину удельной мощности поля, рассеиваемой в конкретных участках продуктопровода. Из рисунков видно, что конфигурация волновода определяет направление распространения поля СВЧ. В определенной части продуктопровода за счёт ориентации волновода и отражения поля рассеивается большая мощность, чем в других частях продуктопровода. Это говорит о том, что изменением конфигурации волноводов на различных уровнях СВЧ - конвективной зоны, возможно управлять распределением мощности по толщине зернового слоя [113, 354]. Также это говорит о возможности применения различной конфигурации зоны СВЧ-воздействия и применяемых в разных частях установки СВЧ-конвективной обработки, часть из кото-

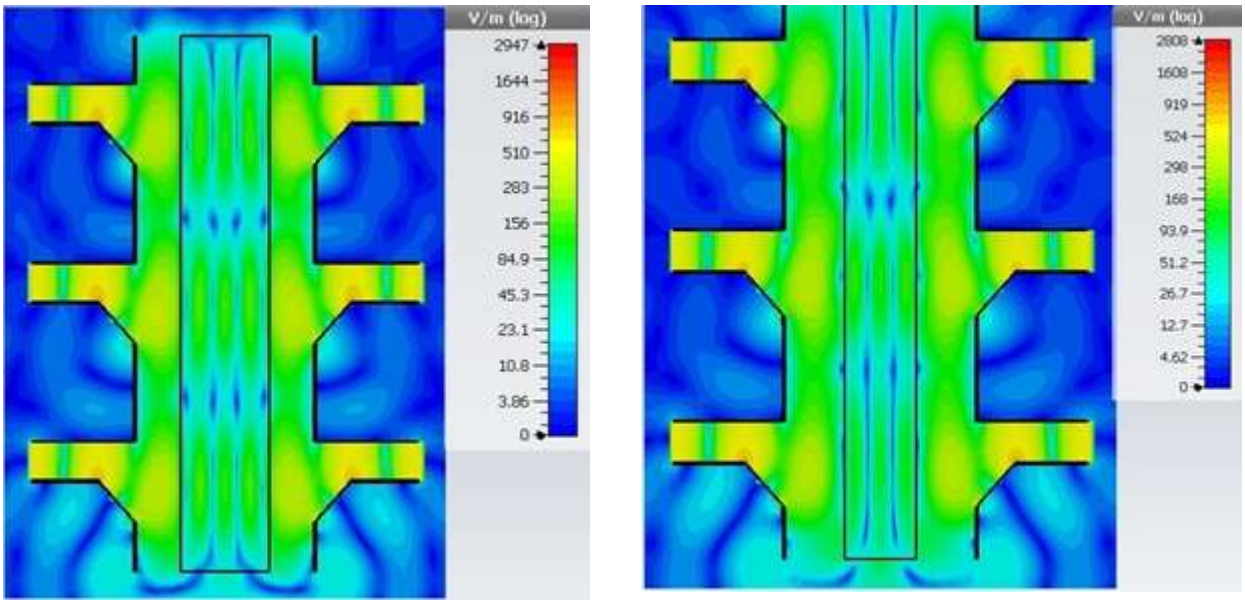
рых может быть предназначена для предварительного подогрева, другая для доведения до требуемой температуры либо поддержания достигнутой температуры для реализации требуемого режима работы.



а б

Рисунок 3.61 – Результаты моделирования распределения поля СВЧ в зоне с продуктопроводом заполненным ячменём влажностью 16%.
Сечение продуктопровода: а) – 150х100 мм, б) 75х200 мм

Чтобы оценить влияние конфигурации волновода на распределение микроволнового поля провели моделирование для тех же данных, что описаны ранее, только распространение поля в зерновой слой осуществлялось от источника поля при различных формах волноводов. Для рупорного волновода (рисунок 3.62) и прямоугольной формы волновода (рисунок 3.63) [113, 354].

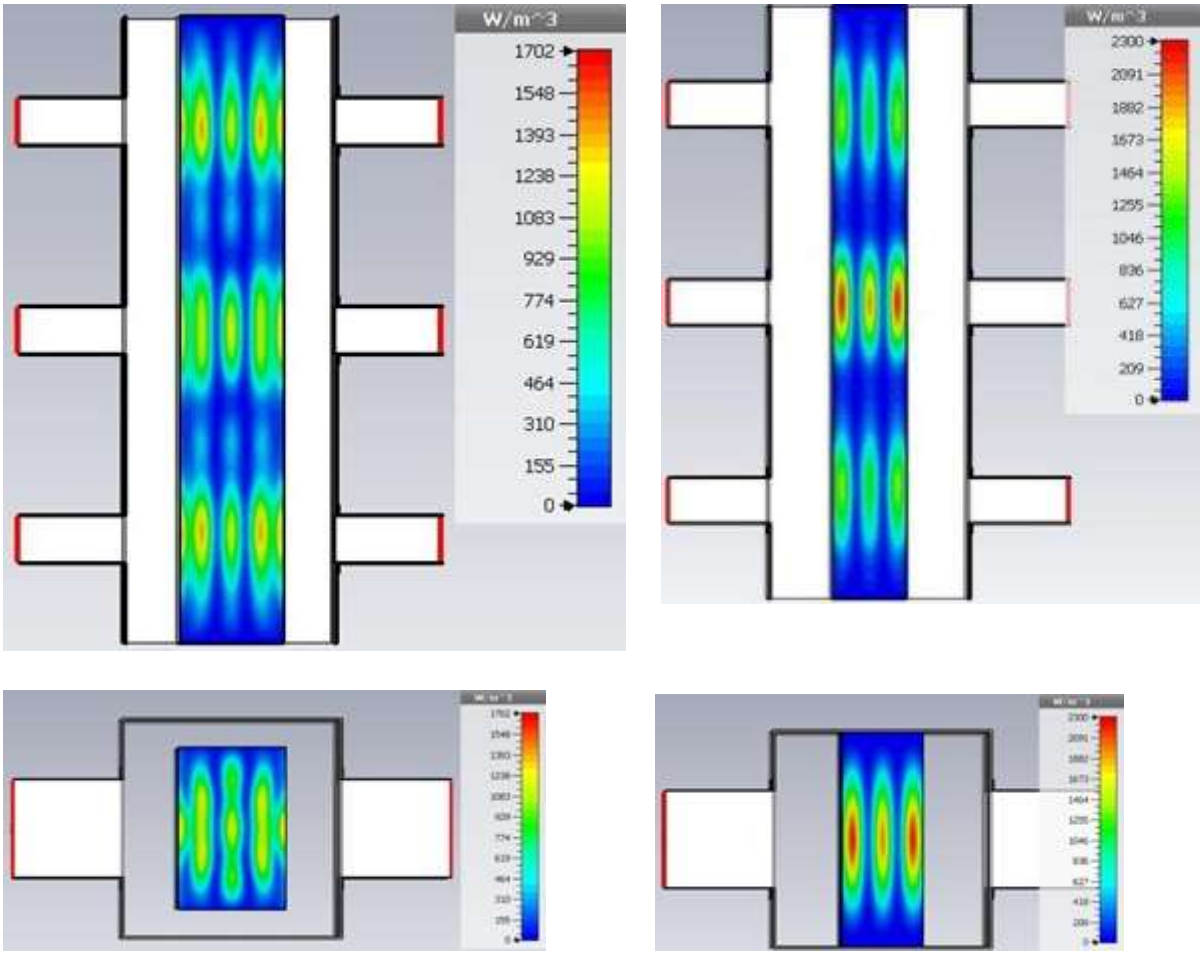


а б

Рисунок 3.62 – Результаты моделирования распределения поля СВЧ в зоне с продуктопроводом заполненным ячменём влажностью 20%.
Сечение продуктопровода а) – 150х100 мм, б) 75х200 мм

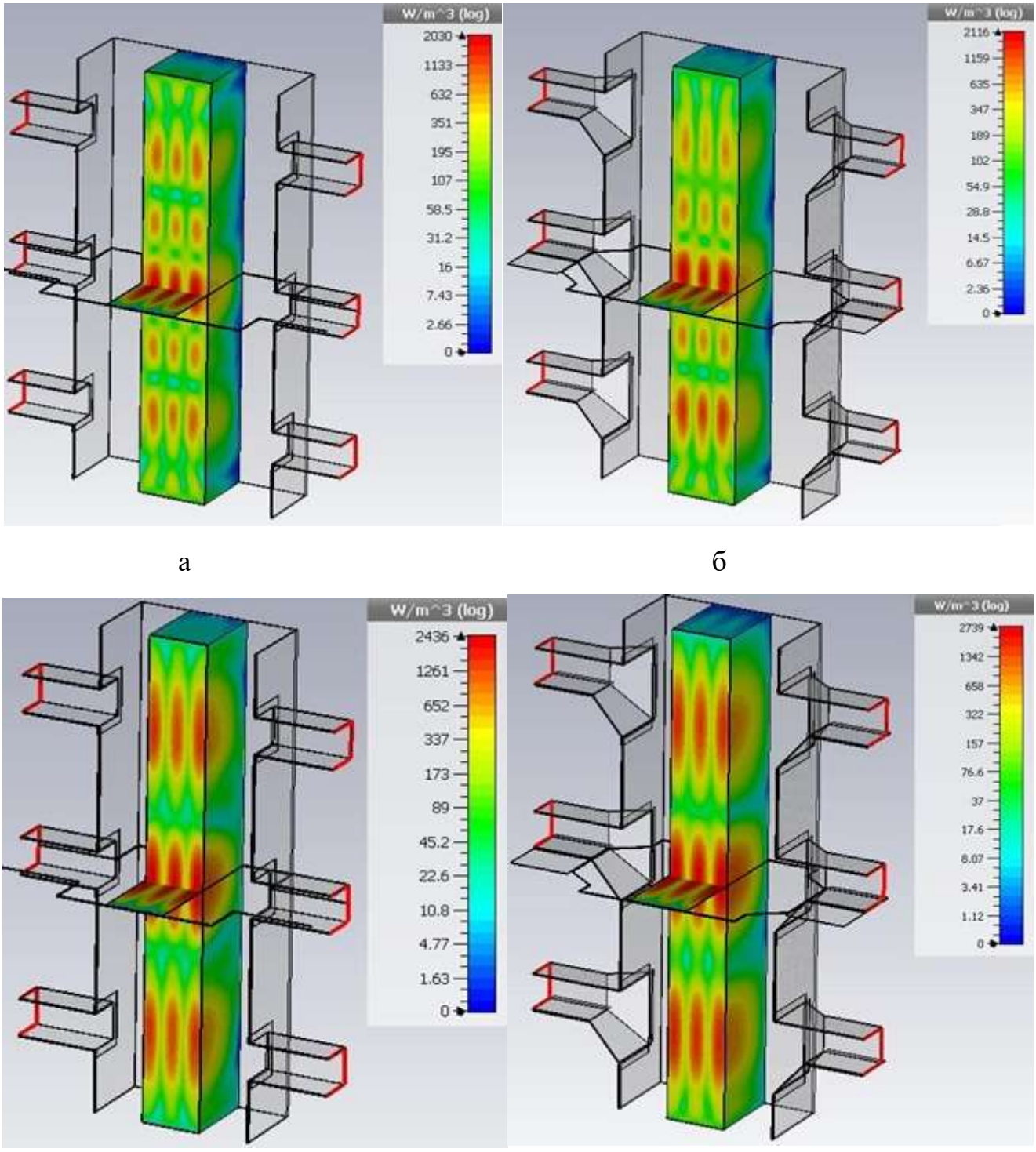
Результаты моделирования позволяют говорить, что при изменении формы волноводов удельная мощность, выделяемая в зерновом слое, распределена более равномерно. Без ярко выраженных «очагов» максимальной мощности. Однако в первом случае величина выделяемой мощности в зерновом слое выше. Применение продуктопровода, занимающего порядка трети объема, позволяет рассматривать зону СВЧ-конвективного воздействия как резонаторную камеру. Несмотря на то, что равномерность распределения электромагнитной волны, как и рассеиваемой мощности в зерновом слое значительно выше других рассматриваемых вариантов, данная конфигурация обладает рядом существенных сложностей. К таким можно отнести перерасход материалов, увеличенный объем зоны СВЧ-конвективной обработки, а также, что значительно существеннее, необходимость согласования резонаторной камеры, источников и обрабатываемого материала. Однако данные конфигурации могут выступить в роли направлений дальнейших исследований и развития разработок.

Таким образом стоит провести предварительное моделирование распространения микроволнового поля для продуктопроводов различного сечения при выьранных выриантах волноводов. На рисунке 3.64 представлены трехмерные проекции моделирования объемного распределения удельной мощности, рассеиваемой в слое обрабатываемого материала: а, б сечение зоны СВЧ-конвективной обработки 300×200 мм, сечение продуктопровода 200×100 мм; в, г сечение зоны СВЧ-конвективной обработки 200×200 мм, сечение продуктопровода 200×75 мм; а, в – прямоугольный волновод; б, г – рупорный волновод.



а б

Рисунок 3.63 – Результаты моделирования распределения поля СВЧ в зоне с продуктопроводом заполненным ячменём влажностью 20% без учета формы волновода. Сечение продуктопровода: а) – 150х100 мм, б) 75х200 мм



а б

в г

Рисунок 3.64 – Трехмерная проекция моделирования удельной мощности, выделяемой в слое ячменя влажностью 20% при площади сечения зоны СВЧ-обработки: а, б – 300×200 мм; в, г – 200×200 мм и площади продуктопровода: а, в – 200×100 мм; б, г – 200×75 мм

Все указанные особенности, такие как форма волноводов, их количество и размещение по объему зоны СВЧ обработки, форма и размер продуктопровода при полном заполнении зерном, форма продуктопровода и коэффициент заполнения зерном объема зоны обработки при неполном заполнении и реализацией в виде резонаторной камеры могут быть учтены при разработке конструкции образца установки СВЧ-конвективной обработки зерновых.

Для оценки результатов моделирования и сравнения их с реальным состоянием необходимо провести эксперимент по исследованию распространения ЭМП в объеме зернового слоя.

3.8.4 Экспериментальное исследование распространения электромагнитного поля в зерновом слое

Экспериментальные исследования проводились по методике, представленной в главе 3. При этом в качестве функции отклика выступала напряженность воздействующего электрического поля. Исследования проводились по объему продуктопровода размерами 200×200×600 мм относительно центральной точки (рисунок 3.65). Шаг по осям координат составил 50 мм. Таким образом, по оси 0X и 0Y значения принимали от -100 до +100; по оси 0Z от -300 до =300.

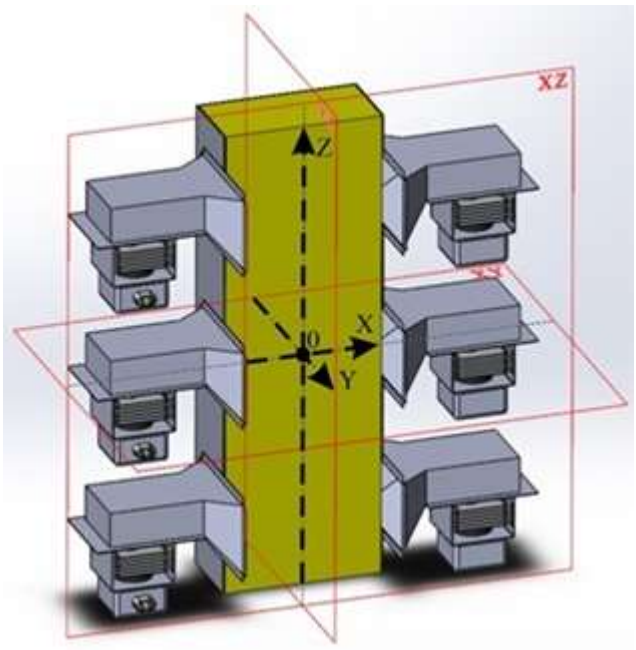


Рисунок 3.65 – Продуктопровод 200×200×600 в разрезе

Эксперимент проводился для пшеницы трех уровней влажности: 14, 20, 26%. При учете того, что даже один эксперимент в указанном случае будет включать 325 точек измерения, а также учитывая симметричность конструкции, в данном случае число точек контроля может быть сокращено в 4 раза. Причем для того, чтобы исключить взаимное влияние воспринимающих органов друг на друга, они могут быть распределены всему объему.

Полученные в таком случае регрессионные модели обладают низким качеством и для описания целесообразнее применить инструмент Regression Learner пакет прикладных программ Matlab. В итоге рассмотрения 19 моделей лучшими показателями обладает модель – Rational Quadratic GPR (приложение В), при этом путем накопления и добавления статистических данных она может быть улучшена. На рисунке 3.66 представлен график остатков, а в качестве примера реализации на рисунке 3.67 представлен объемный график распределения напряженности в слое пшеницы для Z=0 мм, *W*=14%.

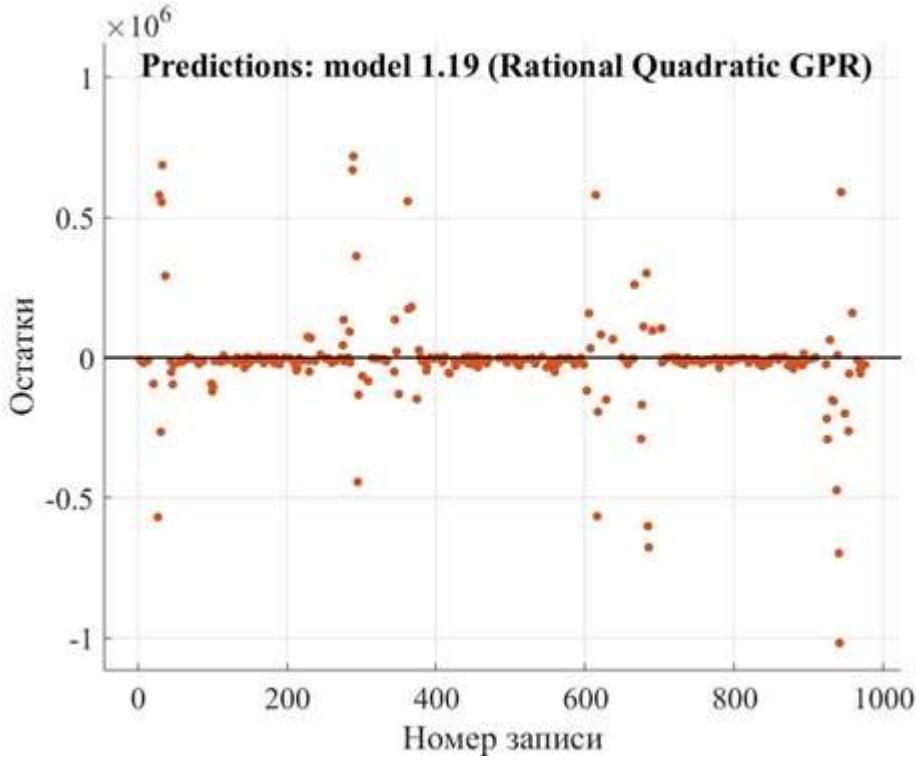


Рисунок 3.66 – График остатков модели

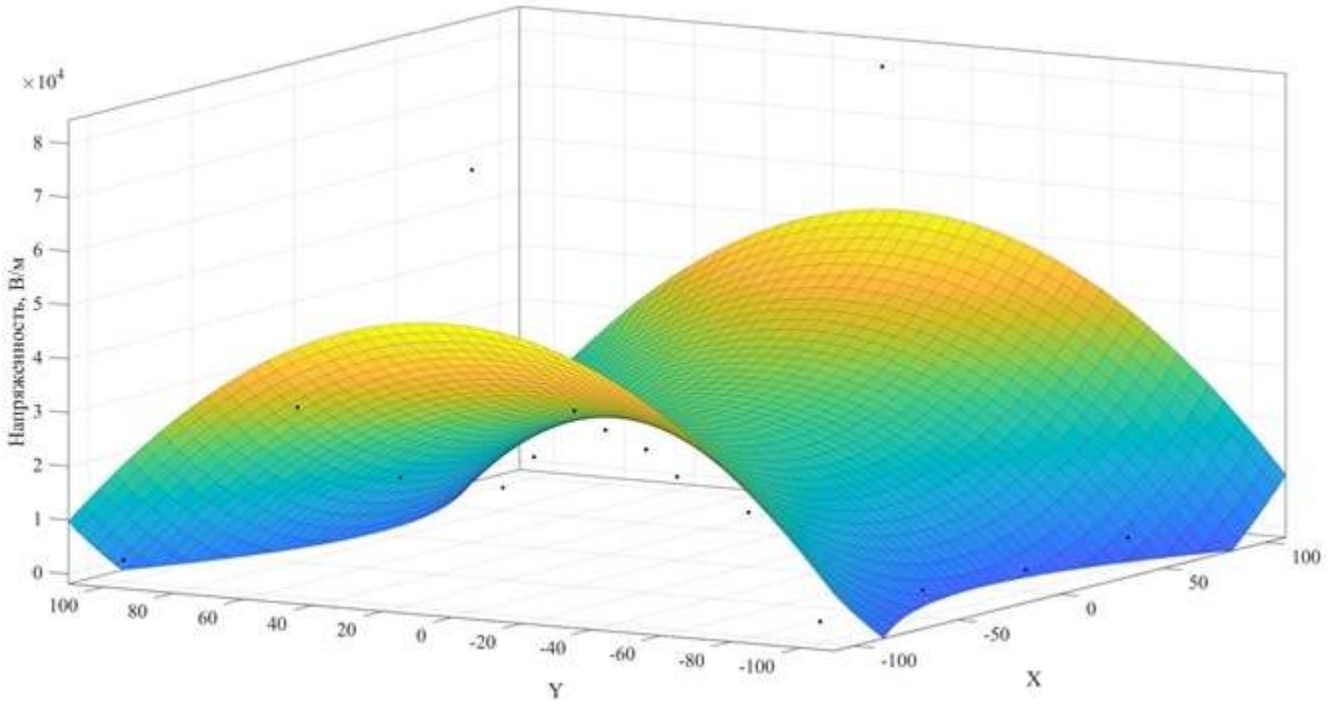


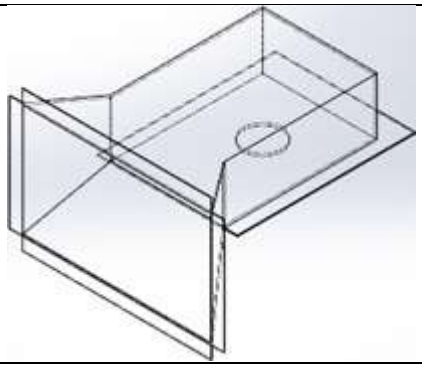
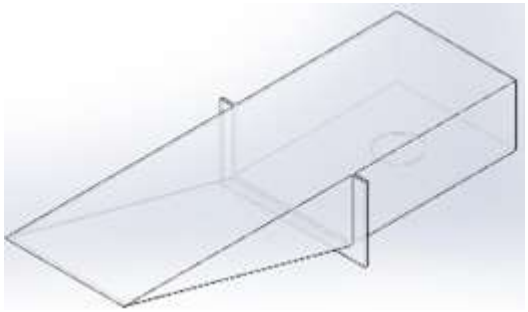
Рисунок 3.67 – Объемный график распределения напряженности в слое пшеницы для Z=0 мм, *W*=14%

Данная модель может быть использована для разработки управляющих алгоритмов в качестве источника данных о поведении зернового слоя в процессе обработки. Для более детального понимания о распределении движущих сил процесса тепло- влагопереноса в зерновом слое под действием микроволнового поля может быть использована нелинейная регрессионная модель, представленная ранее [51].

Указанная регрессионная модель учитывает время воздействия поля на зерновой слой, что в некоторой степени позволяет описать динамику процесса СВЧ обработки.

По результатам проведенной работы получены параметры уровня зоны СВЧ обработки зерна: пшеница, тритикале, овес, ячмень (таблица 3.19) при условии полного заполнения зерновым слоем. Так как предполагается возможность использования разрабатываемого оборудования для обработки зерна различных культур, то данные приведены в усредненном виде, округленном до ближайших целых значений влажности материала.

Таблица 3.19 – Параметры уровня зоны СВЧ воздействия

№	волновод	влаж-ность	Вы-сота, мм	Объем, $\times 10^{-3}$ м^3	Сече-ние, мм×мм
1		20	150	6	200×200
2		18	200	8	200×200
3		16	250	10	200×200
4		18	150	9	200×300
5		16	200	12	200×300
6		14	250	15	200×300
7		22	150	4,5	200×200
8		20	200	6,5	200×200
9		18	250	8,5	200×200
10		20	150	7,5	200×300
11		18	200	10,5	200×300
12		16	250	13,5	200×300

Таким образом становится возможным выбор исходного варианта уровня для построения модуля СВЧ-конвективной обработки зерна. При этом будет учитываться возможность как вертикального масштабирования за счет последовательного размещения по высоте, так и горизонтального, за счет увеличения зоны обработки, как показано на рисунке 3.56. Далее, для определения производительности модулей, разрабатываемых на основе выбранных уровней и установок, на основе модулей, необходимо определить режимы работы оборудования.

3.9 Выводы по разделу

1. Для измерения напряженности микроволнового поля в зерновом слое может быть использовано разработанное устройство, показания которого согласуются с известными закономерностями распространения электромагнитных полей. При этом отклонения на расчетной глубине проникновения поля в слой обрабатываемого материала составляют до 10 % и могут быть снижены за счет применения

более точного контрольно-измерительного оборудования, например, оптических датчиков температуры.

2. Полученные графики распространения микроволнового поля свидетельствуют о том, что общий вид и закономерность изменения параметров поля остаются неизменными, при этом прослеживается зависимость не только от текущей влажности материала, но и от предварительной обработки.

3. Результаты исследования напряженности микроволнового поля в зерновой массе могут быть использованы при исследовании диэлектрических свойств обрабатываемого зерна, а также построении системы управления при проектировании установок СВЧ-конвективной обработки.

4. Разработанная методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки может быть использована при построении картины и закономерности распространения микроволнового поля в объеме зоны СВЧ-конвективной обработки зернового материала.

5. Сравнительный анализ изменения коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в зерновом слое, полученного на основе справочных данных и результатов экспериментальной проверки свидетельствуют об отличии справочных данных о диэлектрических свойствах зерновых материалов и необходимости их уточнения.

6. Отмеченная зависимость фактора диэлектрических потерь не только от текущей влажности материала, но и от предварительной обработки должна быть учтена при разработке режимов тепловой обработки в микроволновом поле.

7. На основе полученных данных о значении фактора диэлектрических потерь рассмотренных материалов и плотностей слоя следует провести моделирование зоны СВЧ-обработки зернового материала, содержащего несколько источников СВЧ поля и уровней их расположения по мере передвижения материала в процессе обработки.

8. Зерновой слой в программах электродинамического моделирования может быть представлен как в виде сплошной формы, так и в виде набора форм

замещения исходных элементов (зерновок), в том числе с разбиением их по уровням влажности по сечению.

9. Для снижения ресурсоемкости расчетов при моделировании установок, содержащих большой объем обрабатываемого материала, зерновой слой целесообразно представлять в виде сплошной формы, при этом форма распределения поля в материале остается без изменения.

10. Диэлектрические свойства неплотного зернового слоя в виде сплошной формы могут быть получены через моделирование в виде форм замещения соответствующей плотности.

11. Данные о диэлектрических свойствах зерновок и зернового слоя различных культур требуют уточнения как существующими методами исследованиями, так и предлагаемыми.

12. Распределение микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия может быть описано обучаемой квадратичной моделью, при этом качество модели может быть повышено за счет дальнейшего накопления данных.

13. Параметры зоны СВЧ-конвективной обработки определяются набором культур, которые предполагается обрабатывать и интервалом их влажности.

14. Минимальным элементом продуктопровода, на основе которых строятся модульные установки является продуктопровод с двумя источниками микроволновой мошности, расположенными встречно и работающими на одну нагрузку. При этом ширина продуктопровода определяется размерами применяемого волновода, а длина трехкратной глубиной проникновения поля применяемой частоты в обрабатываемый материал.

4 РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Разработка режимов работы в нашем случае предполагает возможность осуществления управления работой оборудования по задаваемым критериям оптимальности. В качестве критериев оптимальности будут приняты минимальные энергозатраты и минимальное время обработки. В обоих случаях вводятся ограничения, позволяющие ограничить максимальные энергозатраты либо максимальное время на осуществление процесса. В данном случае в качестве обработки будет принят процесс сушки зерна. Это позволит проводить сушку за максимально допустимое время при этом обеспечив мнимальные затраты энергии.

4.1 Разработка математической модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки и обработки зерна по критериям эффективности: минимум энергозатрат и максимум производительности

Для описания процесса СВЧ – конвективной сушки используют следующую систему дифференциальных уравнений [11, 51, 130, 201, 202]:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = a\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{r}{c_з\varepsilon_{\text{пр}}}\cdot\frac{\partial W}{\partial\tau} + \frac{Q_v}{c_з\rho_з} - \frac{\alpha_q s_v}{\varepsilon_{\text{пр}}\gamma_в c_в}\cdot(T-\theta); \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial\tau} + 3600V\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\gamma_з c_з}{\gamma_в c_в \varepsilon}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial\tau} - \frac{\gamma_з r}{\varepsilon_{\text{пр}}\gamma_в c_в\cdot 100}\cdot\frac{\partial W}{\partial\tau}; \tag{4.2}$$

$$\frac{\partial W}{\partial\tau} = -\frac{\varepsilon\gamma_в}{10^3\gamma_з}\cdot\left(\frac{\partial D}{\partial\tau} + 3600\text{V}\cdot\frac{\partial D}{\partial x}\right); \tag{4.3}$$

$$\frac{\partial W}{\partial\tau} = -K_e\left(W - W_p\right). \tag{4.4}$$

где K_e – коэффициент сушки при СВЧ – конвективном воздействии на зерно, с$^{-1}$.

$$K_e = 7{,}4897 - 0{,}1022T - 0{,}6438W + 0{,}0134\,Q_v + 0{,}0029V\cdot W - 0{,}0026T^2 + \\ +0{,}0071W^2 + 0{,}0148{Q_v}^2 \tag{4.5}$$

Математическую модель оптимального управления получим, представив уравнения (4.1) и (4.2) в операторном виде [119, 128] и решив дифференциальное уравнение (4.4) относительно времени сушки получим:

$$T(s) = T_0\frac{1}{s}(1 + se^{-s\tau_1} - e^{-s\tau_1}) - A_1\theta(s)s + A_1\theta_0 - A_2W(s)s + A_2W_0; \tag{4.7}$$

$$\theta(s) = (\theta_0 - T(s)) \cdot \frac{1}{T_1 s+1} + \theta_0 + A_5 W(s)s + A_5 W_0 + \frac{1}{s} A_6 Q_v; \quad (4.8)$$

$$\tau = -ln((W - W_p)/(W_0 - W_p))/K_e. \quad (4.9)$$

При управлении по критерию максимальной производительности критериальным уравнением служит (4.9), в котором коэффициент сушки заменен полной зависимостью от температуры агента сушки, его скорости, удельной мощности магнетрона и влажности зерна:

$$\tau = -ln((W - W_p)/(W_0 - W_p))/(7{,}4897 - 0{,}1022T - 0{,}6438W + 0{,}0134\,Q_v + 0{,}0029V \cdot W - 0{,}0026T^2 + 0{,}0071W^2 + 0{,}0148{Q_v}^2) \to min. \quad (4.10)$$

Решение данного уравнения позволит найти управляемые параметры процесса сушки (температуру агента сушки T, скорость агента сушки V, удельную мощность СВЧ излучения Q_v). В зависимости от влажности зерна, поступающего на сушку, рассчитывают параметры, обеспечивающие минимальное время сушки, или максимальную производительность. При этом граничные условия будут следующими:

$$\begin{cases} K_{\text{пр}} V \cdot (a \cdot 2{,}7434 \cdot 10^{-5} V + b \cdot 2{,}7434 \cdot 10^{-5} V^2) l + \\ + c_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} (T - T_0) + K_м P_м \le Q_{\text{пр}}; \\ \left(\theta_0 - T(s)\right) \cdot \frac{1}{T_1 s+1} + \theta_0 + A_5 W(s)s + A_5 W_0 + \frac{1}{s} A_6 Q_v \le \theta_{\text{пр}}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Первое уравнение граничных условий задаёт максимальную потребляемую мощность процессом сушки, определяемую предельными мощностями двигателя электропривода вентилятора, нагрева теплоносителя и магнетронов. Второе уравнение задаёт предельное значение нагрева температуры зерна.

При управлении по критерию минимума энергозатрат критериальное уравнение будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{пр}} V \cdot (a \cdot 2{,}7434 \cdot 10^{-5} V + b \cdot 2{,}7434 \cdot 10^{-5} V^2) l + c_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} (T - T_0) + + K_{\text{м}} P_{\text{м}} \to min, \quad (4.12)$$

при граничных условиях:

$$\begin{cases} \left(\theta_0 - T(s)\right) \cdot \frac{1}{T_1 s+1} + \theta_0 + A_5 W(s)s + A_5 W_0 + \frac{1}{s} A_6 Q_v \le \theta_{\text{пр}}; \\ -\ln((W - W_p)/(W_0 - W_p))/(7{,}4897 - 0{,}1022T - \\ -0{,}6438W + 0{,}0134\, Q_v; \\ +0{,}0029V \cdot W - 0{,}0026T^2 + 0{,}0071W^2 + 0{,}0148{Q_v}^2) \le \tau_{пр.} \end{cases} \quad (4.13)$$

Данная математическая модель позволяет найти параметры агента сушки и мощность магнетронов, обеспечивающих минимум энергозатрат на сушку, при ограничениях на время сушки и предельную температуру нагрева зерна.

Использование для математической модели оптимального управления уравнений, записанных в операторном виде, позволяет использовать для моделирования MATLAB с пакетом Simulink, в котором зависимости представлены в виде передаточных функций [85, 118, 128, 129, 140].

4.2 Исследование динамических свойств зернового слоя

Как видно из результатов моделирования и экспериментальных исследований, для обеспечения нагрева материала, не приводящего к механическим повреждениям зерна, целесообразно применение микроволновых источников невысокой мощности. В качестве таких возможно применение серийно-выпускаемых магнетронов мощность. 0,6-0,9 кВт.

Для построения системы управления и реализации управляющих программ по принципу оптимизации по целевым факторам необходимо наличие сведений о динамических свойствах зернового слоя, как объекта СВЧ-конвективного воздействия. Анализ динамических характеристик проводился для плотного неподвижного зернового слоя, подвергающегося СВЧ-конвективному воздействию. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 4.1. Параметры установки следующие: размеры зоны СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерном 200×200×300 мм, мощность магнетрона P_c=900 Вт, скорость фильтрации воздуха через зерновой слой V=0,1÷0,6 м/с. Условия проведения экспериментов: температура наружного воздуха (агента сушки) T=18°С, обрабатываемая культура – пшеница, влажность зернового материала W = 12÷20% с шагом 2%; вентиляция проводилась непрерывно, воздействие СВЧ полем проводилось в импульсном режиме (5

с СВЧ включено, 10 с выключено). Удельная мощность электромагнитного поля, рассеиваемая в конкретной точке, определяется в зависимости от исходной влажности обрабатываемого материала. В качестве функции отклика выбрана температура зернового материала, Θ.

Для определения удельной мощности использовалось устройство для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ, рассеиваемой в зерновом слое (рисунок 3.25).



1 – нагнетающий вентилятор; 2 – блок ТЭНов; 3 – магнетрон; 4 – зона СВЧ-конвективного воздействия; 5 – модули сбора сигналов

Рисунок 4.1 – Лабораторная установка

На рисунке 4.2 представлена схема расположения датчиков температуры при проведении эксперимента. Расстояния между соседними датчиками равнялись L=50 мм, расстояние по горизонтали до экрана ввода СВЧ поля, С, было принято 70 мм, А=70 мм, В=45мм.

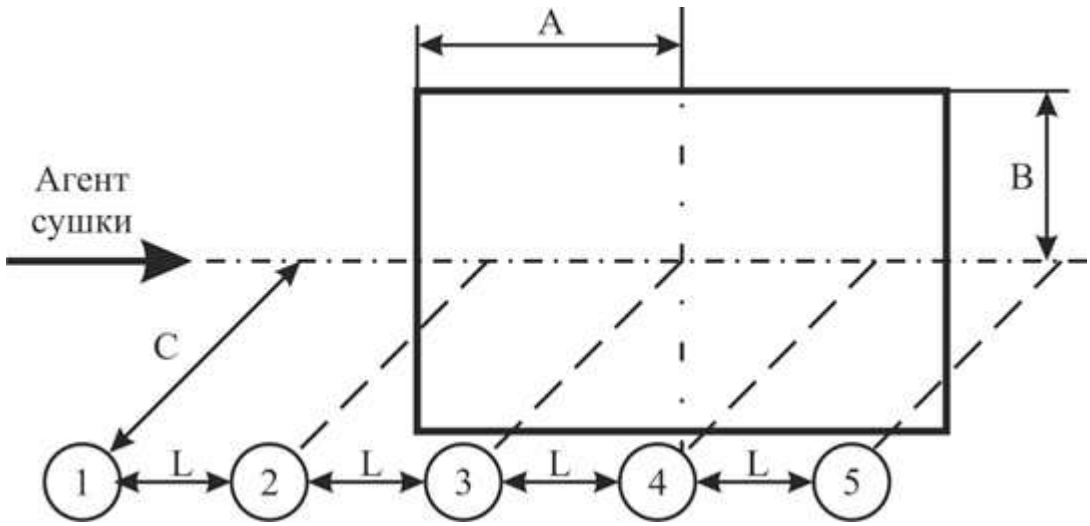


Рисунок 4.2 – Схема расположения датчиков

Пример результатов измерения представлен на рисунке 4.3 [44, 52, 72, 146]. Экспериментальные данные целесообразно обрабатывать с использованием прикладных программных средств.

Обработка результатов экспериментов проводилась в пакете Matlab с применением System Identification Toolbox [9, 84, 168, 170]. Экспериментальные данные записывались в csv – файл, формат которого поддерживается Matlab для импорта данных. Далее провели предварительную обработку сигналов исследуемого объекта, исключив из них постоянную составляющую и задав интересующий диапазон данных. Для анализа были построены параметрические модели (parametric model) в виде ARX-модели (AutoRegressive with eXternal input) различного уровня.

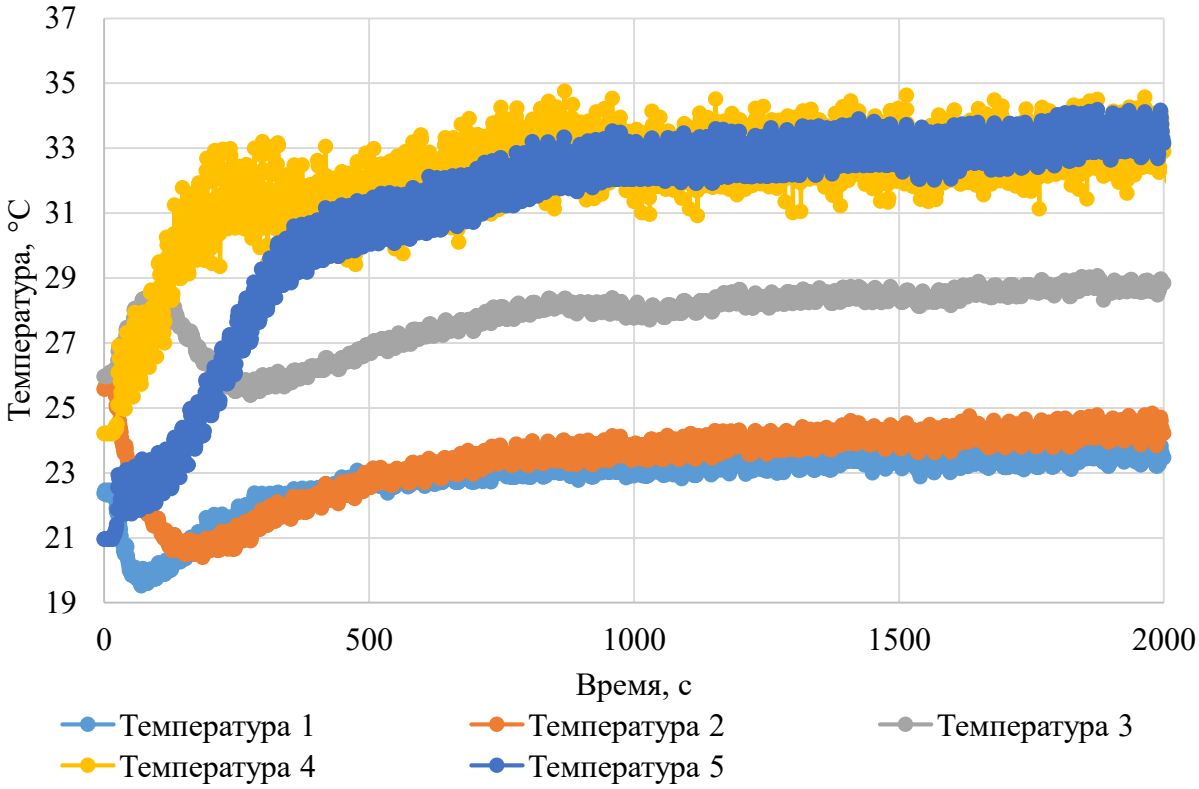


Рисунок 4.3 – Результаты эксперимента при W=18%

ARX-модель представляется в виде:

$$A(z)y(t)=B(z)u(t)+e(t), \tag{4.14}$$

или в развернутом виде:

$$y(t)+a_1y(t-1)+\dots a_{na}y(t-n)=b_1u(t)+b_2u(t-1)+\dots+b_{nb}u(t-m)+e(t).$$

Кроме полиномиального анализа были получен передаточные функции. Общий вид передаточной функции в виде Process Models имеет вид:

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1\cdot s}\cdot e^{-Td\cdot s}. \tag{4.15}$$

Пример полученных коэффициентов для него представлен в таблице 4.1.

На конечном этапе провели оценку порядка параметрической модели, сравнение моделей и оценку их адекватности. Модели, описывающие динамические свойства слоя пшеницы при СВЧ-конвективном воздействии, полученные в результате анализа экспериментальных данных частично приведены в таблице 4.2. В таблице 4.3 представлены ARX-модели зернового слоя, подвергающегося СВЧ-нагреву.

Таблица 4.1 –Коэффициенты Process Models для зернового слоя

W, %	№ датчика	*Kp*	*Tp1*	*Td*
16	1	0,54795	935,59	23,935
16	2	0,68909	527,15	11,765
16	3	0,048423	189,0945	12,523
16	4	0,12185	121,3217	0
16	5	0,945976	217,8842	27,169

Пример передаточных функции, полученных для зернового слоя, приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 –Передаточные функции для зернового слоя

W, %	№ датчика	Передаточная функция
18	1	$\frac{0{,}0007082s + 0{,}00002612}{s^3 + 0{,}1965s^2 + 0{,}01082s + 0{,}00003605}$
18	2	$\frac{0{,}0003572s + 0{,}00000001305}{s^3 + 0{,}09751s^2 + 0{,}003184s + 1{,}281 \cdot 10^{-16}}$
18	3	$\frac{0{,}0002381s + 0{,}000004202}{s^3 + 0{,}1103s^2 + 0{,}003803s + 0{,}00004475}$
18	4	$\frac{0{,}00195s + 0{,}0000001137}{s^2 + 0{,}01233s + 6{,}368 \cdot 10^{-8}}$
18	5	$\frac{0{,}003081s + 0{,}0001449}{s^3 + 1{,}155s^2 + 0{,}05545s + 0{,}0001584}$
20	1	$\frac{0{,}001013s + 0{,}00001706}{s^3 + 0{,}5045s^2 + 0{,}0134s + 0{,}00002328}$
20	2	$\frac{0{,}1657s + 0{,}0003007}{s^3 + 363{,}9s^2 + 1{,}901s + 0{,}00225}$
20	3	$\frac{0{,}000119s + 0{,}00000001928}{s^3 + 0{,}03695s^2 + 0{,}0014s + 6{,}386 \cdot 10^{-10}}$
20	4	$\frac{0{,}0002665s + 0{,}000007215}{s^3 + 2{,}489s^2 + 0{,}03218s + 0{,}00004237}$
20	5	$\frac{0{,}0008347s + 0{,}00003231}{s^3 + 0{,}3773s^2 + 0{,}01553s + 0{,}00003815}$

Таблица 4.3 – Результаты полиномиального анализа в System Identification Toolbox

W, %	№ дат-чика	Тип модели		
		arx441	arx332	arx223
12	1	$A(z)=1-1{,}287z^{-1}+0{,}429z^{-2}-0{,}2159z^{-3}+0{,}09211z^{-4}$ $B(z)=0{,}0006701z^{-1}-0{,}0003012z^{-2}-0{,}0002491z^{-3}-0{,}0005811z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}342z^{-1}+0{,}430z^{-2}-0{,}07237z^{-3}$ $B(z)=0{,}0001748z^{-2}-0{,}0002074z^{-3}-0{,}0006489z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}336z^{-1}+0{,}3525z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0001427z^{-3}-0{,}0006153z^{-4}$
12	2	$A(z)=1-1{,}346z^{-1}+0{,}5244z^{-2}-0{,}2514z^{-3}+0{,}09399z^{-4}$ $B(z)=0{,}00003436z^{-1}-0{,}00003296z^{-2}-0{,}00002616z^{-3}-0{,}00007604z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}373z^{-1}+0{,}498z^{-2}-0{,}1049z^{-3}$ $B(z)=-0{,}000005863z^{-2}-0{,}001846z^{-3}-0{,}00008234z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}322z^{-1}+0{,}3444z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0003183z^{-3}-0{,}00007325z^{-4}$
12	3	$A(z)=1-1{,}344z^{-1}+0{,}555z^{-2}-0{,}2907z^{-3}+0{,}09358z^{-4}$ $B(z)=0{,}00004234z^{-1}+0{,}000007242z^{-2}-0{,}00001376z^{-3}-0{,}00003747z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}436z^{-1}+0{,}5824z^{-2}-0{,}1334z^{-3}$ $B(z)=0{,}00002683z^{-2}-0{,}00001128z^{-3}-0{,}00003976z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}447z^{-1}+0{,}4596z^{-2}$ $B(z)=-0{,}00000177z^{-3}-0{,}00003852z^{-4}$
12	4	$A(z)=1-0{,}92z^{-1}+0{,}08925z^{-2}-0{,}02725z^{-3}+0{,}1844z^{-4}$ $B(z)=0{,}00004234z^{-1}+0{,}000007242z^{-2}-0{,}00001376z^{-3}-0{,}00003747z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}279z^{-1}+0{,}7614z^{-2}-0{,}4598z^{-3}$ $B(z)=0{,}0005334z^{-2}-0{,}0002439z^{-3}-0{,}0003656z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}507z^{-1}+0{,}5321z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0001467z^{-3}-0{,}0003056z^{-4}$
12	5	$A(z)=1-1{,}4z^{-1}+0{,}5588z^{-2}-0{,}2327z^{-3}+0{,}07647z^{-4}$ $B(z)=-0{,}0001911z^{-1}-0{,}00009827z^{-2}-0{,}00001106z^{-3}-0{,}0001852z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}39z^{-1}+0{,}5242z^{-2}-0{,}1315z^{-3}$ $B(z)=-0{,}0002345z^{-2}-0{,}0000083z^{-3}-0{,}0001699z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}35z^{-1}+0{,}3521z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0002023z^{-3}-0{,}00008896z^{-4}$
14	1	$A(z)=1-1{,}546z^{-1}+0{,}9718z^{-2}-0{,}6814z^{-3}+0{,}3435z^{-4}$ $B(z)=-0{,}0004318z^{-1}-0{,}0001135z^{-2}-0{,}001354z^{-3}-0{,}0001852z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}507z^{-1}+0{,}7711z^{-2}-0{,}1947z^{-3}$ $B(z)=0{,}0003982z^{-2}-0{,}001739z^{-3}+0{,}0003682z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}404z^{-1}+0{,}4886z^{-2}$ $B(z)=-0{,}001329z^{-3}+0{,}0003492z^{-4}$
14	2	$A(z)=1-1{,}578z^{-1}+0{,}9435z^{-2}-0{,}5145z^{-3}+0{,}2326z^{-4}$ $B(z)=-0{,}000005526z^{-1}-0{,}0001168z^{-2}-0{,}00004932z^{-3}+0{,}00005697z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}543z^{-1}+0{,}7708z^{-2}-0{,}1599z^{-3}$ $B(z)=-0{,}00007289z^{-2}-0{,}0001106z^{-3}+0{,}00005382z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}476z^{-1}+0{,}5656z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0001585z^{-3}+0{,}00008151z^{-4}$
14	3	$A(z)=1-1{,}58z^{-1}+0{,}907z^{-2}-0{,}4388z^{-3}+0{,}1849z^{-4}$ $B(z)=0{,}0002176z^{-1}-0{,}0002239z^{-2}-0{,}00000742z^{-3}-0{,}000001471z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}45z^{-1}+0{,}4891z^{-2}+0{,}01823z^{-3}$ $B(z)=-0{,}000005608z^{-2}-0{,}00009498z^{-3}+0{,}000005342z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}451z^{-1}+0{,}5081z^{-2}$ $B(z)=-0{,}0000952z^{-3}+0{,}00000253z^{-4}$
14	4	$A(z)=1-1{,}625z^{-1}+1{,}051z^{-2}-0{,}5935z^{-3}+0{,}1857z^{-4}$ $B(z)=0{,}000008551z^{-1}-0{,}00008586z^{-2}+0{,}00008378z^{-3}-0{,}00008606z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}571z^{-1}+0{,}8917z^{-2}-0{,}3065z^{-3}$ $B(z)=-0{,}00006331z^{-2}+0{,}00005635z^{-3}-0{,}00007751z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}441z^{-1}+0{,}4636z^{-2}$ $B(z)=-0{,}000003455z^{-3}-0{,}00005538z^{-4}$
14	5	$A(z)=1-1{,}69z^{-1}+1{,}148z^{-2}-0{,}661z^{-3}+0{,}2059z^{-4}$ $B(z)=-0{,}0005479z^{-1}-0{,}0006393z^{-2}-0{,}0002432z^{-3}-0{,}0004197z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}64z^{-1}+0{,}9801z^{-2}-0{,}3386z^{-3}$ $B(z)=-0{,}0008764z^{-2}-0{,}0003862z^{-3}-0{,}0004756z^{-4}$	$A(z)=1-1{,}499z^{-1}+0{,}5046z^{-2}$ $B(z)=-0{,}001124z^{-3}+0{,}00003138z^{-4}$

Полученные результаты позволяют разработать систему управления установкой СВЧ-конвективной обработки зерна.

4.3 Моделирование процессов управления

4.3.1 Моделирование управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке

Процесс тепло - и влагообмена при конвективной сушке принято описывать известной системой уравнений (4.1) - (4.4). В результате проведенных преобразований получена полная система уравнений и передаточных функций, позволяющих выполнять расчет тепло - и влагообмена в элементарном слое зерна:

$$W(s) = W_p \frac{K}{s+K}, \tag{4.16}$$

$$W_{\text{п}} = \left[\frac{ln(1-F)}{5{,}47\ 10^{-6}(T+273)}\right]^{0{,}435}, \tag{4.17}$$

$$K = 7{,}1\ 10^{-2}\text{e}^{0{,}05\,T}, \tag{4.18}$$

$$F = \frac{745\ D}{(622+D)e^{\left(0{,}622+\frac{7{,}5\,T}{238+T}\right)}}. \tag{4.19}$$

$$T(s) = T_0 \frac{1}{s}(1 + s \cdot e^{-s\tau_1} - e^{-s\tau_1}) - A_1\theta(s)s + A_1\theta_0 - A_2W(s)s + A_2W_0, \tag{4.20}$$

$$D(s) = D_0 \frac{1}{s}(1 + s \cdot e^{-s\cdot\tau_1} - e^{-s\cdot\tau_1}) - \frac{1}{A_3}W(s)s + \frac{1}{A_3}W_0, \tag{4.21}$$

$$\theta(s) = T(s)\frac{1}{A_4} - T_0\frac{1}{sA_4}((1 - A_4) \cdot (1 - e^{-s\cdot\tau_1}) + s \cdot e^{-s\cdot\tau_1}). \tag{4.22}$$

На основании данных уравнений в Simulink была разработана модель сушки зерна в плотном слое (рисунок 4.4).

В модели использован принцип последовательной сушки элементарных слоёв, когда выходные параметры предыдущего слоя являются входными для последующего. Предусмотрено регулирования относительной влажности воздуха, подаваемого в зерновой слой с учетом изменения аэродинамического сопротивления в процессе сушки [43]. С помощью моделей измерительных устройств контролируют температуру и влажность зернового слоя и агента сушки на входе и выходе из зернового слоя. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.5.

Из рисунка видно, что изменение параметров агента сушки существенно влияет на ход процесса и на его скорость по толщине зернового слоя.

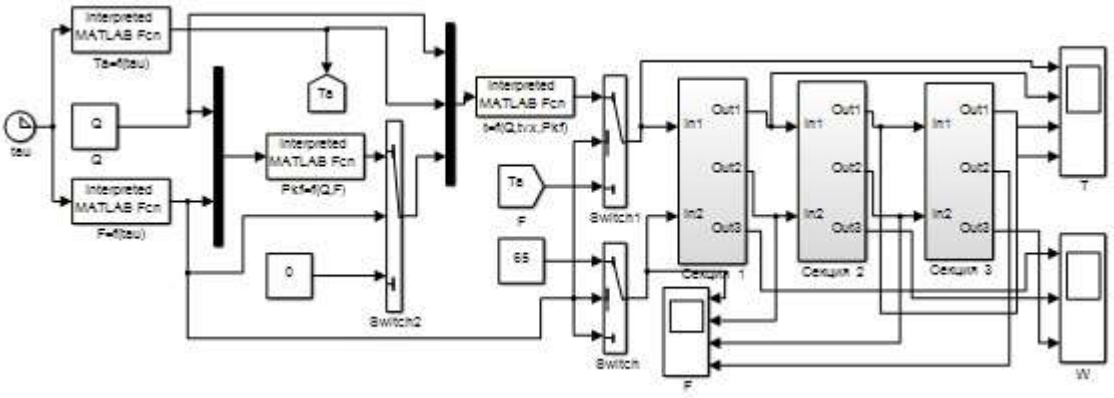


Рисунок 4.4 - Simulink – модель сушки зерна в плотном слое при регулировании параметров воздуха

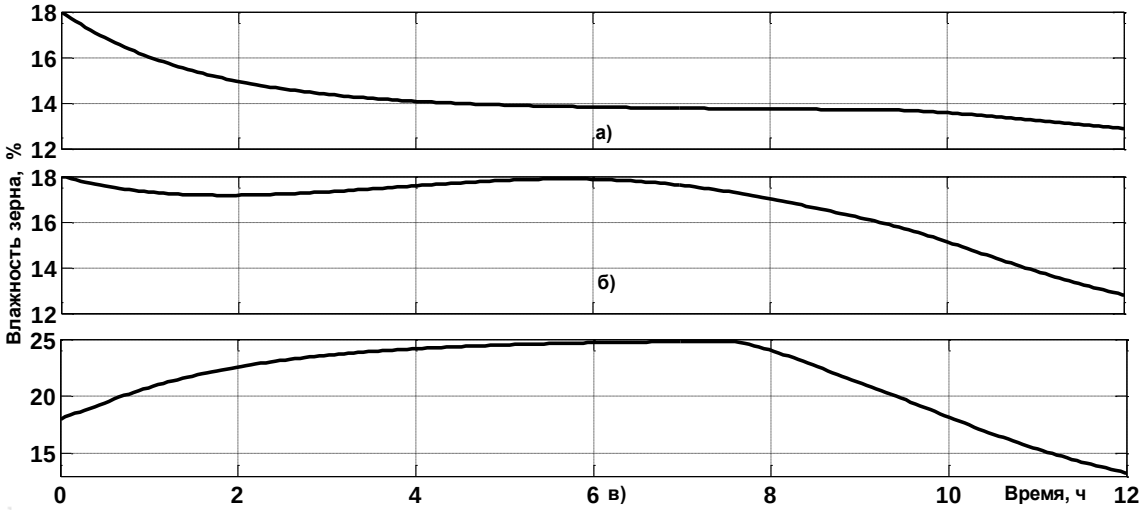


Рисунок 4.5 – Результаты моделирования сушки зерна при изменяющихся параметрах атмосферного воздуха

Для интенсификации процесса и снижения его энергоёмкости необходимо совершенствовать систему управления подачей вентилятора и систему управления перемещением зерна.

4.3.2 Моделирование управления работой магнетронов и подачей теплоносителя при СВЧ – конвективной сушке зерна

Из системы дифференциальных уравнений тепло - и влагопереноса при СВЧ нагреве взято уравнение изменения температуры зерна:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = a\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{r}{c_з\varepsilon_{пр}}\cdot\frac{\partial W}{\partial\tau} + \frac{Q_v}{c_з\rho_з}. \qquad (4.23)$$

В операторном виде $\theta(p) = \theta_0 + W(p)pA_5 - W_0A_5 + Q_v\frac{1}{p}A_6$ использовано совместно с моделями, представленными ранее, для моделирования процесса СВЧ - конвективной сушки. В качестве базовой принята модель сушки зерна в плотном слое (рисунок 4.4) с добавленными блоками по СВЧ – нагреву зерна. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.6.

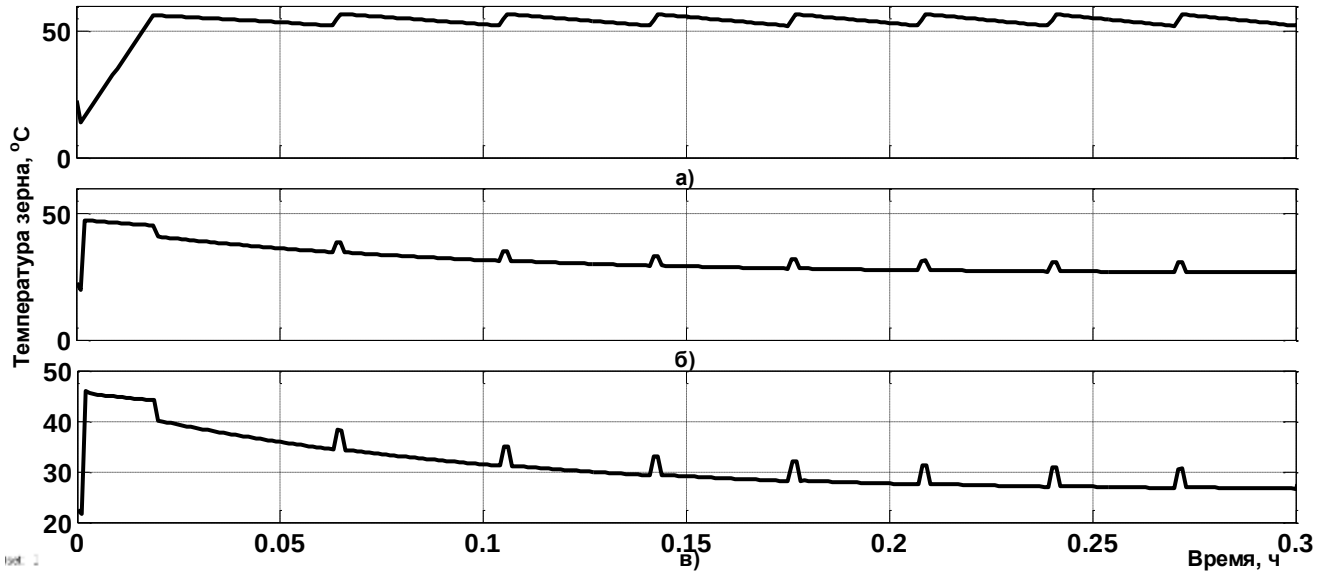


Рисунок 4.6 – Изменение температуры зерна в СВЧ зоне при сушке:
а) – максимальная удельная мощность; б) – средняя удельная мощность;
в) – минимальная удельная мощность

Результаты моделирования показывают, что наблюдаемая неравномерность нагрева зерна по глубине зоны соответствует существующим закономерностям.

Универсальность модуля позволяет проводить в нём предпосевную обработку, для которой необходимо обеспечить соответствующий алгоритм поддержания температуры. Для оценки возможности качественной реализации данного процесса проводилось его моделирование.

4.4 Разработка алгоритмов функционирования

4.4.1 Разработка алгоритмов управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке

Для разработки алгоритма оптимального управления путём изменения подачи теплоносителя необходимо разработана математическая модель процесса, в основу модели положено уравнение теплового баланса для элементарного слоя. Математическая модель оптимального управления разработана в двух вариантах: при сушке атмосферным воздухом; при сушке подогретым воздухом. Ниже приведён вариант модели оптимального управления при сушке подогретым воздухом.

$$D_2 = \frac{-622\cdot\left(1.0-\exp\left(W_{\text{р}}^{2.4752}\left(5{,}47\cdot10^{-6}\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+1{,}493\cdot10^{-3}\right)\right)\right)}{1{,}0-\exp\left(W_{\text{р}}^{2.4752}\left(5{,}47\cdot10^{-6}\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+1.493\cdot10^{-3}\right)\right)-765\exp\left(\frac{5345\cdot\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+311}{500\cdot\left(\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+236\right)}\right)};$$

$$\tau = \frac{n\cdot d_{np}}{k_v Q K\left(\left(0{,}597\cdot\frac{-622\cdot65}{65-765\exp\left(\frac{5345\cdot\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+311}{500\cdot\left(\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)+236\right)}\right)}+c_в\left(\frac{65-F_a}{5}+T_a\right)\right)\cdot4{,}19-(0{,}597D_2+c_в T_a)\cdot4{,}19\right)}\cdot$$

$$\cdot(W-W_0)\rightarrow min$$

$$\frac{2{,}778\cdot10^{-7}Q\cdot(0{,}0064Q+1{,}089\cdot10^{-6}Q^2)n\cdot d_{np}}{\eta}\leq N,$$

(4.24)

Алгоритм управления процессом будет заключаться в следующем:

- измерение параметров атмосферного воздуха (температура и влагосодержание);
- расчет параметров воздуха на выходе из зернового слоя;

- решение математической модели для поиска требуемого значения подачи вентилятора, при сушке зернового слоя заданной величины;
- задание, с помощью частотного преобразователя, требуемых оборотов электродвигателя привода вентилятора;
- контроль влажности зерна, для фиксирования времени окончания процесса;
- выключение подачи вентилятора.

4.4.2 Разработка алгоритма управления подачей теплоносителя и регулирования его температурой при сушке зерна в универсальном электротехнологическм модуле для сушки и обработки зерна с учетом изменения движущих сил тепло– и влагопереноса при СВЧ воздействии

При работе электротехнологического модуля подготовка и подача теплоносителя, в качестве которого выступает воздух осуществляется только в режиме сушки. В остальных режимах работы подача наружного воздуха осуществляется только при необходимости охлаждения [93, 94, 144]. Упрощенный алгоритм функционирования блока воздухоподготовки представлен на рисунке 4.7.

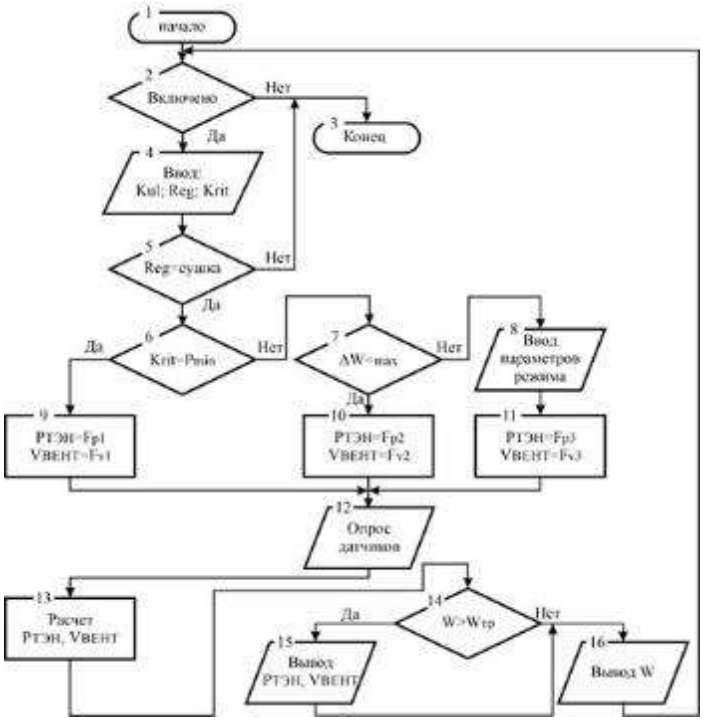


Рисунок 4.7 – Упрощенный алгоритм функционирование воздухоподготовки

В процессе работы проводилась идентификация динамических свойств блока воздухоподготовки. Результаты идентификации легли в основу зависимостей для расчета мощности ТЭНов и скорости агента сушки, который регулируется с помощью преобразователя частоты.

4.4.3 Разработка алгоритма функционирования систем подачи и выгрузки зерна универсального электротехнологического модуля

Система подачи и выгрузки зерна является одной из основных систем обеспечения технологического процесса, так как и менно скоростью выгрузного устройства регулируется пропускная производительность модуля, температура нагрева зерновой массы, влагосъем и прочие технологические параметры. Обобщенный вид разработанного алгоритма подачи и выгрузки представлен на рисунке 4.8.

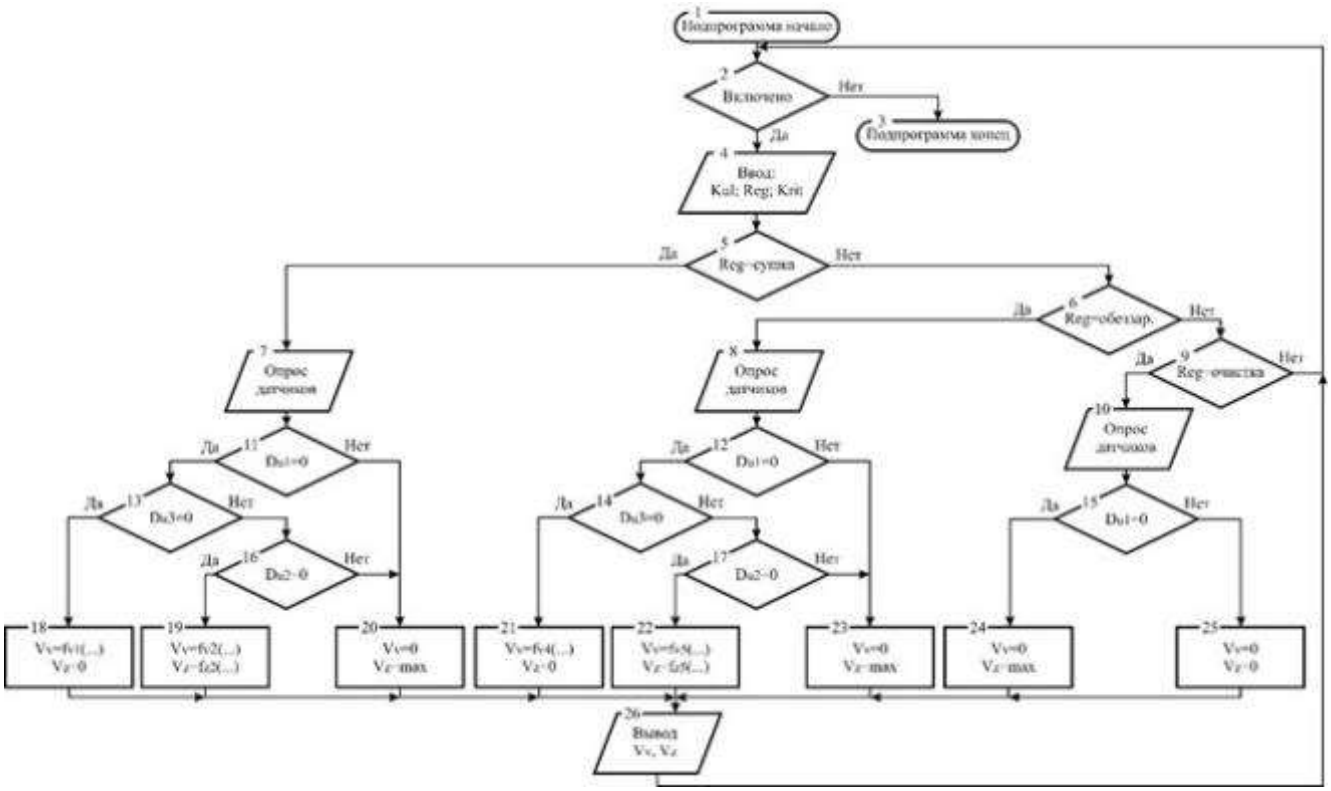


Рисунок 4.8 – Алгоритм подачи и выгрузки зерна

Для обеспечения функционирования оборудования по выбранному критерию были проведены экспериментальные исследования по идентификации зоны СВЧ-конвективной разработки, как объекта управления при изменяющихся параметрах управляющих воздействий.

4.4.4 Разработка алгоритма управления работой магнетронов на основе полученных математических моделей процесса нагрева зерна в СВЧ поле универсального электротехнологического модуля

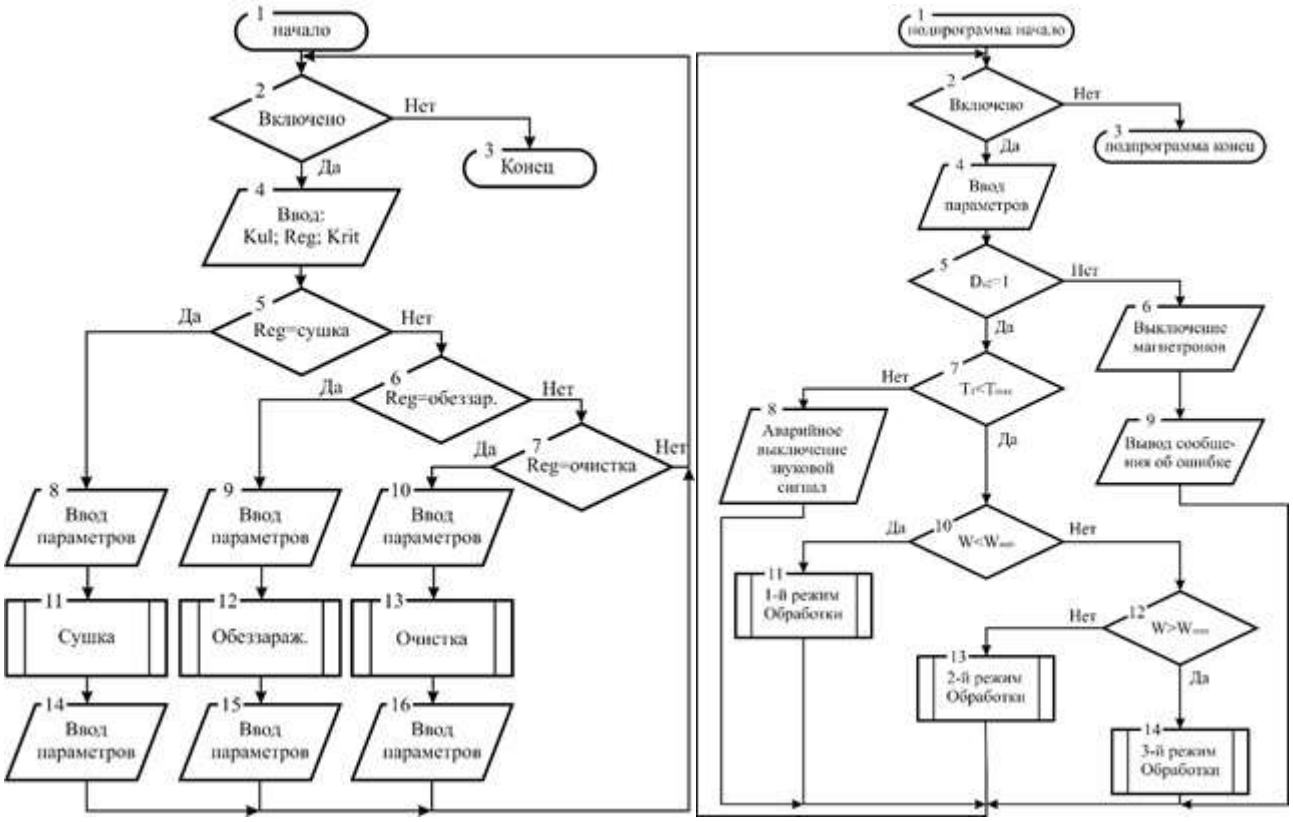
Ранее нами были получены математические модели теплопереноса в зерне при СВЧ нагреве [113, 115, 144].

На основании математических моделей был разработан алгоритм работы магнетронов при сушке, общий вид которого представлен на рисунке 4.9 б.

Для каждой культуры существуют режимы сушки (непрерывный, импульсный), которые определяются критериями проведения процесса: минимальные энергозатраты, максимальная скорость сушки, один из указанных критериев с ограничениями по времени или энергозатратам. Выбор режима работы обуславливается экспериментальными данными о скорости сушки зерна в процессе тепловой обработки с применением микроволнового поля и без него.

4.4.5 Разработка объединенного алгоритма функционирования универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна

Обобщенный алгоритм функционирования был разработан на основе алгоритмов, оборудования, представленных выше. Общий вид обобщенного алгоритма представлен на рисунке 4.9 а.



а б

Рисунок 4.9 – Алгоритмы функционирования оборудования:
а – обобщенный алгоритм; б - алгоритм работы магнетронов

При этом на начальном этапе после включения установки происходит ввод вида обрабатываемой культуры, выбор режима работы (сушка, обеззараживание, очистка) и критерия работы оборудования. Далее выполняется подпрограмма, соответствующая указанным параметрам с вводом параметров (тонкая настройка). В процессе выполнения подпрограммы «очистка» СВЧ воздействия и вентилирования слоя не происходит, при выполнении подпрограмм «сушка» и «обеззараживание» происходит подстройка скорости устройств загрузки и выгрузки [225], а также определение мощности ТЭНов блока воздухоподготовки и скорости агента сушки, магнетроны могут работать в постоянном и импульсном режимах работы, обеспечивая поддержание требуемой температуры зерна в соответствии с требованиями технологических процессов.

Также была разработана модель Simulink, позволяющая провести проверку функционирования алгоритма совместно с элементами моделей зернового слоя.

Это дает возможность компилировать элементы машинного кода, для дальнейшей записи в управляющий контроллер, реализовывать систему, совмещенную с моделями, выполняемыми на компьютере или машине реального времени.

4.5 Разработка компьютерной модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки и обработки зерна

При СВЧ – конвективной сушке зерна неравномерность влагосъёма зависит от неравномерности распределения поля в зерновом слое и от неравномерности распределения агента сушки. Чтобы иметь возможность задавать параметры поля СВЧ и скорости агента сушки использован ступенчатый метод расчёта [113, 254]. Для этого плотный зерновой слой представлен в виде набора элементарных слоёв. В качестве элементарного принят слой в одно зерно. С учётом такого допущения в уравнениях (4.1) и (4.4), (4.6) пространственная координата x может быть заменена приведённым диаметром d_{np} зерновки.

Суть ступенчатого метода заключается в том, что параметры агента сушки, прошедшего через элементарный слой становятся входными параметрами для следующего элементарного слоя. При прохождении через зерновой слой воздух насыщается влагой, изменяется его температура и, как следствие, равновесная влажность. Поэтому на входе каждого элементарного слоя необходимо рассчитывать величины влагосодержания и равновесной влажности. Для этого используют известные зависимости [93]:

$$W_p = \left[\frac{ln(1-F)}{5{,}47\ 10^{-6}(T+273)}\right]^{0{,}435}, \tag{4.25}$$

$$F = \frac{745\ D}{(622+D)e^{\left(0{,}622+\frac{7{,}5\ T}{238+T}\right)}}. \tag{4.26}$$

Математическая модель СВЧ – конвективной сушки слоя зерна может быть представлена в виде набора математических моделей элементарного слоя. Принято допущение, что толщина зернового слоя, подвергаемого сушке складывается из приведённых диаметров d_{np} последовательно расположенных зерновок. Количество моделей элементарного слоя будет равно количеству зёрен, укладывающихся в заданную толщину.

Для разработки компьютерной имитационной модели элементарного слоя предпринята попытка представить дифференциальные уравнения (4.1), (4.4) – (4.7), в виде передаточных функций.

Уравнения (4.1), (4.4) – (4.7) содержат частные производные. Воспользуемся методом интегрального преобразования Лапласа для их промежуточного решения. В этом случае преобразование частных производных осуществляется по следующему правилу [254]:

Например, для температуры агента сушки T, которая изменяется и во времени и по толщине зернового слоя преобразование осуществляется следующим образом. Если $T = T(x,\tau)$ и преобразование Лапласа производится по переменной $\tau(\tau \geq 0)$, то обозначив $L[T\ (x,\tau)] \equiv T(x,p)\int_0^\infty e^{-p\tau}T(x,\tau)d\tau$, можно интегрированием по частям установить соотношение:

$$\mathrm{L}\left[\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \tau}\right] = pT(x,\mathrm{p}) - T(x,0), \tag{4.27}$$

$$\mathrm{L}\left[\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \tau}\right] = \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial x}(x,\mathrm{p}), \tag{4.28}$$

где $T(x,0)$– начальное значение температуры.

Для уравнения (4.4) выполним процедуру преобразования Лапласа по τ:

$$pT(x,p) - T(x,0) + 3600V\frac{\partial T}{\partial d_{np}} = -\frac{\gamma_3 c_3}{\varepsilon\gamma_в c_в}\left(p\theta(x,p) - \theta(x,0)\right) - \frac{\gamma_3 r'}{100\,\gamma_в c_в \varepsilon}(pW(x,p) - W(x,0)); \tag{4.29}$$

$$pT(x,p) - T(x,0) + 3600V\frac{\partial T}{d_{np}} = \frac{\gamma_3 c_3}{\gamma_в c_в \varepsilon}\theta(x,0) - \frac{\gamma_3 c_3}{\varepsilon\gamma_в c_в}p\theta(x,p) + \frac{\gamma_3 r'}{100\,\gamma_в c_в \varepsilon}W(x,0) - \frac{\gamma_3 r'}{100\,\gamma_в c_в \varepsilon}\,pW(x,p), \tag{4.30}$$

или

$$pT(x,p) - T(x,0) + 3600V\frac{\partial T}{d_{np}} = A_1\theta(x,0) - A_1 p\theta(x,\mathrm{p}) + A_2 W(x,0) - A_2 pW(x,p), \tag{4.31}$$

где $A_1 = \frac{\gamma_3 c_3}{\varepsilon\gamma_в c_в}$, $A_2 = \frac{\gamma_3 r'}{100\,\gamma_в c_в \varepsilon}$.

Записав уравнение относительно частной производной и заменив координату *x* на приведённый диаметр зерновки d_{np} получим следующее выражение:

$$3600V\frac{\partial T}{\partial d_{np}} = A_1\theta(d_{np},0) - A_1 p\theta(d_{np},\text{р}) + A_2 W(d_{np},0) - A_2 pW(d_{np},p) - pT(d_{np},p) + T(d_{np},0). \quad (4.32)$$

Используя принцип суперпозиции запишем дифференциальное уравнение только с переменной *T*: $3600V\frac{dT}{dd_{np}} = pT(d_{np},p) + T(d_{np},0)$.

При этом p играет роль переменной. Решим дифференциальное уравнение относительно d_{np}, записав в качестве граничного условия $T(d_{np},0) = T_0$.

Решение уравнения с использованием пакета MATLAB [170] дало следующий результат:

$$T(p) = \frac{T_0 - e^{-p\tau_1}T_0 + pT_0e^{-p\tau_1}}{p}, \quad (4.33)$$

где $\tau_1 = \frac{d_{np}}{3600V}$ - время задержки в одном зерновом слое при скорости агента сушки *V*.

Чтобы получить в операторной форме зависимость изображения температуры теплоносителя *T*(р) на выходе элементарного слоя от начальных данных температуры воздуха T_0(р), температуры зерна θ_0(р), и его влажности W_0(р), подставим в уравнение (4.12) эти слагаемые. Аналогичную операцию выполним для текущих значений температуры θ(р) и влажности зерна $W(p)$. В результате в операторном виде получено следующее уравнение:

$$T(p) = T_0\frac{1}{p}(1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}) - A_1\theta(p)p + A_1\theta_0 - A_2W(p)p + A_2W_0. \quad (4.34)$$

По существующей методике [254], для нахождения уравнения описывающее зависимость $T = f(\theta, W, \theta_0, W_0, T_0)$ необходимо выполнить обратное преобразование Лапласа уравнения (4.34). Апробирована [128, 143] методика, позволяющая выполнять численное моделирование процесса, представив данную зависимость в виде передаточных функций. Функциональная схема, реализующая данную зависимость, приведена на рисунке 4.10.

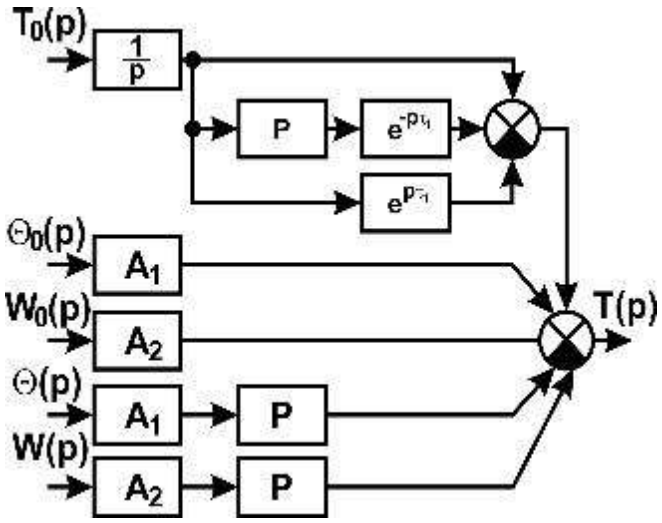


Рисунок 4.10 - Функциональная схема реализации зависимости температуры межзернового пространства от параметров зерна и воздуха

Аналогичную процедуру выполним для уравнений (4.1), (4.5), (4.6). Из уравнения (4.5) найдём зависимость для изменения температуры зерна элементарного слоя θ при конвективной сушке, из уравнения (4.1) зависимость для температуры зерна при воздействии поля СВЧ, зависимость для температуры зерна при СВЧ - конвективном воздействии на зерно. Для нахождения зависимости влагосодержания D агента сушки на выходе его из зернового слоя используем уравнение (4.6).

Представив $\frac{\varepsilon\gamma_в}{10^3\gamma_з} = A_3$ и выполнив преобразование Лапласа для (4.6) получим следующую зависимость:

$$3600V\frac{dD}{dd_{np}} = -D(p)p + D_0 - \frac{1}{A_3}p\,W(p) + \frac{1}{A_3}W_0. \qquad (4.35)$$

Решим данное уравнение используя принцип суперпозиции по d_{np} только для D получим:

$$D(p) = \frac{D_0 - e^{-p\tau_1}D_0 + pD_0e^{-p\tau_1}}{p}. \qquad (4.36)$$

Подставив в (4.36) слагаемые влажности зерна, получим в операторной форме зависимость изображения влагосодержания теплоносителя D(p) на выходе элементарного слоя от изображения влагосодержания на входе в зерновой слой D_0, изображения начальной влажности зерна W_0, от изображения текущей влажности зерна $W(p)$:

$$D(p) = D_0 \frac{1}{p}(1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}) - \frac{1}{A_3} W(p)p + \frac{1}{A_3} W_0. \qquad (4.37)$$

Функциональная схема, реализующая данную зависимость в передаточных функциях, приведена на рисунке 4.11.

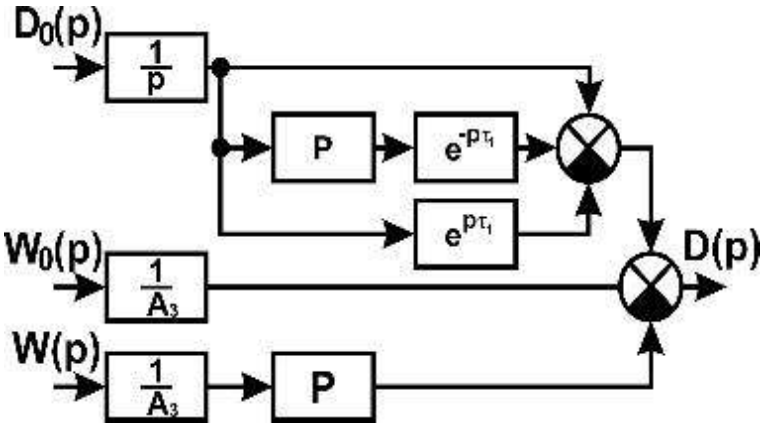


Рисунок 4.11 – Функциональная схема реализации зависимости влагосодержания на выходе зернового слоя от входных параметров

Для получения уравнения изменения температуры зерна при СВЧ воздействии необходимо решить уравнение (4.1), а при СВЧ – конвективном воздействии – уравнение (4.8). Воспользуемся принципом суперпозиции и решим уравнение теплопроводности для шара:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \left(\frac{d^2\theta}{d{d_{np}}^2} + \frac{2}{d_{np}} \frac{d\theta}{dd_{np}}\right), \qquad (4.38)$$

Начальные условия определяют температуру в центре и на поверхности зерновки в начале процесса сушки: $\frac{\partial\theta}{\partial r_0}\Big|_{\tau=0} = \frac{\partial\theta}{\partial r_1}\Big|_{\tau=0} = \theta_0$. $r_0 = 0$, $r_1 = r$. В качестве граничных условий запишем: теплообмен в центре зерна - $\frac{\partial\theta}{\partial r_0} = 0$, на поверхности - $\frac{\partial\theta}{\partial r_1} = -A_4 \cdot (\theta - T)$, при $x = d_{np}$.

Зерновка представлена в виде шара, с поверхности которого теплота отводится в окружающую среду с температурой T =const. В течение всего периода нагрева/охлаждения коэффициент теплоотдачи одинаков для всех участков поверхности и остается постоянным ($\alpha = const$).

Решая уравнение (4.38) и подчиняя его начальным и граничным условиям, в критериальном виде получаем [254]:

$$\theta_{от} = \sum_{n=1}^{n=\infty} A(\mu_n)U(\mu_n R)|\exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (4.39)$$

где$R = r/r1$ – безразмерный радиус;

$\theta_{от} = (\theta - T)/(\theta_0 - T)$ – безразмерная избыточная температура;

μ_n- корень характеристического уравнения $tg\mu = -\mu/(Bi - 1)$, которое имеет бесчисленное множество корней;

Fo - критерий Фурье, $Fo = \frac{a\tau}{d_{пр}^2}$.

Безразмерные избыточные температуры в центре ($R = 0$) и на поверхности ($R = 1$) шара могут быть определены по формулам:

$$\theta_{R=0} = N_1(Bi)\exp(-\mu_1^2 Fo); \quad (4.40)$$

$$\theta_{R=1} = P_1(Bi)\exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (4.41)$$

В этом уравнении $Bi = \frac{\alpha_q d_{пр}}{\lambda}$ - безразмерный комплекс, называемый критерием Био, представляющий отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи. Численные значения величин μ_1, N_1 и P_1 в зависимости от числа Bi приведены в таблице 4.4 [113].

Таблица 4.4 - Численные значения величин μ_1, N_1 и P_1 для расчета охлаждения (нагревания) шара [113]

Bi	μ_1	N_1	P_1	**Bi**	μ_1	N_1	P_1
0,00	0,0000	1,000	1,000	1,00	1,5708	1,273	0,811
0,01	0,1730	1,003	0,998	1,20	1,6887	1,320	0,776
0,02	0,2445	1,006	0,996	1,40	1,7906	1,364	0,743
0,04	0,3450	1,012	0,992	1,60	1,8798	1,405	0,712
0,06	0,4217	1,018	0,988	2,00	2,0288	1,479	0,654
0,10	0,5423	1,029	0,979	3,00	2,2889	1,623	0,534
0,15	0,6609	1,044	0,970	4,00	2,4557	1,720	0,444
0,20	0,7593	1,059	0,960	5,00	2,5704	1,787	0,376
0,30	0,9208	1,091	0,943	10,00	2,8363	1,925	0,204
0,40	1,0528	1,116	0,921	21,0	2,9930	1,980	0,0979
0,50	1,1656	1,144	0,902	51,0	3,0801	1,996	0,0398
0,60	1,2644	1,171	0,883	81,0	3,1028	1,998	0,0250
0,80	1,4320	1,224	0,846	101,0	3,1105	1,999	0,0200

Коэффициент теплообмена α_q можно определить, используя зависимость для критерия Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{V d_{пр}}{\nu}$,

где V – скорость агента сушки, м/с;

$d_{пр}$ - определяющий размер частицы, м;

ν- климатическая вязкость газа, м^2 /с;

Re - критерий Рейнольдса, представляющий собой отношение сил инерции к силам вязкости.

$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_q d_{пр}}{\lambda}$, а для плотного слоя зерна $\mathrm{Nu} = 0{,}075\ \mathrm{Re}$ [12],

или $\alpha_q = 0{,}075 \frac{V\lambda}{\nu}$,

где Nu - критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи).

Для W=18% и $V = 0{,}7$ м/с $\alpha_q = 1{,}629 \frac{кДж}{м^2 \cdot с \cdot град}$, $\mathrm{Bi} = 16{,}492$, $\mathrm{Fo} = 0{,}004\tau$. Тогда уравнение (4.20) запишется в следующем виде:

$$\theta_{R=1} = P_1(\mathrm{Bi})\exp(-\mu_1^2 \mathrm{Fo}) = 2{,}332 e^{-0{,}0343\tau}. \qquad (4.42)$$

$\theta_{от} = (\theta - T)/(\theta_0 - T)$, поэтому температура единичной зерновки при конвективном нагреве может быть найдена из следующего уравнения:

$$\theta = (\theta_0 - T) \cdot 2{,}332 e^{-0{,}0343\tau} + T. \qquad (4.43)$$

В общем виде динамические свойства температуры единичной зерновки при конвективном теплообмене могут быть представлены апериодическим звеном первого порядка $W_\theta(p) = \frac{1}{T_1 p + 1}$, с постоянной времени T_1. Тогда в операторном виде уравнение (4.1) будет представлено как:

$$\theta(p) = (\theta_0 - T(p)) \frac{1}{T_1 p + 1} + \theta_0 + A_5 W(p) p + A_5 W_0 + \frac{1}{p} A_6 Q_v, \qquad (4.44)$$

где $A_5 = \frac{r'}{c_з \varepsilon}$, $A_6 = \frac{1}{c_з \rho_з}$.

В результате проведенных преобразований получена полная система уравнений и передаточных функций, позволяющих выполнять расчет тепло - и влагообмена в элементарном слое зерна при конвективной и СВЧ - конвективной обработке. Запишем её ещё раз:

$$W_p = \left[\frac{ln(1-F)}{5.47\ 10^{-6}(T+273)}\right]^{0,435}, \quad (4.45)$$

$$F = \frac{745\ D}{(622+D)e^{\left(0.622+\frac{7.5\ T}{238+T}\right)}}, \quad (4.46)$$

$$T(p) = T_0\frac{1}{p}(1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}) - A_1\theta(p)p + A_1\theta_0 - A_2W(p)p + A_2W_0, \quad (4.47)$$

$$D(p) = D_0\frac{1}{p}(1 + pe^{-p\tau_1} - e^{-p\tau_1}) - \frac{1}{A_3}W(p)p + \frac{1}{A_3}W_0, \quad (4.48)$$

$$\theta(p) = (\theta_0 - T(p))\frac{1}{T_1p+1} + \theta_0 + A_5W(p)p + A_5W_0 + \frac{1}{p}A_6Q_v, \quad (4.49)$$

$$W(p) = W_p\frac{K}{p+K}. \quad (4.50)$$

С использованием системы компьютерного имитационного моделирования может быть найдено численное решение уравнений с получением значений параметров зерна и агента сушки. Для моделирования использован пакет прикладных программ *Simulink* [170].

При компьютерном моделировании также использован ступенчатый метод. Компьютерная модель, решения записанной ранее системы уравнений, представлена в виде типовых блоков автоматики (рисунок 4.12).

Эта модель описывает процессы тепло и – влагообмена в единичной зерновке при СВЧ – конвективной сушке. Начальные значения температуры и влажности зерна задают с помощью блоков «Константа» «Q0» и «W0» соответственно. Такой подход к построению модели позволяет задавать исходные параметры для каждого слоя зерна в отдельности. При этом может учитываться неравномерность распределения агента сушки по зерновому слою, что отражается на его скорости. Блок «V» используется для задания скорости агента сушки в слое зерна. Температура агента сушки T1 на выходе единичного зернового слоя является входной температурой для последующего, по ходу движения воздуха, единичного слоя зерна. Также относительная влажность воздуха F1 на выходе единичного слоя зерна является входной для последующего слоя зерна.

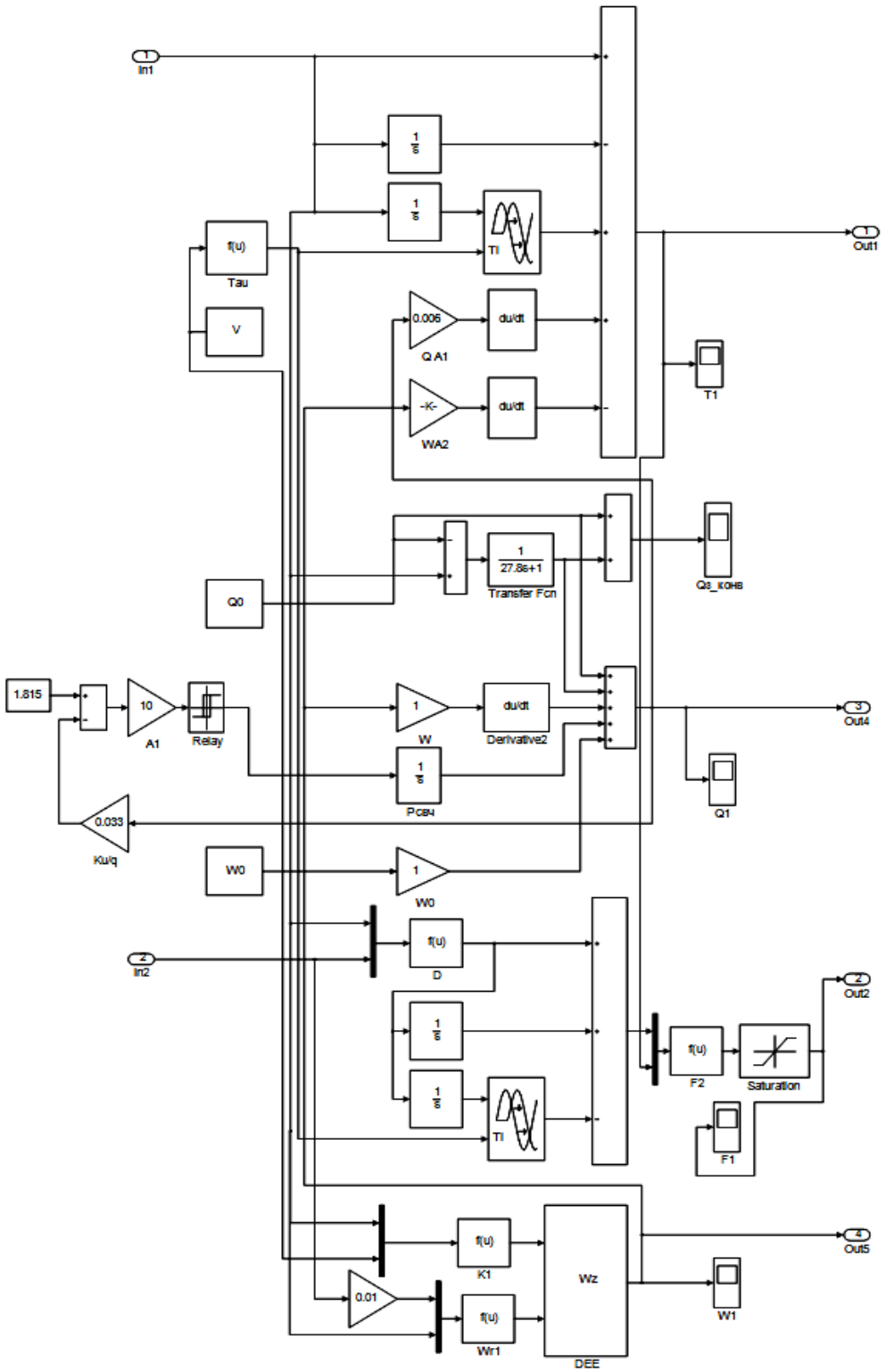


Рисунок 4.12 – Компьютерная модель (Simulink) тепло и – влагообмена в единичной зерновке при СВЧ – конвективном воздействии

Такое построение модели позволяет задавать удельную мощность поля СВЧ, поглощаемую зерном в данной точке зернового слоя. Учитывая, что в зерновом

слое наблюдается неравномерность распределения микроволнового поля, такая возможность делает модель более гибкой в использовании.

При построении компьютерной модели СВЧ - конвективной сушки зернового слоя учитывали результаты моделирования распределения микроволнового поля в СВЧ активной зоне, представленные ранее. Было принято, что толщина зернового слоя, который подвергается СВЧ – конвективному воздействию, составляет 15 см. Это сопоставимо с глубиной проникновения поля СВЧ в зерновой слой пшеницы кондиционной влажности (14%). Приняли допущение, что зерновой слой может быть разделён на участки по 5 см толщиной, в пределах которых микроволновое поле распределено равномерно. Для определения удельной мощности микроволнового поля использовали результаты моделирования, представленные ранее.

Компьютерная Simulink – модель зернового слоя толщиной 15 см, разделённого на три слоя по 5 см, представлена на рисунке 4.13.

Зерновой слой представлен тремя блоками-слоями «Слой зерна», в каждом из которых поле СВЧ имеет разную напряжённость, по аналогии с реальным зерновым слоем. Агент сушки последовательно проходит через все слои. Его входные параметры задают при помощи блоков *Tvh* и *Fvh*.

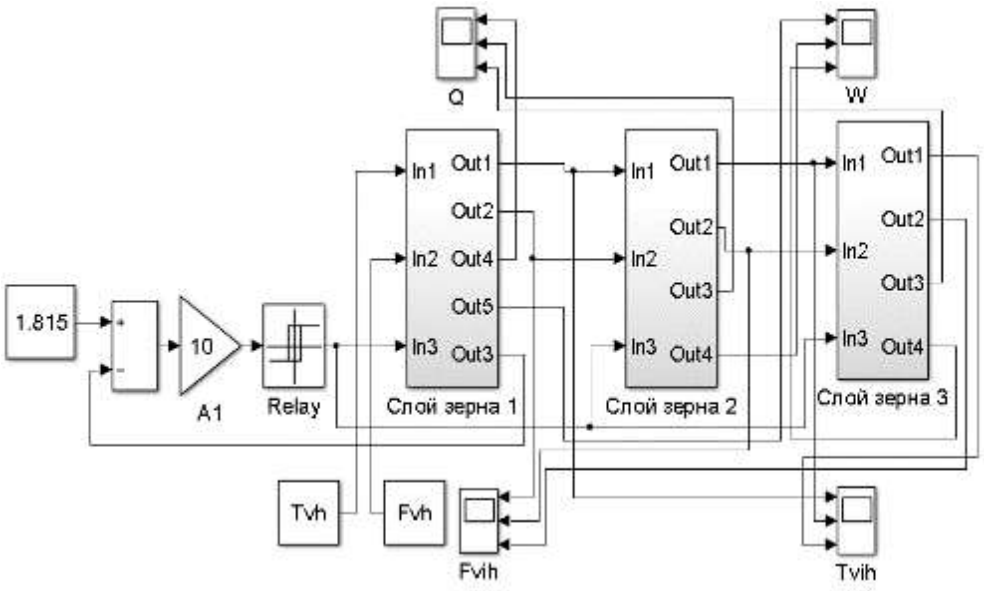


Рисунок 4.13 - Simulink – модель СВЧ – конвективной сушки зерна в плотном слое

С помощью блока Relay управляют включением/выключением магнетронов. Магнетроны отключают, когда температура зерна, в точке наибольшей мощности поля СВЧ, достигает 55°С. На осциллографы выводятся графики изменения температуры зерна в каждом слое (блок Q), влажности зерна в слое (блок W), относительной влажности воздуха на выходе из каждого слоя зерна(Fvih), температуры агента сушки на выходе из каждого зернового слоя (Tvih) [128, 143].

Поскольку удельная энергия, поглощаемая зерном, изменяется в зависимости от влажности зерна и расстояния до магнетрона, то был проведён двухфакторный эксперимент по определению такой зависимости. В следующей главе более подробно будет описана методика эксперимента и используемое оборудование. Здесь же ограничимся только полученными результатами. Результаты эксперимента частично приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Экспериментальные данные по влиянию влажности зерна и расстояния до магнетрона на удельную энергию, поглощаемую зерном

Влажность зерна	Расстояние по оси до магнетрона	Удельная энергия, поглощаемая зерном в точке контроля
1	2	3
W, %	L, см	Q_v, кДж/м^3
21,3	3	3180,3
21,3	6	1458,3
21,3	9	773,7
17,8	3	3146,1
17,8	6	1646,2
17,8	9	703,6
16,9	3	3580,0
16,9	6	1962,0
16,9	9	913,9

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3
15,9	3	3090,4
15,9	6	1916,2
15,9	9	886,6
15	3	3452,0
15	3	3153,3
15	6	1632,5
15	9	861,4
15	6	1578,7
15	9	929,1
13,9	3	3757,6
13,9	6	1572,2
13,9	9	911,4
12	3	3235,4
12	6	1644,8
12	9	1148,9

С использованием полученных экспериментальных данных выполнен регрессионный анализ и получена следующая регрессионная модель:

$$Qv = 5778 - 14{,}92W - 846{,}2L + 0{,}2332W^2 - 3{,}727W \cdot L + 42{,}74L^2. \quad (4.50)$$

Регрессионный анализ проводили с использованием пакета прикладных программ MATLAB.

Коэффициенты модели значимы по критерию Стьюдента. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера. Точность модели оценивается следующими показателями: *SSE*: 1.409e+06; *R-square*: 0.9731; *Adjusted R-square*: 0.9698; *RMSE*: 185.4, что характеризует хороший уровень достоверности.

С использованием уравнения регрессии построена поверхность отклика (рисунок 4.14) изменения удельной энергии.

Уравнение регрессии использовано в компьютерной модели, что позволяет моделировать изменение величины удельной энергии микроволнового поля в зерновом слое в процессе его сушки.

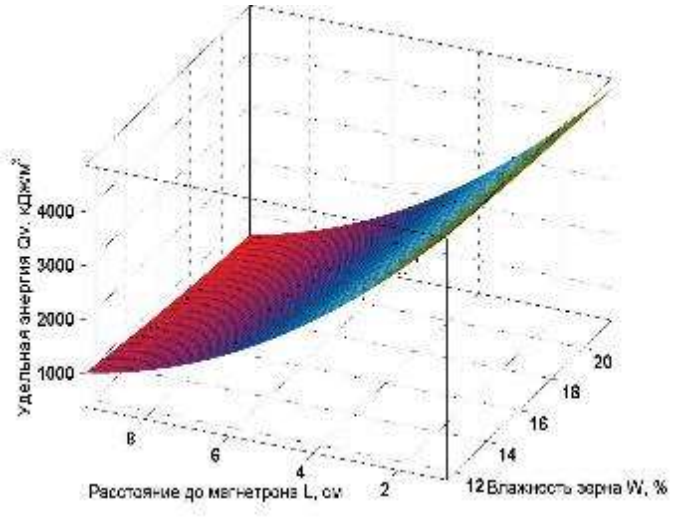


Рисунок 4.14 – Поверхность отклика $Q_v = f(L, W)$

При разработке конструкции СВЧ – конвективных зон важное значение имеет направление движения агента сушки, его температура, равномерность распределения в зерновом слое. Исходя из этого, проводили моделирование процесса СВЧ – конвективной сушки зерна. На рисунке 4.15 показана условная схема расположения слоёв зерна, распространения микроволнового поля и движения агента сушки.

При таком варианте движения агента сушки сначала он проходит через Слой 1 зерна. Поскольку данный слой ближе других расположен к источнику микроволнового поля, то он должен иметь большую температуру, чем Слой 2 и Слой 3. Поэтому, при прохождении воздуха последовательно Слой 1→ Слой 2 → Слой 3 он должен нагреваться от зерна в Слое 1. Затем его температура может, как уменьшаться, так и поддерживаться на постоянном уровне.

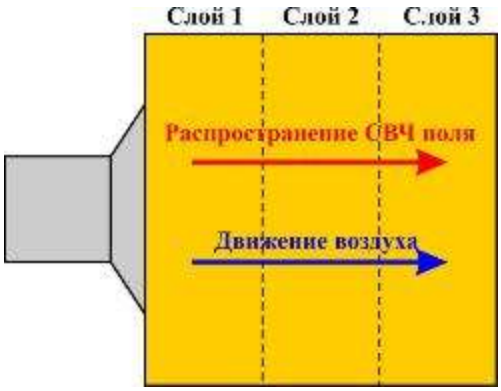


Рисунок 4.15 – Схема расположения зерновых слоёв и распределения в них поля СВЧ и агента сушки (вариант 1)

Всё зависит от конкретных режимов сушки зерна. На рис. 4.16 показаны результаты моделирования изменения температуры зерна по слоям. Моделирование проводили при следующих исходных параметрах: $W_0 = 22\%$; $F_0 = 65\%$; $T_0 = 20$ °С; $V = 0{,}5$ м/с.

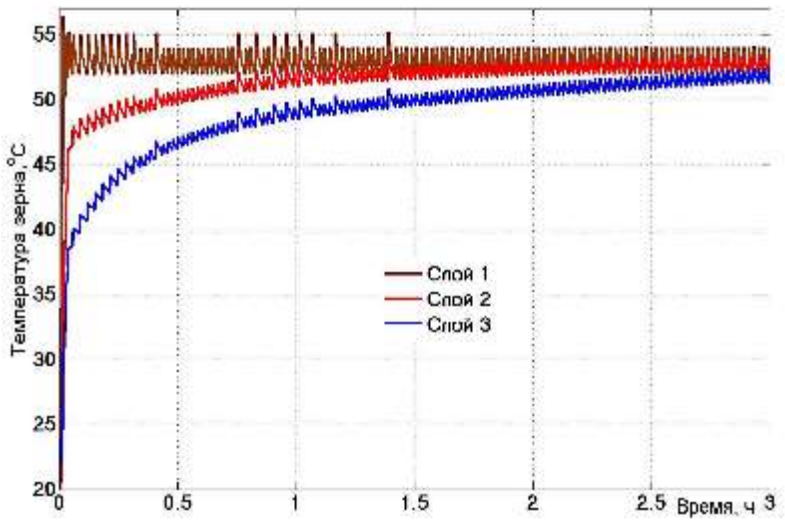


Рисунок 4.16 – Изменение температуры зерна по слоям в процессе СВЧ – конвективной обработки

Изменение температуры воздуха в зерновом слое представлено на рис. 4.17. Результаты моделирования показывают, что температура агента сушки на выходе

зернового слоя «следует» за температурой нагрева зерна. При повышении температуры агента сушки повышается его влагопоглощающая способность. Большее количество влаги выносится воздухом из слоя зерна.

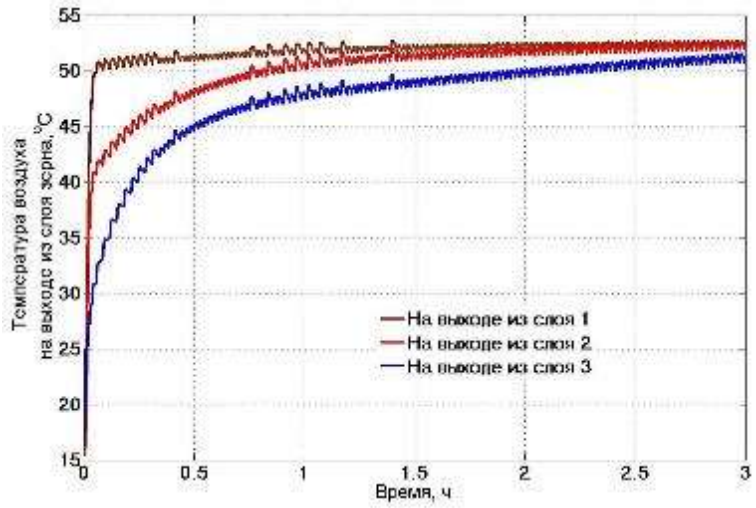


Рисунок 4.17 – Изменение температуры агента сушки на выходе слоёв при СВЧ – конвективной обработке зерна

Изменение относительной влажности воздуха на выходе зерновых слоёв представлено на рисунке 4.18.

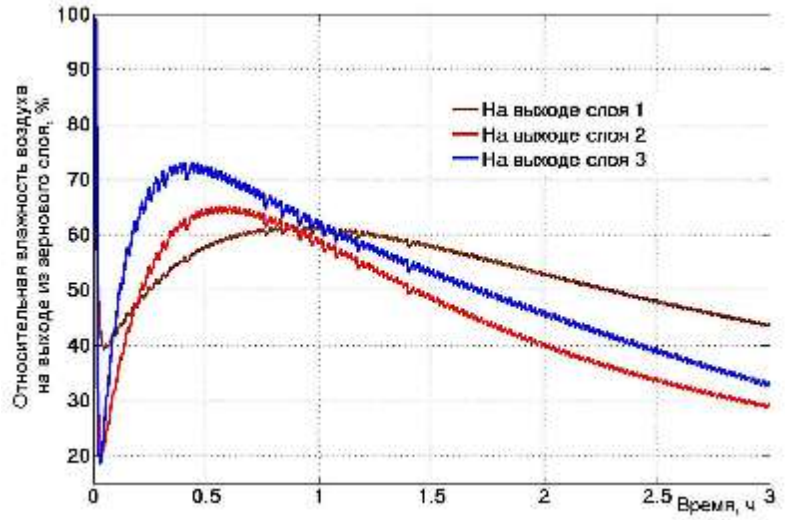


Рисунок 4.18 – Изменение влажности воздуха на выходе зерновых слоёв

Результаты моделирования изменения влажности зерна, представлены на рис. 4.19. Результаты моделирования показывают, что скорость сушки существенно отличается по слоям зерна. Причём максимальная удельная мощность поля СВЧ, поглощаемая зерновым слоем, совершенно не обеспечивает максимальной скорости сушки. Если первый слой не высыхает до кондиционной влажности 14% и за 4 часа, то второй высыхает за 1,5 часа, а третий – за 1,3 часа. При этом средняя влажность всех слоёв достигает 14% за 1,7 часа. Неравномерность влажности по слоям составляет 3%.

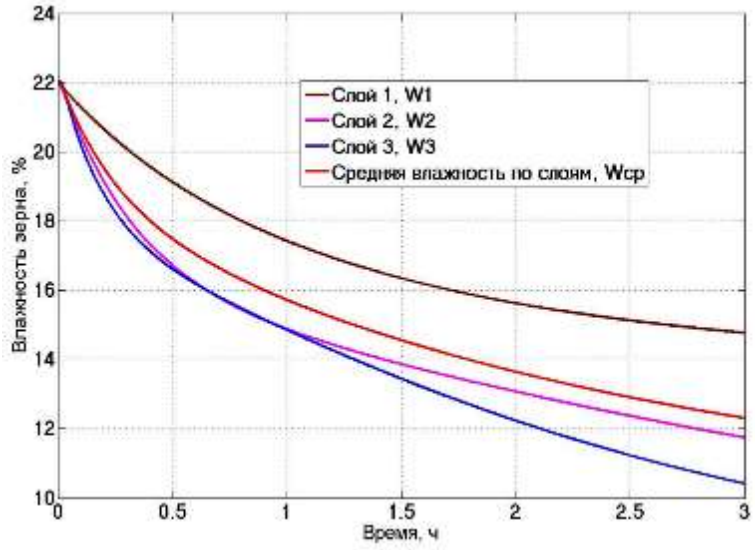


Рисунок 4.19 – Кривые сушки зерна по слоям

По результатам моделирования можно сделать вывод, что такая система воздухораспределения даёт достаточно большую неравномерность высыхания зерна по слоям.

Однако, во многих заявляемых конструкциях СВЧ – конвективных зерносушилок прежде, чем попасть в зерновой слой атмосферный воздух направляют для охлаждения блоков питания магнетронов и самих магнетронов. В результате атмосферный воздух подогревается и уже тёплым подается на сушку зерна. Была поставлена задача промоделировать процесс сушки, когда в зерновой слой подаётся уже подогретый воздух. В качестве исходных параметров агента сушки приняты:; $T_0 = 40^{o}\text{C}$; $F_0 = 15\%$; $V = 0{,}5$ м/с.

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.20. Результаты показывают, что в отличие от предыдущего варианта быстрее всего высыхает зерно в первом слое – за 0,9 часа. Затем, за 1,3 часа, высыхает зерно во втором слое. И только через 1,6 часа высыхает зерно в третьем слое. Средняя влажность слоёв зерна достигнет 14% через 1,25 часа, при неравномерности высыхания по слоям 2%. Получается, что подача в зерновой слой подогретого воздуха ускоряет процесс сушки, снижает неравномерность высыхания зерна.

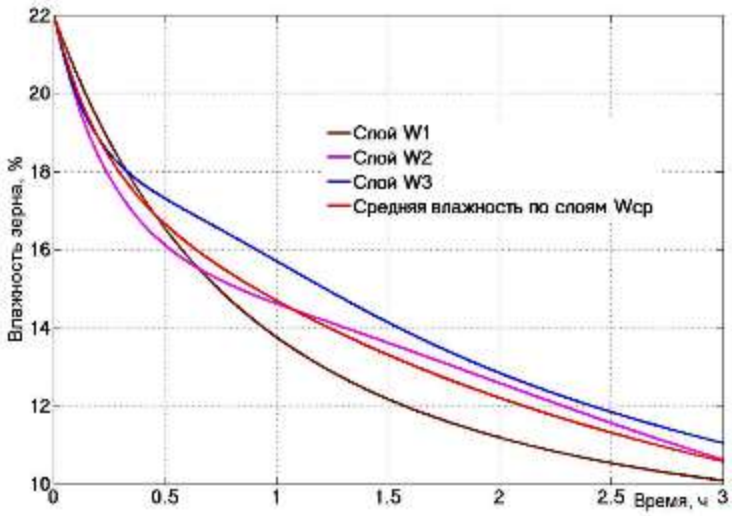


Рисунок 4.20 – Кривые сушки зерна при подогретом воздухе

В конструкции СВЧ – конвективных зон возможна такая схема подачи агента сушки в зерновой слой, при которой он сначала проходит дальний от магнетрона слой зерна (Слой 3), затем последовательно Слой 2 и Слой 1 (рисунок 4.21).

Для определения изменения параметров зерновых слоём и агента сушки при СВЧ – конвективной обработке при таком варианте движения воздуха было проведено моделирование процесса (рисунок 4.22). Моделирование проводили при следующих исходных параметрах: $W_0 = 22\%$; $F_0 = 65\%$; $T_0 = 20$ °C; $V = 0{,}5$ м/с.

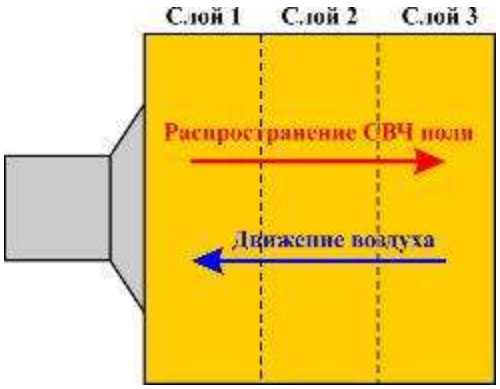


Рисунок 4.21 – Схема расположения зерновых слоёв и распределения в них поля СВЧ и агента сушки (вариант 2)

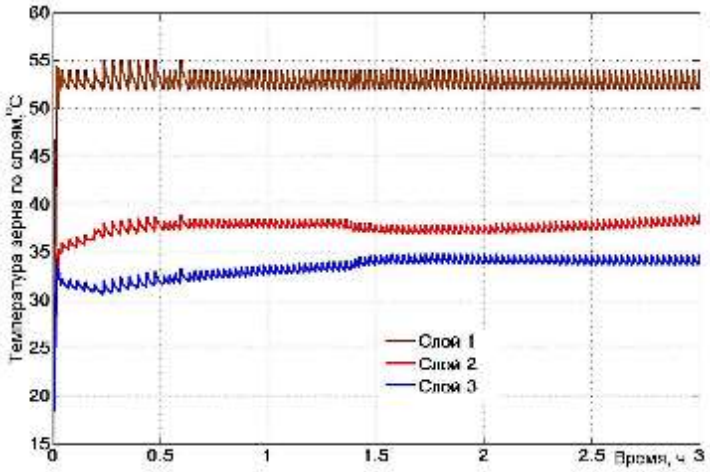


Рисунок 4.22 – Изменение температуры слоёв зерна

Результаты моделирования показывают, что, в отличие от предыдущей схемы движения воздуха, температура зерна во втором и третьем слое не приближается к температуре зерна в первом слое. Это обусловлено тем, что зерно в третьем и втором слоях активно охлаждается агентом сушки, а мощности поля СВЧ не хватает для достаточного нагрева зерна. Схожая картина наблюдается и для изменения температур агента сушки на выходе слоёв зерна (рисунок 4.23).

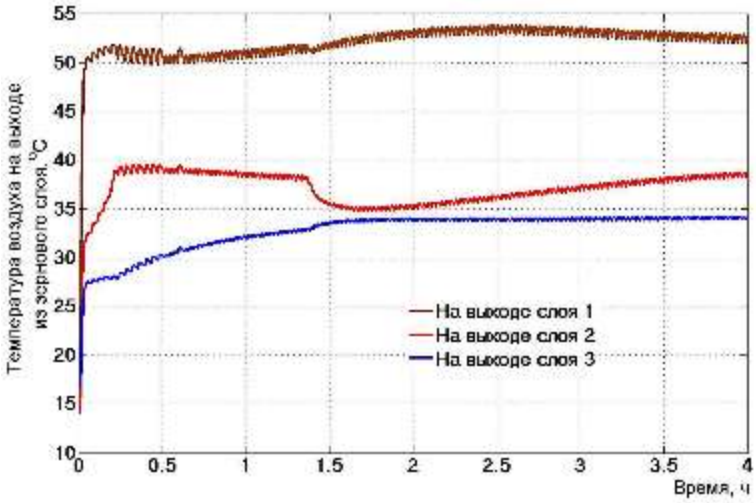


Рисунок 4.23 – Изменение температуры агента сушки на выходе слоёв зерна

При моделировании также были получены кривые сушки (рисунок 4.24). Полученные кривые сушки позволяют говорить, что динамика изменения влажности по слоям существенно отличается от той, которая наблюдалась при другой схеме подачи теплоносителя. Первым, за 1,4 часа высыхает Слой 1. Затем, за 2,5 часа Слой 3, и только через 3,8 часа достигнет влажности 14% Слой 2. При этом средняя влажность по слоям зерна достигнет 14% за 4 часа. Такая ситуация стала возможной потому, что Слой1 стал увлажняться, отбирая влагу и агента сушки, прошедшего через слои 2 и 3.

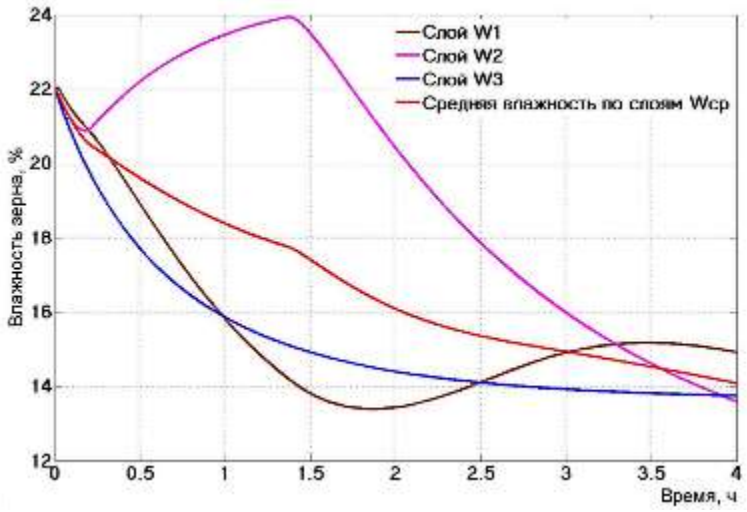


Рисунок 4.24 – Кривые сушки зерна по слоям

По аналогии с предыдущими машинными экспериментами было выполнено моделирование для случая, когда предварительно, перед подачей в зерновой слой, осуществляется подогрев агента сушки. Результаты моделирования представлены на рисунок 4.25.

В качестве исходных параметров агента сушки приняты:; $T_0 = 40$°C; $F_0 = 15\%$; $V = 0{,}5$ м/с. Подача подогретого воздуха в Слой 3 приводит к его быстрейшему высыханию, за 0,8 часа. Вторым высыхает Слой 1 – за 1,5 часа. Слой 2 высыхает до кондиционной влажности за 2,6 часа. Средняя влажность по слоям достигает кондиционного значения за 1,74 часа. Неравномерность влажности зерна по слою, в момент, когда средняя влажность достигает кондиционного значения, составляет 9%. В отличие от предыдущего варианта подачи воздуха увеличение температуры агента сушки хоть и ведёт к увеличению скорости сушки, но значительно увеличивает неравномерность высыхания зерна по слою.

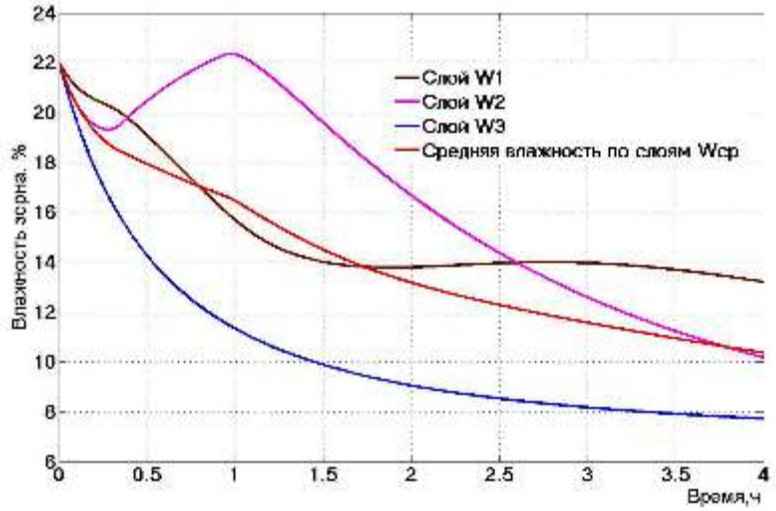


Рисунок 4.25 – Кривые сушки зерна при подогретом воздухе

Делая выводы по результатам моделирования сушки зерна в СВЧ – конвективной зоне следует отметить:

- более эффективной с точки зрения времени сушки и равномерности высыхания зерна по слою является конструкция СВЧ – конвективной зоны обеспечивающая движение агента сушки в слое зерна от слоёв, которые больше нагреваются микроволновым полем к менее нагреваемым слоям;

- предварительный нагрев агента сушки ведёт к увеличению скорости сушки зерна и снижению неравномерности высыхания зерна по слою.

4.6 Разработка управляющих программ

Задача разработки управляющих программ заключалась в разработке технического задания и элементов управляющих программ, обеспечивающих работу универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна.

На основе разработанных алгоритмов функционирования оборудования, с учетом требований технологических процессов разработано техническое задание.

На основании разработанного технического задания на управляющую программу в дальнейшем будет выбрана SCADA система [292, 367], удовлетворяющая заявленным требованиям, и разработана система управления универсального электротехнологического модуля.

Реализация управляющих программ, обеспечивающих функционирование оборудования модуля, может быть выполнена на нескольких уровнях сложности, в зависимости от требуемой производительности, точности регулирования и стоимости используемого оборудования управления. Можно выделить следующие уровни:

1. Для реализации алгоритмов применяются автоматические выключатели, терморегулятор, датчики температуры и уровня. При этом достигается относительная точность управления, а возможности тонкой настройки процесса и исследования минимальны.

2. Для реализации алгоритмов применяются программно-логические контроллеры, интерактивная панель, твердотельные реле, программируемые реле, тер-

морегуляторы, датчики температуры и уровня, автоматические выключатели, твердотельные реле. При этом появляется возможность гибкой настройки процесса управления по выбираемым критериям и граничным условиям.

3. При реализации алгоритмов применяется SCADA-система наряду с оборудованием, указанным в предыдущем пункте. В данном случае исследователь получает возможность наиболее тонкой настройки оборудования и получения показателей процесса.

4. Для реализации алгоритмов применяется оборудование, указанное в предыдущем пункте, совместно с машиной реального времени, которая эмулирует работу части оборудования, либо объекта управления. (Данный уровень не был реализован).

4.7 Лабораторные исследования эффективности работы универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна

Задачей настоящего этапа являлась реализация разработанных моделей и определение энергетических затрат на удаление влаги.

4.7.1 Организация испытаний

В процессе работы проводилось испытание экспериментального образца электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна в соответствии с разработанными ранее моделями оптимального управления. Реализация управляющих программ осуществлялась за счет выбранной аппаратуры управления. В качестве параметров в процессе испытаний принимались температура нагрева зерна, влажность зерна, производительность выгрузного шнека (частота ПЧВ привода выгрузного шнека), скорость воздушного потока агента сушки, расходуемая в процессе работы электроэнергия. Испытания проводились на нескольких видах культур: пшеница, ячмень, тритикале. Испытания были проведены для различной начальной влажности.

4.7.2 Испытательный стенд

Для проведения испытаний был реализован стенд, включающий: модули опроса температуры (МВА8, МВ110-8АС), термопары ТХА, счетчик электрической энергии трехфазный (Меркурий-230), термоанемометр ТТМ-2-02-2, влагомер Фауна-М, весы лабораторные ВК-3000, преобразователь сигналов и другое оборудование. В процессе испытаний разработанные модели реализовывались параллельно на лабораторной установке, включающей 1 магнетрон (рисунок 5.27), и экспериментальном образце модуля, включающей 6 магнетронов.

4.7.3 Разработка исходных требований на лабораторную установку

В рамках работы разработан проект исходных требований на лабораторную установку электрофизического воздействия на зерно (сыпучие материалы).

Основные положения состоят в следующем:

Лабораторная установка должна обеспечивать:

Состояние слоя: плотный неподвижный; плотный малоподвижный; псевдоожиженный; взвешенный.

Режим движения обрабатываемого материала: порционный; непрерывный.

Режим работы магнетронов: постоянный; импульсный; поочередный.

Режим вентиляции: поперечная (сушка в плотном слое); встречно движению материала (псевдоожижение); управление скоростью воздушного потока с помощью ПЧВ.

Блоки питания в отдельном корпусе(корпусах), обеспечивающем требуемый температурный режим.

Воздуховоды: жесткий трубопровод с учетом температуры воздуха до 65 °С; переключение подачи воздуха снизу/поперечно слою; наличие воздухосмесительной камеры; забор воздуха от охлаждения БП и магнетронов; возможность подачи неподогретого воздуха.

Контролируемые параметры: скорость воздушного потока (вход/выход); температура воздуха (наружного, на выходе охлаждения блоков питания, на выходе охлаждения магнетронов, выход смесительной камеры, вход/выход

зернового слоя; температура: каждого БП, каждого магнетрона, в зерновом слое, температурная полоска(вертикальная/горизонтальная); наличие материала: верхний/нижний уровень загрузочного бункера; напряженность поля в слое; влажность воздуха (наружного; на входе в зерновой слой; на выходе слоя); токов БП магнетронов; напряжений БП; мощность, потребляемая установкой.

Конструкция воздухосмесительной камеры содержит: входы (охлаждение БП; наружный с возможностью дополнительного подогрева; ОВС (от озонатора/ионизатора); выходы (по уровням сушки/охлаждения зерна; противопоток для создания взвешенного/псевдоожиженного слоя); отвод для сбрасывания воздуха после охлаждения БП и магнетронов для экспериментов с озоном и аэроионами.

Рабочие зоны (зона активной СВЧ обработки): изменяемая форма продуктопровода; изменяемое расположение и форма волноводов; изменяемые форма и расположение воздуховодов; разделение слоя по зонам фторопластовыми пластинами.

Источники СВЧ мощности (магнетроны): количество магнетронов на уровень 1-2; Частота 915 МГц, 2,45 ГГц; мощность 0,2; 0,6; 0,8; 1; 2 кВт.

4.7.4 Разработка исходных требований на экспериментальную установку исследования автоматизированной системы управления СВЧ - конвективной сушкой зерна

Исходные требования на экспериментальную установку содержат следующие разделы:

- требования к архитектуре автоматизированной системы управления (АСУ);
- требования к функционалу системы АСУ;
- требования к оборудованию системы АСУ;
- требования к объёму телеметрической информации;
- требования к средствам конфигурирования АСУ;
- требования к размещению оборудования АСУ;

- требования к режимам функционирования оборудования системы АСУ;
- требования к документации.

АСУ должна строиться как иерархическая трёхуровневая система мониторинга и управления.

Верхний уровень системы АСУ должен представлять собой программно-технический комплекс на базе SCADA-системы, осуществляющий сбор, обработку, визуализацию, архивирование и передачу данных.

Средний уровень системы должен включать программируемый логический контроллер для выполнения функций сбора, обработки информации и выдачи команд управления исполнительными устройствами.

Нижний уровень должен представлять собой модули ввода вывода измерительной и дискретной информации, первичные датчики и исполнительные механизмы.

Обмен данными с «устройствами связи с объектом» (с промышленными контроллерами и модулями ввода-вывода) в реальном времени через драйверы протоколов. Осуществляется сбор сигналов и выдача команд управления.

Отображение информации о технологическом процессе на экране монитора в удобной и понятной для человека форме (схемы, тренды, тревоги и др. - HMI).

Отображение информации о ходе технологического процесса на панели оператора, включая изменение параметров работы экспериментальной установки и задание специальных коэффициентов и расчетных(табличных)параметров.

Аварийная сигнализация и управление тревожными сообщениями.

Логическая обработка сигналов (блокировки, расчётные величины) и автоматическое/автоматизированное управление.

Архивирование информации и формирование отчетной документации.

Обеспечение связи с внешними приложениями (OPC, взаимодействие на уровне базы данных).

Самодиагностика программно-технического комплекса.

4.7.5 Изготовление и пуско-наладка лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно (сыпучие материалы) с различной плотностью слоя

Разработана лабораторная установка электрофизического воздействия на зерно (сыпучие материалы) с различной плотностью слоя.

В разработанной установке:

Изменение состояния слоя (плотный неподвижный; плотный малоподвижный; псевдоожиженный; взвешенный), осуществляется путем изменения скорости подаваемого агента сушки. Подача агента сушки осуществляется вертикально снизу, а скорость регулируется посредством преобразователя частоты.

Режим движения обрабатываемого материала (порционный; непрерывный), осуществляется изменением скорости работы выгрузного устройства (шнека). При этом управление приводом осуществляется через преобразователь частоты.

Режим работы магнетронов (постоянный; импульсный; поочередный) осуществляется двумя различными способами: программируемое реле, программируемый логический контроллер совместно с промежуточными реле.

Воздуховоды: жесткий трубопровод с учетом температуры воздуха до 65 °С; переключение подачи воздуха снизу/поперечно слою; наличие воздухосмесительной камеры; забор воздуха от охлаждения БП и магнетронов; возможность подачи неподогретого воздуха.

Контроль параметров осуществляется следующим оборудованием (рисунок 4.4-4.7): измеритель скорости потока воздуха ТТМ-2-02-2; термопары К-типа; оптические датчики температуры OSMT-313, емкостные датчики материала, счетчик электрической энергии трехфазный (Меркурий-230). Все приборы работают по интерфейсу RS-485. При этом контролируются параметры: скорость воздушного потока (вход/выход); температура воздуха (наружного, на выходе охлаждения блоков питания, на выходе охлаждения магнетронов, выход смесительной камеры, вход/выход зернового слоя; температура: каждого БП, каждого магнетрона, в зер-

новом слое, температурная полоска (вертикальная/горизонтальная); наличие материала: верхний/нижний уровень загрузочного бункера; напряженность поля в слое; влажность воздуха (наружного; на входе в зерновой слой; на выходе слоя); токов БП магнетронов; напряжений БП; мощность, потребляемая установкой.

Рабочие зоны (зона активной СВЧ обработки). Изменяемая форма продуктопровода достигается возможностью перемещения вертикальных направляющих по двум осям; изменяемое расположения волноводов осуществляется возможностью горизонтального и вертикального перемещения панелей с магнетронами; применяются несколько вариантов панелей с волноводами; изменяемые форма и расположение воздуховодов осуществляются возможностью сборки из типовых элементов.

Источники СВЧ мощности (магнетроны): количество магнетронов на уровень 1-2. В настоящее время применяются магнетроны частотой 2,45 ГГц, но могут быть использованы и на другие частоты (915 МГц, 433МГц).

4.7.6 Система контроля показаний датчиков, выработки и вывода управляющих воздействий для лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно

Для осуществления контроля показаний датчиков, выработки и вывода управляющих воздействий для лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно, отслеживания и протоколирования режима работы и результатов измерений разрабатывалась SCADA-система. В качестве среды для разработки SCADA-системы была выбрана MasterSCADA, в качестве OPC-сервера – Modbus Universal MasterOPC Server. В реализованной SCADA-системе реализовывались [81, 82]:

– измерение и управление скоростью движения зерна за счет регулирования частотным приводом выгрузного устройства;

– измерение и управление скоростью агента сушки за счет регулирования частотным приводом нагнетательного вентилятора;

– контроль температуры воздуха – наружного и после воздухосмесительной камеры;

– управление мощностью нагревателей ступенчатое;

– контроль уровня зерна по датчикам минимального и максимального уровня;

– контроль работы магнетронов по уровням (верхний, средний, нижний);

– выбор режима работы магнетронов (постоянный, импульсный);

– индикация работы вентиляторов охлаждения блоков питания и подачи агента сушки.

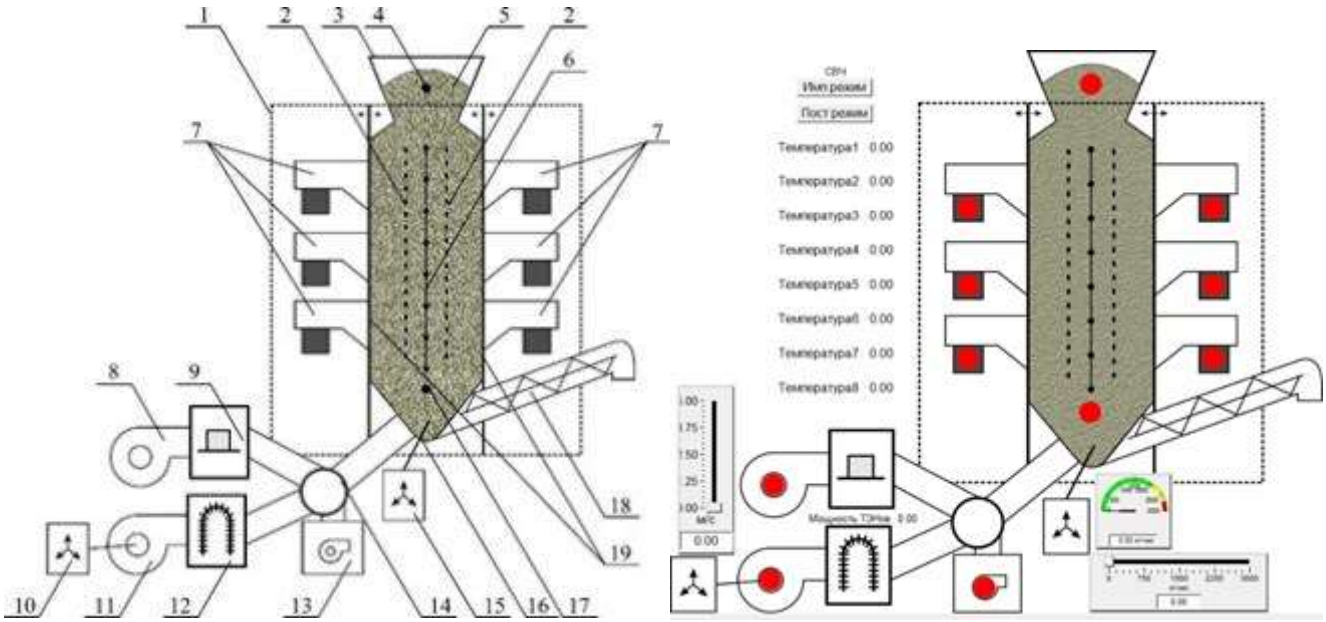
На рисунке 4.12 приведена схема лабораторной установки и мнемосхема SCADA-системы управления и индикации.

Контроль и фиксация потребляемой электроэнергии осуществляется в окне счетчика, отображение текущих температур и их протоколирование осуществляется на окне трендов. Так как подключение осуществляется через один счетчик, то происходит оценка энергоемкости всего процесса обработки в расчете на единицу продукции. При этом для оценки затрат, приходящихся на питание отдельных электропотребителей, необходимо ввести контроль по требуемым позициям. Это позволит определить загруженность и правильность выбора отдельных узлов.

Таким образом, разработанная конструкция лабораторной установки позволит проводить оценку энергоемкости и скорости протекания процессов сушки зерна с применением электрофизических факторов и их комбинации при изменяющихся в широком диапазоне факторах, таких как размеры продуктопровода, плотность зернового слоя, комбинация внешних интенсифицирующих воздействий и т.д.

SCADA-система разрабатывается для набора статистических данных, выработки режимов работы оборудования при термообработке зерновых. Обмен данными и протоколирование данных обеспечиваются по протоколу MODBUS-RTU. Выработка управляющих воздействий осуществляется через устройства вывода

управляющих воздействий. Упрощенно структурная схема системы контроля лабораторного оборудования и параметров процесса сушки зерна представлена на рисунке 4.26, а структурная схема системы контроля на рисунке 4.27.



а б

1 – внешний кожух; 2 – фторопластовые разделительные экраны; 3 – загрузочный бункер; 4 – датчик верхнего уровня материала; 5 – зерновой слой; 6 – подвес с оптическими датчиками температуры; 7 – источники СВЧ с волноводами; 8 – вентилятор охлаждения блоков питания магнетронов; 9 – блоки питания магнетронов; 10 – ПЧВ управления подачей агента сушки; 11 – вентилятор подачи сушильного агента; 12 – блок ТЭН-ов; 13 – аэратор-ионизатор; 14 – воздухосмесительная камера; 15 – ПЧВ управления выгрузкой материала; 16 – выгрузной бункер; 17 – датчик нижнего уровня материала; 18 – выгрузное устройство; 19 – перемещаемые стенки размещения магнетронов

Рисунок 4.26– Лабораторная установка: а – схема установки; б – мнемосхема

В качестве рассматриваемых режимов работы применяются режим постоянного и импульсного воздействия воздействующих факторов. Так для СВЧ-воздействия задаются режим работы, а для импульсного воздействия указываются время импульса и паузы.

Контроль показателей электрической сети (напряжение по фазам, ток, потребляемая мощность и т.д.) осуществляются через интерфейс счетчиков электроэнергии. При этом один счетчик контролирует энергию, потребленную лабораторной установкой с учетом всего оборудования, осуществляющего процесс, а второй фиксирует энергию, поведшую на осуществление электрофизических воздействий.

В таблице 4.6 представлены часть протоколируемых параметров в процессе работы лабораторной установки.



Рисунок 4.27 – Структурная схема системы контроля лабораторного оборудования и параметров процесса сушки зерна

Таблица 4.6 – Протоколируемые параметры

№	Параметр	Описание
1	2	3
1.	U_{a1}	Напряжение фазы А счетчика 1
2.	U_{b1}	Напряжение фазы В счетчика 1
3.	U_{c1}	Напряжение фазы С счетчика 1
4.	I_{a1}	Ток фазы А счетчика 1
5.	I_{b1}	Ток фазы В счетчика 1
6.	I_{c1}	Ток фазы С счетчика 1

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3
7.	P_1	Общая потребленная мощность
8.	U_{a2}	Напряжение фазы А счетчика 2
9.	U_{b2}	Напряжение фазы В счетчика 2
10.	U_{c2}	Напряжение фазы С счетчика 2
11.	I_{a2}	Ток фазы А счетчика 2
12.	I_{b2}	Ток фазы В счетчика 2
13.	I_{c2}	Ток фазы С счетчика 2
14.	P_2	Мощность, потребленная источниками электрофизических воздействий
15.	T_1	Температура 1
	…	
46.	T_{32}	Температура 32
47.	T_{I1}	Время импульса первого уровня магнетронов
48.	T_{P1}	Время паузы первого уровня магнетронов
49.	T_{I2}	Время импульса второго уровня магнетронов
50.	T_{P2}	Время паузы второго уровня магнетронов
51.	T_{I3}	Время импульса третьего уровня магнетронов
52.	T_{P3}	Время паузы третьего уровня магнетронов
53.	V_1	Скорость агента сушки
54.	V_2	Производительность загрузочного шнека
55.	V_3	Производительность разгрузочного шнека
56.	C_1	Наличие материала в загрузочном бункере (верхний)
	…	

Разработанная SCADA-система может быть использована на различных лабораторных установках, что позволяет получить некоторую унификацию и отрабатывать режимы работы оборудования на различном материале и с применением различных способов электрофизического воздействия.

4.7.7 Определение энергоэффективных режимов сушки зерна при СВЧ – конвективном воздействии

6.6.7.1 Постановочный эксперимент

На данном этапе планирование эксперимента направлено на определение энергоэффективных режимов сушки зерна с применением электрофизических факторов, таких как СВЧ, при различных состояниях зернового слоя при учете формы связи влаги в зерне. Очевидно, что наименьшей энергоемкостью будут обладать естественные режимы сушки, однако в этом случае конечный материал может быть

испорчен из-за ограниченного времени безопасного хранения. В качестве рассматриваемых режимов работы применяются режим постоянного и импульсного СВЧ-воздействия. В таблице 4.7 приведены факторы, рассматриваемые при отсеивающем эксперименте и уровни их варьирования. В качестве функции отклика выступают затраты электрической энергии на осуществление процесса сушки. Эксперимент проводился в установке, представленной на рисунке 3.38.

Таблица 4.7 – Значения факторов для получения кривых сушки

№ Ряда	Плотность, ρ, кг/м^3	исходная влажность, W, %	Режим работы СВЧ,	Скорость воздуха, v, м/с	Температура воздуха, T, °С
1	800	17,2	1/3	1,0	20
2	600	17,2	1/3	1,0	20
3	400	16,9	1/3	1,0	20
4	800	17,1	2/3	1,0	20
5	600	16,7	2/3	1,0	20
6	400	17,0	2/3	1,0	20
7	800	16,9	1	1,0	20
8	600	16,8	1	1,0	20
9	400	16,8	1	1,0	20

Так как отсеивающий эксперимент проводился на установке, позволяющей обрабатывать малый объем зерновой массы, то имеет смысл только зависимость относительных отклонений энергоемкости от принятой за исходное.

По результатам отсеивающего эксперимента наименьшей энергоемкостью обладает режим с разряженным слоем зерновой массы и постоянным СВЧ воздействием. При этом наибольшая энергоемкость наблюдается у режима с импульсным воздействием СВЧ на взвешенный слой и в 2,4 раза превосходит затраты в наименее энергоемком режиме. Несмотря на это стоит учитывать, что существенные затраты потраченной энергии (около 50%) тратились на создание псевдоожиженного слоя.

Таким образом, на последующих этапах стоит разделять общую затраченную энергию на процесс и энергию, потраченную на фактор воздействия. Кроме того, объем обрабатываемого материала должен быть увеличен с сохранением равномерности распространения поля в обрабатываемом материале.

Так как измерение влажности зернового материала приборами экспресс-оценки в процессе СВЧ воздействия дает ложные результаты, связанные с изменением формы связи влаги и, как следствие, свойств материала, измерение снижения влажности осуществляется путем взвешивания обрабатываемого объема материала.

Для получения требуемых данных были сняты кривые сушки. После приближения данных стандартной параметрической моделью или моделью, заданной пользователем, оценка качества приближения может быть проведена как графически, так и с использованием различных критериев пригодности приближения: R-square (критерий R-квадрат), Adjusted R-square (уточненный R-квадрат). Кроме того, можно вычислить доверительные интервалы для найденных значений параметров модели, соответствующие различным уровням вероятности, и доверительные полосы для приближения и данных, так же соответствующие различным уровням вероятности. Зависимость изменения влажности зерна, W_3, %, от времени сушки, $t_{\text{суш}}$, мин, может быть представлена следующей зависимостью:

$$W_3 = a_e \cdot e^{-b_e \cdot t_{\text{суш}}} + c_e, \tag{4.51}$$

где a_e, b_e, c_e – коэффициенты модели: a, %; b, мин$^{-1}$; c, %.

В таблице 4.8 приведены данные, полученные в результате статистической обработки кривых сушки.

Зафиксированные в ходе экспериментов данные обрабатывались непосредственно в SCADA-системе, кроме того, выгруженные из лог-файлов данные возможно загрузить в пакеты прикладных программ, такие как Statistica, Matlab, Excel и т.д., для дальнейшей статистической и регрессионной обработки. В таблице 4.9 частично представлены результаты экспериментальных исследований эффективности работы лабораторной установки, содержащей один источник микроволновой мощности по выбранным критериям оптимальности.

Таблица 4.8 – Результаты обработки экспериментальных данных

	a_e	b_e	c_e	R-square	Adj R-sq
1	3,438	0,0911	13,9	0,9819	0,9747
2	3,769	0,07893	13,48	0,9836	0,9754
3	3,293	0,09729	13,57	0,9996	0,9996
4	3,035	0,05973	14,07	0,9911	0,9889
5	3,013	0,04815	13,79	0,9864	0,9825
6	3,332	0,07748	13,81	0,9745	0,966
7	2,959	0,02602	13,95	0,9879	0,9855
8	2,99	0,04361	13,96	0,9727	0,9666
9	2,963	0,05021	13,92	0,9667	0,9584

Таблица 4.9 – Результаты экспериментальных исследований

№	Культура	Влажность, W, %	Влагосъем, ΔW, %	Расход теплоты на кг испаряемой влаги, q, МДж/кг$_{вл}$	Критерий оптимальности
1	пшеница	16	1,5	7,3	Максимальная производительность
2		20	2	4,6	
3		16	1	6,2	Минимальные энергозатраты
4		20	1	3,7	
5	ячмень	16	1,5	7,6	Максимальная производительность
6		20	2	4,8	
7		16	1	6,3	Минимальные Энергозатраты
8		20	1	3,7	
9	тритикале	16	1,5	7,5	Максимальная производительность
10		20	2	4,8	
11		16	1	6,2	Минимальные энергозатраты
12		20	1	3,8	
13	подсолнечник	9	1,5	5,8	Максимальная производительность
14		12	2	3,9	
15		9	1	5,2	Минимальные энергозатраты
16		12	1	3,6	

Анализ результатов экспериментов показывает снижение энергетических затрат относительно сушки в шахтных зерносушилках до 30%, однако выше аналогичных показателей в бункерах активного вентилирования. Наилучшие показатели снижения энергоемкости и интенсификации сушки получены при обработке подсолнечника, это обуславливается более низкими значениями кондиционной влажности и связанными с этим значениями диэлектрических параметров. Оценив состав оборудования и показатели температурного поля в камере СВЧ-обработки

зерна были разработаны новая конструкция модуля и состав оборудования. Доработка конструкции предполагает снижение неравномерности нагрева зерна в процессе обработки, что приведет к увеличению производительности за счет интенсификации тепло- влагообмена.

Помимо указанных рассматривались режимы с импульсным включением источников СВЧ мощности. На следующем этапе проводились исследования для установки, содержащей 6 источников микроволновой мощности (рисунок 3.50, 4.26).

4.7.7.1 Постановочный эксперимент

При проведении исследований работы СВЧ-конвективного модуля рассматривались режимы, представленные в таблице 4.10. Так изменялись режим работы источников СВЧ-мощности: 0 – без использования СВЧ; ½ - в процессе обработки источники СВЧ-мощности работали с перерывами (при этом реализовывался режим 10 с СВЧ – 10 с без использования СВЧ); ¼ - в процессе обработки источники СВЧ-мощности работали с перерывами (при этом реализовывался режим 5 с СВЧ – 15 с без использования СВЧ).

В процессе экспериментальных исследований снимались кривые сушки пшеницы от исходной влажности 20% (рисунок 4.28) [108, 109]. Далее по этим данным получали зависимость скорости влагоудаления в процессе сушки в зависимости от испытуемого режима работы установки (рисунок 4.29). Также вычислялась текущая скорость влагоудаления от текущей влажности пшеницы от испытуемого режима работы установки (рисунок 4.30). В результате были получены зависимости энергозатрат на сушку (испарение 1 кг влаги) пшеницы в зависимости от реализуемого режима тепловой обработки (рисунок 4.31).

Таблица 4.10 – Параметры лабораторного эксперимента

№	СВЧ	$T_{возд}$, °С	$dW/d\tau$, %/мин	q, Дж/кг исп.вл.
1.	0	20		
2.	0	30		
3.	0	40		
4.	¼	20		
5.	¼	30		
6.	¼	40		
7.	½	20		
8.	½	30		
9.	½	40		

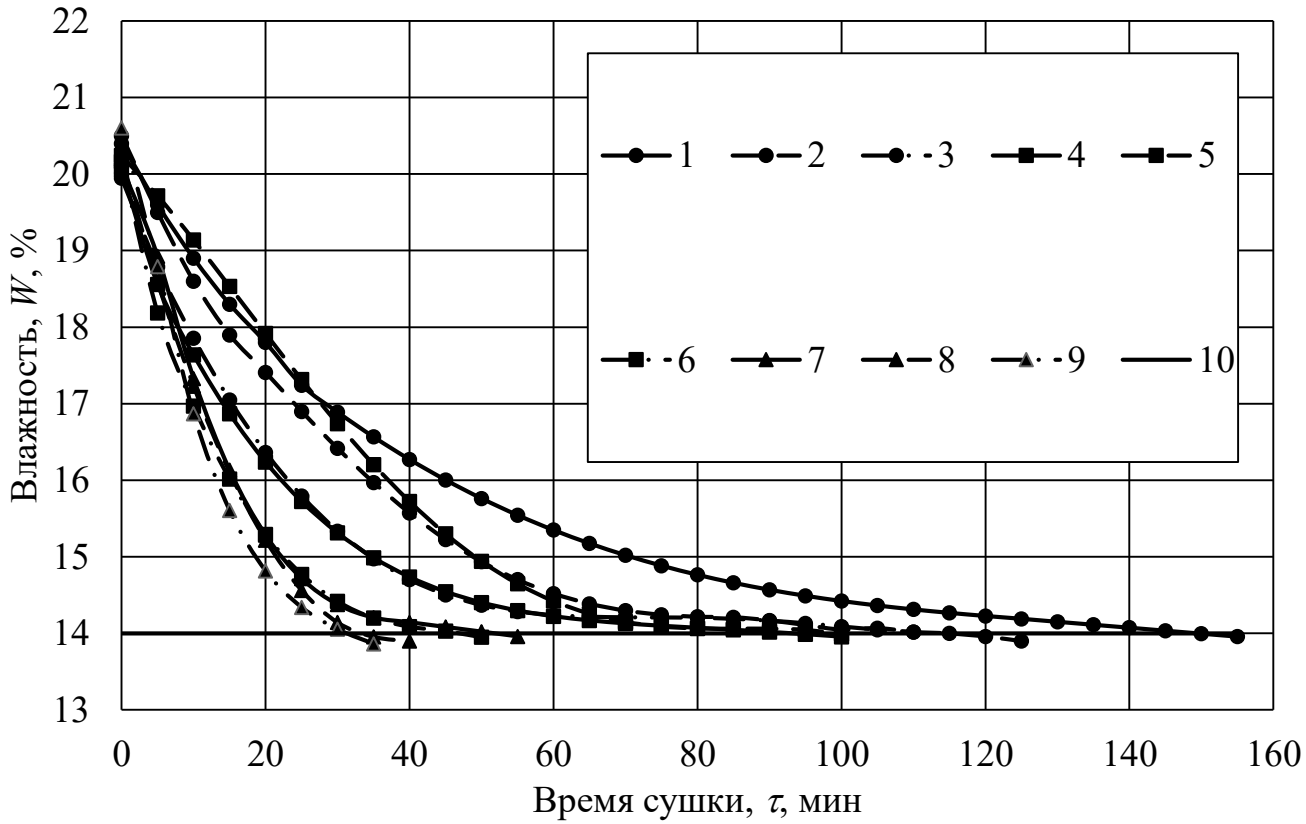


Рисунок 4.28– Кривые сушки пшеницы при лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

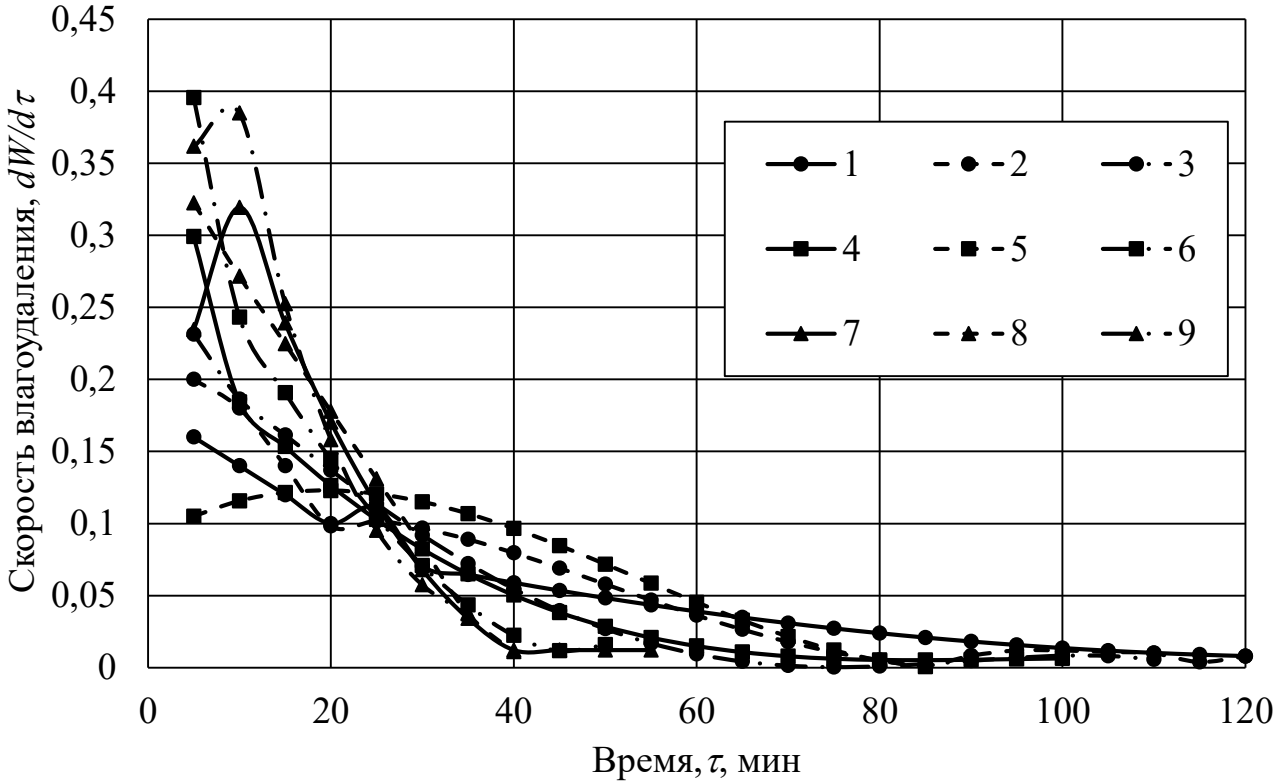


Рисунок 4.29 – Скорость влагоудаления в процессе сушки пшеницы при лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

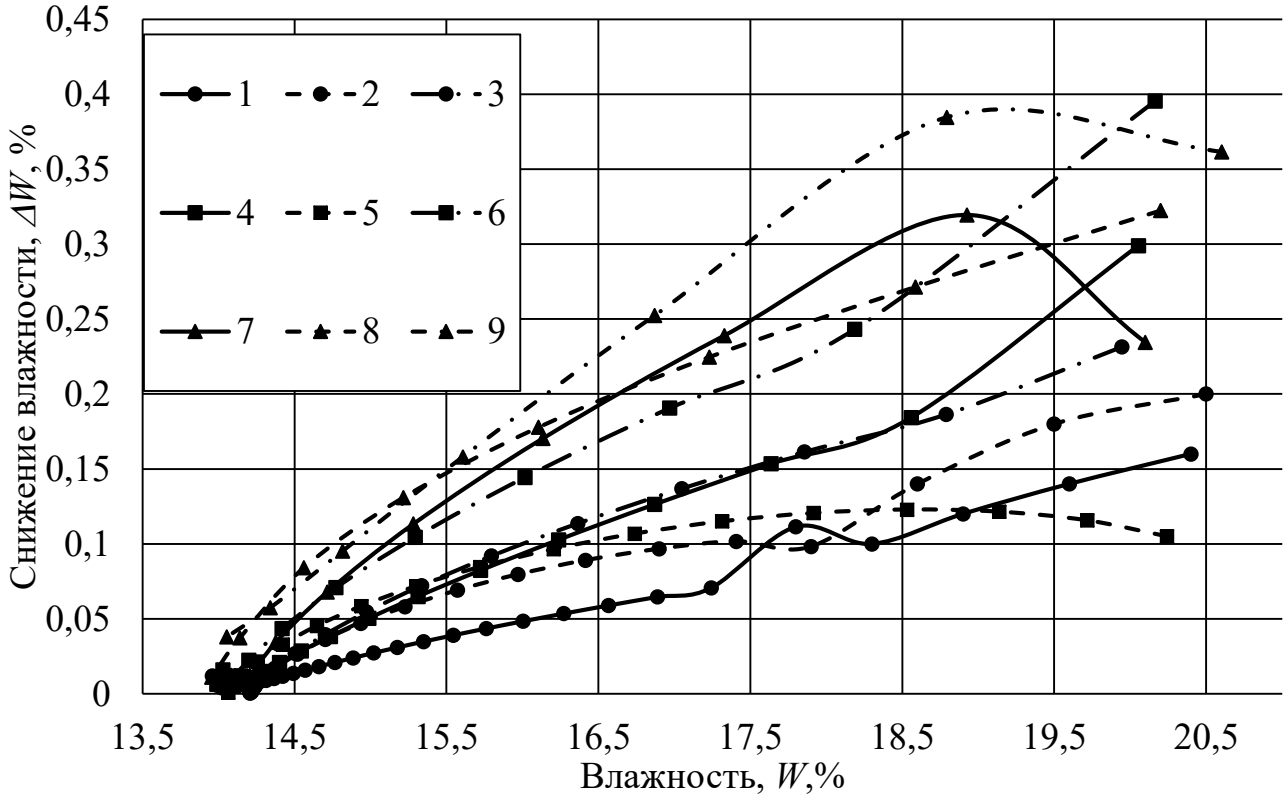


Рисунок 4.30 – Скорость влагоудаления при текущей влажности в лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

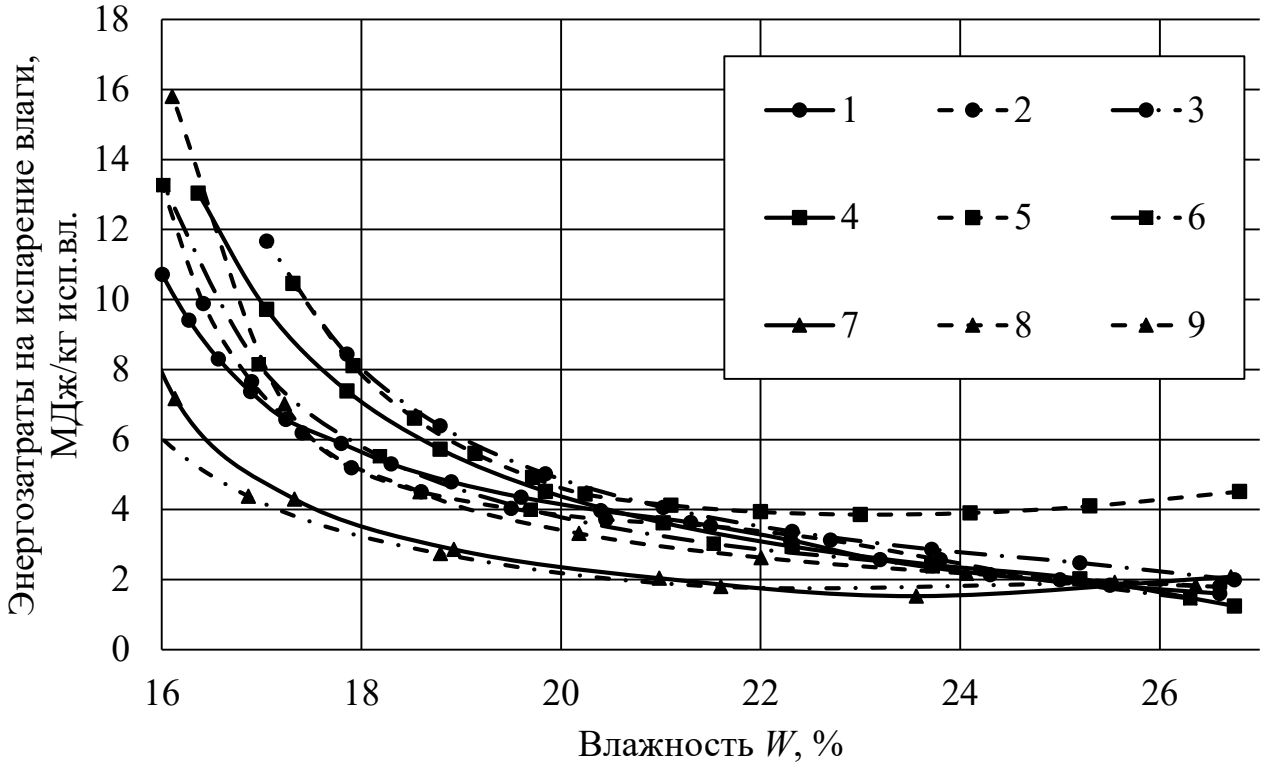


Рисунок 4.31 – Энергозатраты на сушку пшеницы при лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

Как видно из графиков, как скорость влагоудаления, так и энергетические затраты существенно зависят как от режима работы оборудования, так и от текущей влажности. Несмотря на то, что текущие значения энергозатрат на удаление влаги в режимах, с использованием СВЧ мощности могут превышать режимы с использованием в качестве агента сушки подогретого воздуха, итоговые затраты на процесс сушки этих режимов на весь процесс сушки ниже. В таблице 4.11 представлены средние энергозатраты на сушку пшеницы с 20 до 14%, полученные в результате лабораторных испытаний при указанных режимах. Так же стоит принять во внимание то, что применение импульсных режимов воздействия СВЧ аналогичны подогреву агента сушки.

Таблица 4.11 – Средние энергозатраты на сушку пшеницы с 20 до 14%

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Затраты на сушку, МДж/кг исп.вл.	6,17	6,8	8,57	6,1	7,59	4,64	4,36	3,74	3,4
Время сушки, мин	180	145	135	110	130	60	65	50	35
Доля, приходящаяся на СВЧ нагрев, %	0	0	0	31	24	20	47	39	33
Доля, приходящаяся на подготовку агента сушки, %	40	57	67	28	43	53	21	35	45
Доля, приходящаяся на вентиляцию, %	60	43	33	41	33	27	32	26	22

Эти результаты позволяют доработать разработанные модели управления оборудованием и реализовывать управление процессом обработки по заданным критериям оптимальности.

4.8 Дополнительные возможности совершенствования процессов обработки зерна с применением электрофизических воздействий

При учете необходимости обеспечения требований к обеспечению уровня автоматизации технологических процессов [39, 166] необходимо рассмотреть возможность применения дополнительных возможностей электротехнологических воздействий при сушке зерна. Как указывалось ранее, одним из вариантов проблемы снижения энергоёмкости и увеличения производительности сушки зерна является использование электротехнологий.

Достаточно хорошо отработана технология сушки зерна с использованием озона [159-161, 163]. В данной технологии концентрации озона, как правило, выходят за нормы ПДК, что накладывает соответствующие ограничения и требования на соблюдение условий по охране труда. Однако исследования, проводимые различными авторами [172, 294, 330, 368] указывают на высокую эффективность влияния воздействия низкой интенсивности на растительные клетки.

Использование воздуха, насыщенного аэроионами для предпосевной обработки зерна [355] показало, что воздействия низкой интенсивности позволяют добиваться требуемого эффекта при меньших энергозатратах. Применение информационного похода к описанию поведения зерновки, как биологического объекта, позволило разработать принципы интенсификации сушки зерна. В соответствии с разработанными принципами снижение энергоёмкости и увеличение производительности процесса сушки зерна возможно: при применении электротехнологического воздействия «низкой мощности»; при использовании циклических, периодических внешних электротехнических воздействий.

Для реализации данных принципов использовали режимы сушки зерна с циклическим насыщением агента сушки аэроионами. Предварительными исследованиями установлено, что целесообразно использовать такой режим, при котором агент сушки в течение 5 мин. насыщается аэроионами, а в течение последующих 5 мин. сушка проводится воздухом без аэроионов. Процесс продолжается циклически до высыхания зерна до требуемой влажности. При насыщении агента сушки аэроионами обеспечивают их концентрацию на уровне $3{,}5 \cdot 10^{10}$м$^{-3}$.

Насыщение аэроионами агента сушки и условия его взаимодействия с зерном отражаются во вводимом критерии электроактивации $Q_Э$ [136].

При циклическом насыщении агента сушки аэроионами критерий электроактивации должен отражать особенности режима, выражающиеся в соотношении времени сушки при воздействии аэроионов и без них. В этом случае критерий электроактивации будет выглядеть следующим образом:

$$Q_Э = Q_a \cdot (v \cdot S \cdot \tau_{aэ}), \tag{4.52}$$

где Q_a – концентрация аэроионов на входе в зерновой слой, 1/м^3;

v – скорость агента сушки, м/ч;

S – площадь поперечного сечения рабочей камеры для сушки зерна, м^2;

$\tau_{aэ}$ – полупериод колебаний концентрации аэроионов в агенте сушки, ч.

$$\tau_{aэ} = \tau_a + \tau_б, \tag{4.53}$$

где $\tau_{aэ}$ – полупериод колебаний концентрации аэроионов в агенте сушки, ч;

τ_a – время работы генератора аэроионов за одно включение, ч;

$\tau_б$ – время, в течение которого генератор аэроионов выключен, ч.

Для описания процесса сушки зерна в толстом слое активным вентилированием и радиальной подаче агента сушки В.И. Анискин разработал критериальное уравнение [12]:

$$\text{Но} = A \cdot \text{Ко}^{\alpha_d} \cdot \text{Gu}^{\beta_d} \cdot \text{Re}^{\gamma_d} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{\omega_d}. \quad (4.54)$$

Каждый критерий описывает механизм внутреннего или внешнего тепловлагообмена [122, 167].

Критерий гомохронности, *Но,* описывает продолжительность сушки зернового слоя при постоянной скорости агента сушки.

$$\text{Но} = \frac{\nu_s \cdot \tau_s}{L}, \quad (4.55)$$

где υ_s – скорость агента сушки, м/ч;

τ_s – продолжительность сушки, ч;

L – толщина зернового слоя, м.

Критерий Коссовича, Ко*,* отражает соотношение между теплом, затраченным на испарение влаги, и теплом, расходуемым на нагрев зерна:

$$\text{Ко} = \frac{r \cdot \Delta w}{c_З \cdot \Delta \Theta}, \quad (4.56)$$

где w – влажность зерна, о.е.;

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

$c_З$ – теплоемкость зерна, кДж/кг·°С;

Θ – температура зерна, °С.

Критерий Гухмана, *Gu*, характеризует потенциальные возможности воздуха как агента сушки:

$$\text{Gu} = \frac{t_C - t_M}{273 + t_C} \quad (4.57)$$

где t_C – температура агента сушки, °С;

t_M – температура «мокрого термометра», °С.

Критерий Рейнольдса, Re, отражает гидродинамический режим движения агента сушки:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu_з}, \tag{4.58}$$

где V – скорость агента сушки, м/с;

d – приведенный диаметр зерновки, м;

$\nu_з$ – кинематическая вязкость воздуха, м^2/с.

Термодинамические критерии, использованные В.И. Анискиным для описания процесса, в полной мере отражают его, но пока мы не касаемся применения электроактивированного воздуха. В некоторой степени критерий Коссовича может отражать процессы в зерновке при воздействии на неё электроактивированным воздухом. Однако этого может оказаться недостаточным. Поэтому целесообразно дополнительно применить критерий, который бы смог отразить изменение процессов в зерновке. В качестве такого термодинамического критерия может быть принят критерий Лыкова.

Критерий А.В. Лыкова связывает между собой интенсивность развития полей влагосодержания и температуры внутри материла в процессе влагопереноса:

$$\mathrm{Lu} = \frac{a_m}{a}, \tag{4.59}$$

где a– коэффициент теплообмена, м^2/с;

a_m – коэффициент диффузии влаги, м^2/с.

В результате критериальное уравнение сушки зерна активным вентилированием с применением аэроионов будет выглядеть следующим образом:

$$\mathrm{Ho} = A \cdot \mathrm{Ko}^{\alpha_d} \cdot \mathrm{Gu}^{\beta_d} \cdot \mathrm{Re}^{\gamma_d} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{\omega_d} \cdot Q_Э^{\lambda_d}. \tag{4.60}$$

Данное уравнение применимо для описания закономерностей тепло- и влагообмена при сушке толстого слоя. В частном случае, когда проводятся исследования элементарного слоя, параметрическим критерием d/L можно пренебречь, тогда критериальное уравнение будет описывать процессы, происходящие в элементарном слое, и может быть использовано в качестве базового для построения имитационных моделей сушки зерна.

Для практических вычислений удобнее использовать не само критериальное уравнение, а полученное из него выражение для времени сушки

$\tau_s = f(\mathrm{Lu}, \mathrm{Ko}, \mathrm{Gu}, \mathrm{Re})$. Современные методы обработки экспериментальных данных позволяют сразу получать такие зависимости. Необходимо учитывать, что в этом случае коэффициент A' будет иметь размерность времени.

Таким образом, критериальное уравнение времени сушки элементарного слоя будет иметь следующий вид:

$$\tau_s = A' \cdot \mathrm{Lu}^{\chi_d} \cdot \mathrm{Ko}^{\alpha_d} \cdot \mathrm{Gu}^{\beta_d} \cdot \mathrm{Re}^{\gamma_d} \cdot Q_{\text{Э}}^{\lambda_d}. \quad (4.61)$$

Проведение многофакторного эксперимента по слушке тонкого слоя зерна тремя режимами позволило получить уравнения регрессии для времени сушки:

– Уравнение для продолжительности сушки зерна без аэроионов;

$$\tau_s = 1277{,}7185 \cdot \mathrm{Lu}^{0{,}5759} \cdot \mathrm{Gu}^{-6{,}1123} \cdot \mathrm{Ko}^{1{,}1898} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1539}. \quad (4.62)$$

– Уравнение для сушки зерна с постоянной концентрацией ионов

$$\tau 1_s = 9190{,}482 \cdot \mathrm{Lu}^{0{,}6119} \cdot \mathrm{Gu}^{-6{,}1527} \cdot \mathrm{Ko}^{1{,}2820} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}3115}. \quad (4.63)$$

– Уравнение для сушки зерна с циклической подачей ионов

$$\tau 2_s = 13603{,}68 \cdot \mathrm{Lu}^{0{,}6751} \cdot \mathrm{Gu}^{-6{,}7517} \cdot \mathrm{Ko}^{1{,}4336} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}2765}. \quad (4.64)$$

Отличие уравнения (6.34) от уравнения (6.33) по теплофизической сущности заключается в том, что в уравнении (6.34) отображается дополнительный эффект от применения электроактивированного воздуха. Следовательно, уравнение (4.64) можно записать так: $\tau 1_s = \tau_s \cdot Q$, откуда получим $Q = \tau 1_s / \tau_s$. Поскольку мы имеем два уравнения регрессии для режимов с использованием электроактивированного воздуха, то и критерия Q будем использовать два: Q_p – для постоянной концентрации аэроионов; Q_c – для переменной концентрации аэроионов.

Следовательно, $Q_p = \tau 1 / \tau$, а $Q_c = \tau 2 / \tau$. Выполнив соответствующие математические действия получим:

$$Q_p = 7{,}1929 \cdot \mathrm{Lu}^{0{,}0360} \cdot \mathrm{Gu}^{-0{,}0404} \cdot \mathrm{Ko}^{0{,}0922} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1576}. \quad (4.66)$$

$$Q_c = 10{,}6469 \cdot \mathrm{Lu}^{0{,}0992} \cdot \mathrm{Gu}^{-0{,}6394} \cdot \mathrm{Ko}^{0{,}2438} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1226}. \quad (4.67)$$

Ранее было отмечено, что использование циклического режима насыщения аэроионами агента сушки позволяет задействовать биологические реакции зернового слоя. Значит уравнение (5) можно представить так:

$$Q_c = Q_p \cdot Q_{cb}, \quad (4.68)$$

где Q_{cb} – критерий электроактивации, отражающий в теплофизических величинах биологическую реакцию зерна на циклические режимы воздействия электроактивированным воздухом.

Выполнив преобразования, получим:

$$Q_{cb} = \frac{Q_c}{Q_p} = 0{,}6469 \cdot L\mathrm{u}^{0{,}0632} \cdot \mathrm{Gu}^{-0{,}599} \cdot \mathrm{Ko}^{0{,}1516} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1516} \quad (4.69)$$

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить критериальное уравнение для описания процесса сушки зерна с использованием электроактивированного воздуха как при его постоянной концентрации в агенте сушки, так и при режимах циклического насыщения его аэроионами. Сравнительный анализ полученных уравнений позволил получить математическое описание термодинамических реакций зерна на циклические режимы насыщения агента сушки аэроионами.

Однако данные исследования проведены для лабораторной установки, применение же электроактивации воздуха совместно с СВЧ-конвективным воздействием требует дальнейших исследований.

4.9 Выводы по разделу

1. Динамические свойства зернового материала изменяются в зависимости от продвижения по толщине в направлении вентиляции при равных значениях удельной мощности электромагнитного поля.

2. В большинстве случаев для качественного описания поведения зернового слоя при описании переходной функции с помощью ARX-модели, требуется уравнение третьей степени.

3. Разработку моделей оптимального управления целесообразно производить по критериям минимальных энергозатрат и минимальному времени сушки с учетом граничных условий.

4. Моделирование процесса управления, реализованное в виде компьютерной модели Simulink, позволяет прогнозировать изменение параметров обрабатываемого слоя и параметров процесса по слоям обрабатываемого материала.

5. При разработке алгоритма управления необходимо учитывать возможность переключения режимов работы оборудования при меняющихся условиях и критериях выполнения процесса, при этом реализацию управляющих программ необходимо производить в продуктах, позволяющих компилирование программ для серийно-выпускаемого оборудования.

6. Реализация управляющих программ в виде SCADA-системы позволяет не только реализовывать заданные режимы работы управления, но и накапливать большой объем статистической информации для накопления сведений и дальнейшей доработки компьютерных моделей и управляющих программ.

7. В зависимости от выбранного режима работы оборудования источников микроволнового поля и подготовки агента сушки позволяет сократить энергозатраты на сушку в 1,7-2,4 раза либо значительно сократить время процесса сушки.

8. Наиболее целесообразно применение режимов сушки с использованием источников СВЧ при уровнях влажности зерна ниже 18 %.

9. В качестве дальнейшего развития применения электрофизических факторов при послеуборочной обработке зерна целесообразно исследование применения электроактивации агента сушки, применяемого для сушки либо охлаждения зернового слоя, обрабатываемого СВЧ-конвективным способом.

10. Режимы работы оборудования для проведения тепловой обработки зерна (прежде всего сушки), определяющиеся целевыми функциями по заданному критерию эффективности, при этом реализация управления по минимуму энергозатрат обеспечивает снижение энергоемкости сушки зерна в областях близких к кондиционной до 3,4 МДж на испарение килограмма влаги, а по критерию минимального времени сушки обеспечивается снижение времени сушки на 42%.

5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЧ МОДУЛЯ

На основе теоретических и экспериментальных испытаний были разработаны несколько вариантов исполнения установок СВЧ конвективной обработки зерна (рисунок 5.1). В разное время испытания проводились в условиях фермерских хозяйств, экспериментального зернового производства, машинно-испытательной станции (приложение Г).



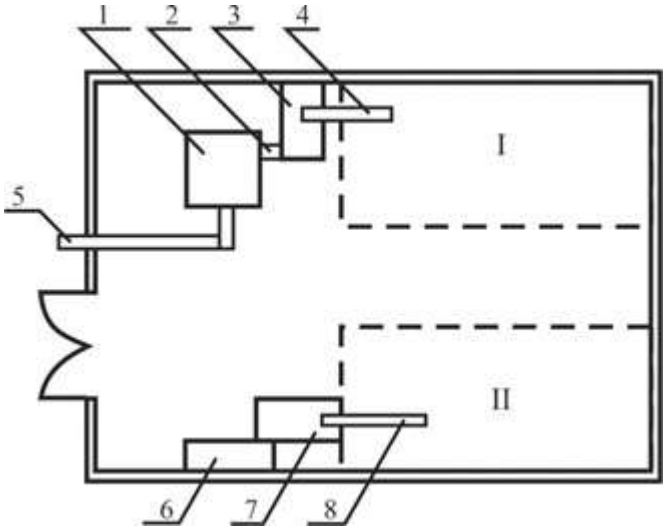
Рисунок 5.1 – Производственная проверка модулей СВЧ-конвективной обработки зерна

5.1 Производственные испытания

В качестве примера производственных испытаний, рассмотрим испытания, проведенные совместно с ФГБУ «Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция». Испытания производились в период июнь – август 2013 года силами сотрудников ФГБУ «Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция» с участием представителей организации - разработчика. Место проведения испытаний - ООО «Куриловское СХУМЭС», Собинский район, Владимирской области. Испытания проведены по рабочей программе-методике, разработанной сотрудниками ФГБУ «Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция». Состав оборудования кормоцеха ООО «Куриловское СХУМЭС» [70] представлен на рисунке 5.2.

Оборудование функционирует следующим образом. Автотранспорт въезжает в здание кормоцеха через ворота и разгружает зерновой материал в бурт у одной из сторон помещения I или II в зависимости от исходной влажности. В случае если зерно обладает повышенной влажностью, то оно помещается в сектор II, от куда шнековым транспортером подается в дробилку 7, далее дробленое зерно расфасовывается по мешкам и загружается в транспорт для отправки в животноводческие цеха. В случае зернового материала кондиционной влажности, оно разгружается в сектор I, при этом в обоих случаях материал может состоять из зерна различных культур, в зависимости от условий рациона. Из сектора I зерновой материал через гибкий рукав пневмотранспортера 4 подается в дробилку 3. И далее в кормосмеситель 1. Из кормосмесителя комбикорм может расфасовываться в мешки для перевозки или в кормораздатчик, располагаемый снаружи кормоцеха по транспортеру 5. Наличие двух линий кормоприготовления обусловлено тем, что дробилка 3 и, соответственно, кормосмеситель 1, рассчитаны на работу с материалом кондиционной влажности. В случае же, когда по определенным причинам, например поступление с поля во время уборки, влажность повышена, зерно поступает в сектор II и перерабатывается дробилкой 7 и кормосмесителем 6, которые, не смотря

на возможность обработки такого материала, обладают повышенным энергопотреблением и худшими показателями качества конечного корма, это связано с значительной изношенностью и устареванием данного оборудования.



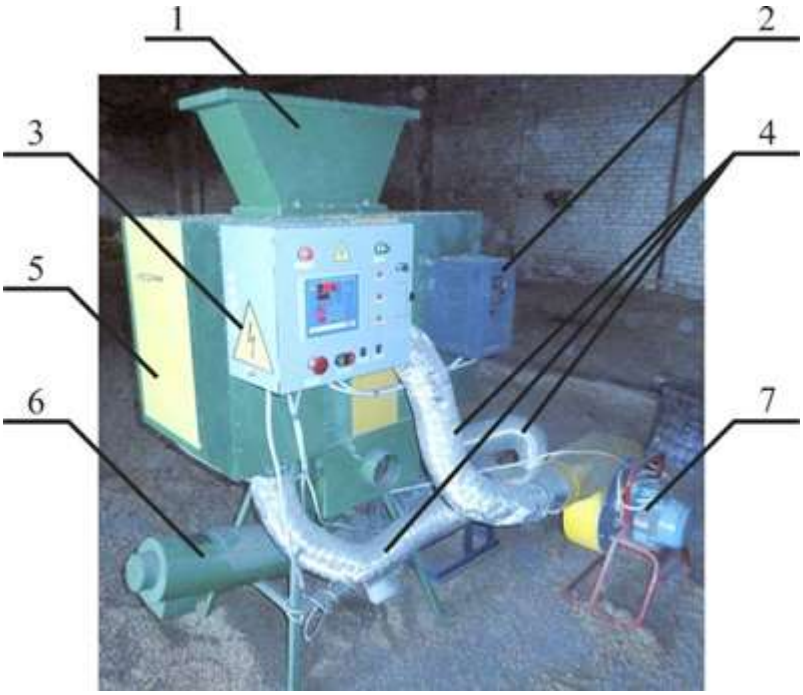
1 – кормосмеситель ССК-2,3-В; 2 – рукав подачи дробленого зерна в кормосмеситель; 3 – дробилка ДКР-1; 4 – рукав подачи зерна в дробилку; 5 – транспортер выгрузки комбикорма в кормораздатчик/тару; 6 – кормосмеситель; 7 – дробилка; 8 – транспортер подачи зерна в дробилку

Рисунок 5.2 – Схема кормоцеха

Оборудование, представляемое на испытания, показано на рисунке 5.3 и включает в себя: загрузочный бункер, СВЧ модуль с электрическими щитами управления, выгрузной шнек, два вентилятора: обдува магнетронов и охлаждения зерна, воздуховоды. Принцип работы применяемого оборудования основан на воздействии на зерно полем СВЧ. Задавая различные режимы – управляя мощностью излучения и скоростью прохождения обрабатываемого продукта, а также скоростью агента сушки возможно осуществлять сушку, обеззараживание и жарку зерна [224].

Данное оборудование может работать в обеих линиях кормоприготовления с целью подсушки и обеззараживания зерна. Электрооборудование модуля включает в себя три электродвигателя, модуль СВЧ обработки зерна с шестью магнетронами

общей мощностью 5,4 кВт, а также элементы их управления. Обдув зерна и охлаждение магнетронов производится двумя радиальными вентиляторами, которые установлены на собственных рамах и соединены с СВЧ модулем гибкими воздуховодами. Привод вентиляторов осуществляется асинхронными электродвигателями мощностью 1,5 кВт каждый. Привод шнека выгрузки обработанного зерна производится асинхронным электродвигателем мощностью 0,18 кВт, который управляется преобразователем частоты, т.е. скорость движения зерна через установку может плавно регулироваться.



1 – Загрузочный бункер; 2 – ПЧВ с панелью управления; 3 – щит управления; 4 – воздуховоды охлаждения и сушки; 5 – СВЧ-модуль; 6 – выгрузной шнек с приводом; 7 – вентилятор охлаждения и сушки зерна

Рисунок 5.3 – Оборудование, представленное на испытания

Условия проведения испытаний представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Условия испытаний

Показатель	Значение показателя при испытаниях			
	лабораторно-полевых и эксплуатационно-технологических			на надежность
Культура, сорт	фуражное зерно зерновых колосовых			
Режим сушки	продовольственный			продовольственный
Вид работы	Обеззараж.	поджарка	сушка	
Температура, °С:				
- наружного воздуха	19,0	19,0	16,2	15-23
- внутри камеры	77,0	110,0	50,0	50-110
Относительная влажность наружного воздуха, %	52,5	52,5	83,5	45-85
Влажность исходного материала, %	12,34	12,45	18,75	12-19

Результаты испытаний, представлены в таблице 5.2. По результатам испытаний получены протоколы испытаний (приложение Ж, З). Условия проведения испытаний на всех видах обработки зерна соответствовали требованиям ТЗ на разработку данного модуля и СТО АИСТ 1.13-2012. Полных результатов по обеззараживанию зерна получить не удалось, поскольку представленное на обработку свежеубранное зерно не было заражено микотоксинами, но имело заражённость выше ПДК по микробиологическому показателю КМАФАнМ. Режимы работы по выполнению операций соответствовали эксплуатационной и нормативной документации. Внутри камеры создавалась температура: при сушке 50 °С; при поджарке 110 °С; при обеззараживании 77 °С. Контроль технологического процесса выполнялся лабораторными приборами. При этом так же учитывались показания приборов контроля температурного режима на выходе СВЧ излучателей и температуры зерна в зоне выгрузки, которыми оборудован модуль.

В результате испытаний выявлено, что при сушке зерна снижение влажности за один пропуск составило 1,01% (до 6% по данным СТО АИСТ 1.13-2012). При исходной влажности 18,75 % (до 35 % по СТО АИСТ 1.13-2012) после сушки получена влажность 17,74 % (13-14 % по данным СТО АИСТ 1.13-2012). Из чего следует, что для использования данного модуля в качестве сушильного оборудования необходимо агрегатирование сушилки с учетом требуемых производительности и влагосъема, формируя ее в виде последовательно-параллельного расположения модулей с применением единой системы управления и соответствующим выбором

вентиляционного оборудования. Поджаренные, распаренные и обугленные зерна отсутствовали (по СТО АИСТ 1.13-2012 их наличие не допускается). Дробления зерна при обработке не наблюдалось (по СТО АИСТ 1.13-2012 допускается до 0,1 %).

Протокол испытаний №791 от 18.09.2013 г., выданный Федеральной службой по ветеринарному и фитосанитарному надзору ФГБУ «ВНИИЗЖ» подтверждает снижение микробиологического показателя КМАФАнМ за один проход через универсальный модуль с $1{,}3 \cdot 10^6$ КОЕ/г до $8{,}9 \cdot 10^5$ КОЕ/г. Для снижения данного микробиологического показателя до нормативного значения ($5 \cdot 10^5$ КОЕ/г) требуется повторная обработка зернового материала в модуле, или использование агрегата из нескольких модулей.

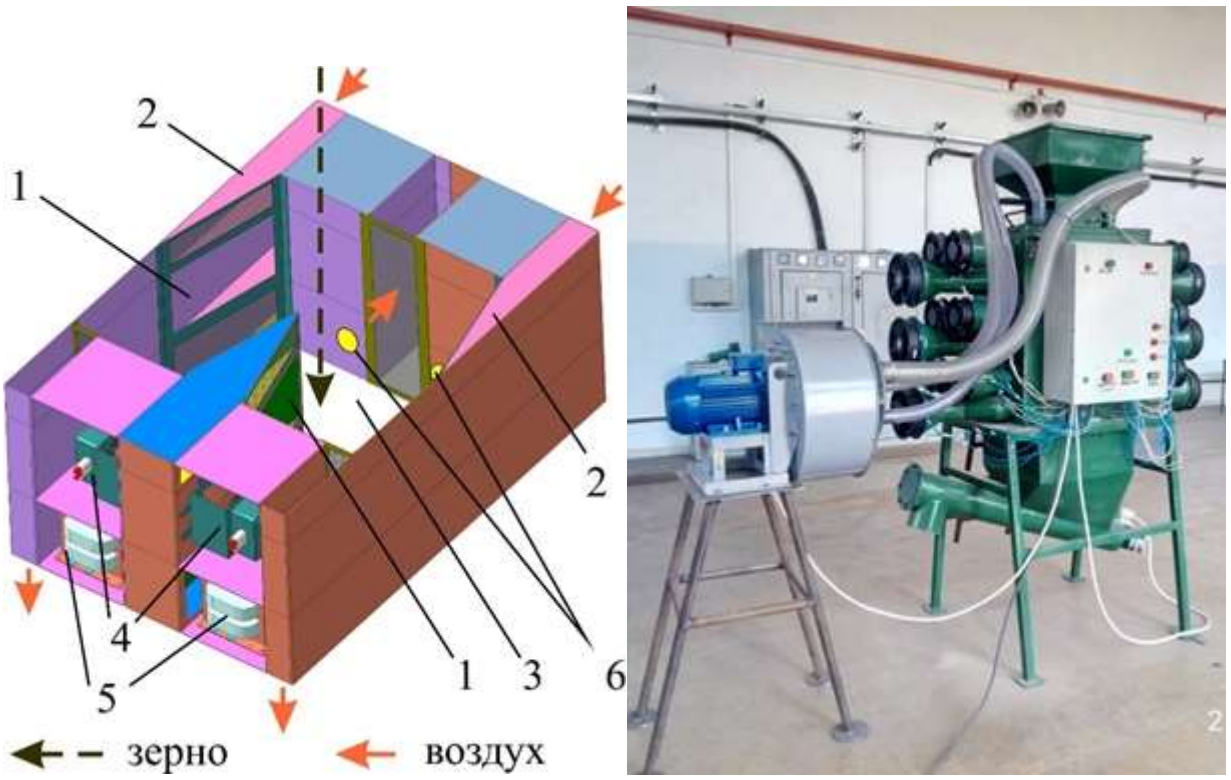
Таблица 5.2 – Агротехнические показатели при испытаниях

Показатель	Значение показателя		
Вид работы:	Обеззараж.	поджарка	сушка
Способ обработки	СВЧ	СВЧ	СВЧ
Производительность, кг/ч:	241,2	96,0	194,0
Влажность материала, %:			
- до обработки:			
Среднее / стандартное отклонение, ±%	12,34 / 0,15	12,45 / 0,35	18,75 / 0,15
- после обработки:			
Среднее / стандартное отклонение, ±%	11,87 / 0,17	11,92 / 0,30	17,74 / 0,10
Коэффициент устойчивости процесса сушки	1,13	0,86	0,67
Неравномерность сушки (поджарки):			
- предельное отклонение от среднего, ±%	0,26	0,32	0,19
- стандартное отклонение, ±%	0,15	0,30	0,10
Температура материала, °С:			
- до обработки / после обработки	19,0 / 46,0	19,0 / 47,0	16,0 / 25,1
Чистота зерна после обработки, %	98,6	98,6	98,6
Массовая доля поджаренных, распаренных и обугленных зерен, %	0	0	0
Содержание дробленого зерна, %:			
- до обработки / после обработки	0,6 / 0,6	0,3 / 0,3	0,3 / 0,3
Дробление, %	0	0	0
Снижение влажности зерна за один цикл, %	0,47	0,53	1,01
Количество испаренной влаги, кг/ч	-	-	1,97

В результате проведенных испытаний установлено, что после доработки конструкции, принцип универсального модуля для СВЧ – конвективной обработки и сушки, может быть использован в технологических линиях по обработке зерна.

На основе приведенных ранее результатов моделирований и результатов представленных установок была разработана следующая установка (рисунок 5.4). На рисунке 5.4а представлена модель сечения зоны СВЧ-конвективной обработки, реализованной в экспериментальном образце универсального СВЧ –конвективного модуля с блоком автоматизированного управления (рисунок 5.4б).

На конструкцию универсального СВЧ – конвективного модуля для сушки и обеззараживания зерна получен патента Республики Казахстан (приложение Б).



а б

1 – волноводы, 2 – воздуховоды; 3 – продуктопровод, 4 – магнетроны, 5 – блоки питания, 6 – датчики косвенного определения влажности зерна

Рисунок 5.4 – Пример модуля установки СВЧ-конвективной обработки зерна: а – модель сечения зоны СВЧ-конвективного воздействия; б – образец модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

Модульная установка предназначена для построения систем тепловой обработки зерна при послеуборочной подработке, обработке в процессе хранения и подготовке к скармливанию. СВЧ модуль подвергали к испытаниям в производственных условиях на базе аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «Казахский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства». Испытания проведены на зерне пшеницы «Саратовская 26» в следующих значениях влажности: при обеззараживании – 13,34%, при поджарке – 13,45%, при сушке – 18,75%. Установлены оптимальные значения производительности универсального СВЧ модуля при обработке зерна пшеницы на операциях: обеззараживание – 245,2 кг/ч; поджарка – 140,0 кг/ч; сушка – 239,8 кг/ч.

Установлено, что температура зернового материала до и после обработки при сушке составляет 16°С и 25,1°С соответственно. При этом в обработанном материале не обнаружены поджаренные, распаренные и обугленные зерна, а также не происходило дробление зерен. Внутри СВЧ камеры создавалась температура: при обеззараживании: 77°С, при поджарке: 110°С, при сушке: 50°С. Контроль технологического процесса выполнялся автоматическим измерением температуры зернового материала.

При исходной влажности 18,75 % после сушки получена влажность 13,74% за один проход. Из чего следует, что для доведения зерна до требуемой влажности хранения достаточно одного цикла СВЧ обработки зерна.

Установлены удельные расходы энергии на осуществления процесса СВЧ обработки: для обеззараживания – 46,87 кВт·ч/т; для поджарки – 83,3 кВт·ч/т; для сушки – 48,39 кВт·ч/т. При пересчете затрат энергию на испаренную влагу получаем q=2,9 МДж/кг исп.вл. Как видно, на сушку и обеззараживание зерна расходуется энергии на 1,7 раза меньше, чем на поджарку.

5.2 Оценка экономической эффективности внедрения разработки

5.2.1 Краткое описание проекта

Оценка экономической эффективности рассматривалась как оценку результатов инновационного проекта по совершенствованию линии первичной переработки зерновых культур за счет применения автоматизированной системы энерго- и ресурсосберегающей технологии сушки зерновых культур [186, 190, 208].

Оцениваемый рынок сушилок в России составляет от 1 до 1,5 млрд руб. в год. На данный момент существуют несколько поставщиков техники для СВЧ-конвективной сушки зерновых продуктов, но их установки обладают либо небольшой производительностью, либо сложны в обслуживании. Рассматриваемая установка уже заинтересовала иностранных инвесторов с точки зрения развития технологии и покупателей, для совершенствования своего технологического процесса. В настоящий момент компания продолжает активные НИОКР в данном направлении.

Потребность в зерносушилках в России на данный момент составляет 300-400 штук в год. На рынке представлены зерносушилки итальянских, австрийских, немецких и французских компаний (приложение А). Из российских производителей лидирующие позиции занимает «Воронежсельмаш» и «Мельинвест».

Предлагаемые модули прежде всего предназначены для построения зерносушилок производительностью 3-5 тонн/час. Данная производительность в сочетании с низкими энергетическими затратами на обработку зерна низкого уровня влажности позволит снизить себестоимость обработки продукции и повысить рентабельность производства зерновых.

Стоимость зерносушилок производительностью 5 тонн в час колеблется от 2900 до 5300 тыс. руб.

Коэффициент обновления основных фондов в сельском составляет в среднем 15% и незначительно колеблется с течением времени. Из этого можно сделать вывод, что потребность в оборудовании и в зерносушилках, в частности, сохранится в ближайшие 10 лет.

В данной работе рассматривается инновационный проект по совершенствованию линии первичной переработки зерновых культур за счет применения автоматизированной системы энерго-ресурсосберегающей технологии сушки зерновых культур.

Использование данных СВЧ - модулей, обеспечивающих электрофизическое воздействие при сушке и термическом обеззараживании, позволяет проводить прямой нагрев материала, минуя агент сушки и снижая потери тепла, рассеиваемого в атмосферу. Кроме того, возможно использование воздуха, используемого для охлаждения блоков питания и магнетронов в качестве агента сушки.

Так как предлагаемые конструкции выполнены в виде модульных конструкция, то обеспечение требуемой производительности обеспечивается набором установки из нескольких модулей, совмещаемых как вертикально, так и параллельно. При этом система управления и сбора показаний остается единой. Кроме того, конструкция модулей и то, что обработка при сушке осуществляется в поточном режиме, позволяет встраивать их в существующие технологические линии (например, в зерноочистительные комплексы) в качестве дополнительного оборудования. То, что в предлагаемой установке осуществляется прямой нагрев позволяет существенно повысить эффективность сушки зерна с влажностью 18-15 %.

Так как в качестве источников микроволновой мощности используются магнетроны малой мощности (дешёвые в эксплуатации и простые в обслуживании) их обслуживание происходит с установленной правилами эксплуатации периодичностью, контроль работоспособности возможен в процессе работы, а плановые замены осуществляются через 1000 часов работы.

Сервисное обслуживание установок может быть осуществлено как собственными силами сельскохозяйственной организации при наличии соответствующего штата сотрудников, так и с привлечением сервисной службы предприятия поставщика. Стоимость и объем выполняемых работ зависят от производительности установки и условий эксплуатации и определяется конкретным технологическим процессом, в котором будет задействовано оборудование.

Данная технология может быть применена как для построения зерносушильного оборудования, так и для встраивания в существующие линии, в том числе в ЗАВы. Применение данного оборудования позволяет снизить потери зернового материала от порчи в процессе хранения на 20-40%, снизить энергоемкость процесса тепловой обработки на 20-30% и интенсифицировать его, тем самым, повысив производительность на 5-10%.

5.2.2 Расчет экономической эффективности универсальных модульных конструкций для тепловой обработки зерна с использованием поля СВЧ

Расчет проводится на основании действующих методик, стандартов и нормативных документов [186, 190, 208] с учетом среднегодового уровня инфляции.

Основными показателями экономической оценки применения электротехнологий при сушке зерна являются снижение энергетических затрат на обработку единицы продукции, снижение себестоимости процесса сушки зерна, снижение потерь продукции, а также получаемый на предприятии годовой эффект в виде чистого дисконтированного дохода (*ЧДД*).

Сельскохозяйственные предприятия в настоящее время работают в условиях рыночной экономики и инфляции. Чистый дисконтированный доход определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу (году, кварталу, месяцу), или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

$$ЧДД = \sum_{i=0}^{T}(P_t - И_{эt})\frac{1}{(1+E_p)^{t_p}} - K_{\Sigma} \qquad (5.1)$$

или

$$ЧДД = -K_{\Sigma} + (P - И_э) \cdot K_{сд}, \qquad (5.2)$$

где P_t – результаты, достигаемые на шаге расчета t_p, руб.;

$И_{Эt}$ – эксплуатационные затраты на шаге расчета t без учета капиталовложений, *руб.*;

t_p – горизонт расчета, лет;

K_{Σ} – сумма дисконтированных капиталовложений, руб.;

$K_{сд}$ –коэффициент суммы дисконтирования, рассчитываемый по формуле:

$$K_{сд} = \sum_{i=0}^{T} \frac{1}{(1+E_p)^t}, \quad (5.3)$$

где E_p – норма дисконта капитала с поправкой на инфляцию; является реальной процентной ставкой, которая учитывает инфляцию:

$$E_p = \frac{100+E_{ЦБ}}{100+r} - 1, \quad (5.4)$$

где r – уровень инфляции, %;

$E_{ЦБ}$ – ставка процента банка, %.

Сумма дисконтированных капиталовложений рассчитывается по формуле:

$$K_{\Sigma} = \sum_{t=0}^{T} K_t \frac{1}{(1+E_p)^t}, \quad (5.5)$$

где K_t – капиталовложения на шаге расчета t_p, руб.

При определении коммерческой эффективности используется показатель потока реальных денег, другое название Cash Flow. Потоком реальных денег $Ф_t$ называется разность между притоком ($П_t$) и оттоком ($О_t$) денежных средств на каждом шаге расчета.

В данной работе приведен расчет для предприятия с посевными площадями 2000 Га в средней полосе Российской Федерации. При этом за базовый валовой сбор зерна, подвергающегося обработке, принят объем в 4,800÷5100 тонн. При расчетах условия эксплуатации принималась идентичными. Были рассмотрены несколько производимых серийно установок по сушке зерна, в том числе с применением электротехнологий такие как Агрохит-5 (таблица 5.3), Vesta5 (Таблица 5.4), АСТ-3 и другие.

Таблица 5.3 – Характеристики ИК-зерносушилки

Показатель	Единицы измерения	Агрохит-5
Производительность	т/ч	5
Габариты (ДхШхВ)	м	7,35×3,2×4,15
Энергопотребление (среднее)	кВт/ч	50
Установленная мощность	кВт	130
Вес	т	6

Таблица 5.4 – Технические характеристики тепловой зерносушилки

Показатель	Единицы измерения	Vesta5
Производительность, пшеница съем влаги с 20% до 14,5% съем влаги с 19% до 15%	т/ч	5
Габариты (ДхШхВ)	м	5,35×5,0×8,5
Установленная мощность	кВт	12
мощность тепловая, газового воздухонагревателя	кВт	440
мощность тепловая, жидкостного воздухонагревателя	кВт	450
расход топлива на тонну/%, природный газ	$м^3$	1,1
дизельное топливо	кг	1
Вес	т	9

В качестве базовых вариантов приняты современные установки: Агрохит-5, выпускаемая заводом зерносушилок Агромиг, город Воронеж и Vesta5, выпускаемая АО «Мельинвест», г. Нижний Новгород. Производительность данных установок, составляет в среднем 5000 кг/ч.

В данной работе предусматривают одноразовые капиталовложения и получение одинаковой годовой экономии по всему горизонту дисконтирования, за который принимается срок службы рассматриваемого оборудования, то чистый дисконтированный доход рассчитывается с использованием коэффициента суммы дисконтирования.

Капитальные вложения определяется по формуле:

$$К_в = Ц \cdot к_д, \quad (5.6)$$

где $К_в$ – капитальные вложения, руб.;

$Ц$ – цена приобретения оборудования, руб.;

$к_д$ – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на транспортировку, монтажные и снабженческо-торговые расходы.

Капиталовложения для обоих предлагаемых вариантов рассчитываются с учетом дополнительных затрат на доставку и монтаж, которые составляют до 20% от стоимости оборудования.

Эксплуатационные затраты по использованию технологического оборудования для сушки зерна можно определить по формуле:

$$И_э = З + А + Т_р + С_э + С_{эт} + П_р, \quad (5.7)$$

где $З$ – годовой фонд заработной платы, руб.;

$А$ – амортизационные отчисления, руб.;

$Т_р$ – затраты на ремонты и техническое обслуживание, руб.;

$С_э$ – годовые затраты на электроэнергию, руб.;

$С_{эт}$ – годовые затраты на топливо, руб.;

$П_р$ – прочие затраты, руб.

Годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала рассчитывается по формуле:

$$З = (Т_{год} \cdot \tau_{час}) \cdot a_п \cdot a_{доп} \cdot a_{отн}, \quad (5.8)$$

где $Т_{год}$ – годовая трудоемкость работы, чел.·ч;

$a_п$ – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда, принимается в размере 1,2…1,4;

$a_{доп}$ – коэффициент, учитывающий размеры дополнительной оплаты труда, принимается в размере 1,12…1,16;

$a_{отн}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на все виды страхования, принимается 1,26;

$\tau_{час}$ – часовая тарифная ставка, 121,82 руб.

Годовая трудоемкость работы рабочих, занятых при обслуживании зерна в базовом и предлагаемом вариантах, определяется по формуле:

$$Т_{год} = Т_{дн} \cdot t_{сут} \cdot Z, \quad (5.9)$$

где $Т_{дн}$ – число дней работы в году;

$t_{сут}$ – продолжительность работы в день, ч;

Z – количество обслуживающего персонала, чел.

Годовая трудоемкость технического обслуживания базового оборудования и предлагаемого оборудования для сушки зерна определяется по формуле:

$$Т_{год}^{пр} = О \cdot t_{у.е.э.}, \quad (5.10)$$

где O – объем работ по соответствующему варианту, у.е.э.;

$t_{у.е.э.}$ – численное значение одной у.е.э., чел.·ч/ у.е.э.

Амортизационные отчисления определяем по формуле:

$$A = \frac{K_{об} \cdot H_a^{об}}{100}, \quad (5.11)$$

где $K_{об}$ – балансовая стоимость (капиталовложения) оборудования, руб.;

$H_a^{об}$ – норматив годовых амортизационных отчислений по оборудованию, %.

Отчисления на ремонт и техническое обслуживание определяют, укрупнено по выражению:

$$T_p = \frac{K_{об} \cdot H_p^{об}}{100}. \quad (5.12)$$

Затраты на потребленную электроэнергию определим по формуле:

$$C_э = \frac{P_\Sigma \cdot t_{дн} \cdot Д \cdot T_э}{\eta}, \quad (5.13)$$

где P_Σ – мощность установки, кВт;

$t_{дн}$ – суточная продолжительность работы установки, ч/день;

$Д$ – число дней работы установки в году, день;

$T_Э$ – тариф электроэнергии, руб./кВт·ч;

η – кпд потребителя, о.е.

Затраты на топливо определим по формуле:

$$C_т = \frac{D_т \cdot t_{дн} \cdot Д \cdot T_т}{\eta}, \quad (5.14)$$

где $D_т$ – количество потребляемого топлива, кг/ч;

$T_т$ – стоимость топлива, руб./кг.

Прочие прямые затраты рассчитываются по формуле:

$$Пр = (0{,}05 \div 0{,}1) \cdot (З + A + T_p + C_э). \quad (5.15)$$

Удельные эксплуатационные затраты по использованию технологического оборудования для су зерна определяются по формуле:

$$И_{э_{уд}} = \frac{И_э}{W_г}, \quad (5.16)$$

где $И_э$ – суммарные эксплуатационные затраты по использованию технологического оборудования для сушки зерна, руб.;

$W_г$ – годовой объем работы (количество зерна, прошедшего сушку), т.

Степень снижения удельных эксплуатационных затрат, $C_{сн}$, %, по использованию технологического оборудования определим по формуле:

$$C_{сн} = \frac{И_{эуд}^{б} - И_{эуд}^{пр}}{И_{эуд}^{б}} \cdot 100\%, \quad (5.17)$$

где $И_{эуд}^{б}$; $И_{эуд}^{пр}$ – удельные эксплуатационные затраты соответственно при использовании установки базового и предлагаемого вариантов, руб./т.

Экономия эксплуатационных затрат, $Э_г$, руб, определяются по формуле:

$$Э_г = (И_{эуд}^{б} - И_{эуд}^{пр}) \cdot W_{г_{пр}}, \quad (5.18)$$

где $W_{г_{пр}}$ – годовой объем работы в предлагаемом варианте, т.

Энергоемкость производимой работы (энергозатраты на процесс сушки зерна с 20 до 14%), $F_г$, кВт·ч/т, определяется по формуле:

$$F_у = \frac{F_г}{W_г}, \quad (5.19)$$

где $F_г$ – потребление электроэнергии на этапе сушки зерна, кВт·ч.

Степень снижения энергоемкости, C_F, %, определяется по формуле:

$$C_F = \frac{F_у^{исх} - F_у^{пр}}{F_у^{исх}} \cdot 100\%. \quad (5.20)$$

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Исходные данные для расчета экономической эффективности применения установок сушки зерна

№ п/п	Показатели	Условные обозначения	предлагаемый	Агрохит-5	Vesta 5
1	2	3	4	5	6
1	Цена приобретения оборудования, тыс. руб.	$Ц$	3500	3950	4300
2	Число дней работы установки в году, день	$T_{дн}$	62	62	62
3	Производительность по пшенице, кг/ч		5000	5000	5000
4	Количество обслуживающего персонала (рабочих), занятых на выполнение технологической операции, чел	Z	3	3	3
5	Трудозатраты на обслуживание одной у.е.э., чел·ч	$t_{у.е.э.}$	18,6	18,6	18,6
6	Объем работ для обслуживания рассматриваемого оборудования (установки), у.е.э.:	O	43,4	50,8	36,2
7	Норматив годовых амортизационных отчислений на оборудование, %:	H_a	14,3	14,3	14,3
8	Норматив годовых отчислений на ремонты и ТО по оборудованию, %	H_p	11,0	11,0	11,0
9	Электрическая мощность установки, кВт;	P_{Σ}	110	130	12
10	Продолжительность работы установки в день, ч.	$t_{дн}$	16	16	16
11	Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.	$S_{Э}$	5,66	5,66	5,66
12	Количество потребляемого топлива, кг/ч	D_m	0	0	30
13	Стоимость топлива, руб./кг	T_m	0	0	51,75
14	Норма доходности (банковская кредитная ставка), %	$E_{ЦБ}$	7,25	7,25	7,25
15	Годовой уровень инфляции, %	r	3,0	3,0	3,0

Сводные показатели экономической эффективности приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Сводные показатели экономической эффективности установок сушки зерна

№ п/п	Показатели	Ед. измерения	Варианты		
			предлагаемый	Агрохит-5	Vesta 5
1	Капиталовложение в технологическое оборудование	тыс.руб.	4 200	4 740	5 160
2	Эксплуатационные затраты по использованию технологического оборудования всего в том числе:	руб.	2 006 304	2 251 591	3 086 848
	– оплата труда с начислениями на социальные нужды	руб.	409 289	409 289	409 289
	– амортизационные отчисления	руб.	600 600	677 820	737 880
	– затраты на ремонты и техническое обслуживание	руб.	462 000	521 400	567 600
	– затраты на потребляемую электроэнергию	руб.	772 024	912 392	1 607 457
	– прочие затраты	руб.	118 238	132 288	201 805
/3.	Годовой объем работы (количество зерна для сушки)	т	5000	5000	5000
4.	Удельные эксплуатационные затраты	руб./т	401,26	450,32	617,37
5.	Степень снижения удельных эксплуатационных затрат	%	10,62 41,42		
6.	Экономия удельных эксплуатационных затрат	руб./т	30,9 183,83		
7.	Годовая экономия эксплуатационных затрат	руб./т	13,16 30,82		
8.	Удельная энергоемкость процесса	МДж/кг исп.влаги	3,3	3,8	4,77
9.	Степень снижения удельной энергоемкости	%	30,82 13,16		

Воспользовавшись выражениями (5.3) и (5.4) определяем коэффициент суммы дисконтирования, значение которого, подставляя в уравнение (5.2) позволяет определить чистый дисконтированный доход.

5.2.3 Формирование прогнозных денежных потоков и оценка показателей эффективности проекта

Наиболее распространенными, являются следующие показатели эффективности капитальных вложений, которые могут быть рассчитаны для оценки эффективности инновационного проекта в области сельского хозяйства:

— показатель окупаемости инвестиций (*ROI*);

— простой срок окупаемости инвестиций (*PP*);

— показатели простой рентабельности инвестиций (*ARR*);

— чистый дисконтированный доход (*NPV*);

— индекс прибыльности проекта (*PI*);

— внутренняя норма рентабельности инвестиций (*IRR*);

— дисконтированный срок окупаемости инвестиций (*DPP*).

Данные показатели, как и соответствующие им методы, используются в двух вариантах:

— для определения эффективности предполагаемых независимых инвестиционных проектов, когда делается вывод: принять или отклонить проект;

— для определения эффективности взаимоисключающих проектов, когда делается вывод с тем, какой проект принять из нескольких альтернативных.

В данном инвестиционном проекте предполагается внесение денежных средств на покупку, пуско-наладку и обслуживание. Положительный денежный поток, обусловленный доработкой технологической линии за счет применения оборудования, предполагается с первого года использования и определяется сроками уборки, погодными условиями и потребностью в зерновых для кормления выращиваемых животных. Поставками данного оборудования занимается малое инновационное предприятие на базе Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. Основными статьями затрат на текущее обслуживание являются заработная плата на обслуживание, комплектующие для технического обслуживания. Положительные денежные потоки обусловлены сниже-

нием потерь зерновой массы в процессе доработки и хранения за счет интенсификации сушки, снижение энергоемкости сушки. В зависимости от масштаба предприятия возможно применение различного оборудования.

Планирование финансов предприятия основано на теории денежных потоков, согласно которой предприятие рассматривается во взаимосвязи с поставщиками, покупателями, работниками, другими предприятиями, государством и финансовыми учреждениями через движение денежных потоков.

Согласно теории денежных потоков успех финансово-хозяйственной деятельности предприятия связан с превышением притоков финансовых средств над их оттоками. Соблюдение этого условия – «условия ликвидности» - составляет основную цель финансового планирования.

Составим таблицу денежных потоков (таблица 5.7) на 8 лет с разбивкой по годам. Срок реализации проекта (8 лет) выбран с учетом времени эксплуатации оборудования до капитального ремонта. Проект начнет приносить прибыль только на 2 год после организации производства, и именно этим обусловлена длительность проекта. В таблице отражаются все притоки и оттоки средств (финансовые потоки) для обслуживания операционных процессов в ходе реализации проекта.

Для предварительной оценки инновационного проекта используем простой (бездисконтный) метод окупаемости инвестиций. Если проект окажется ликвидным, тогда проведем дополнительные исследования с использованием дисконтного метода окупаемости проекта и метода чистой текущей стоимости. Дополнительно так же планируется определить метод внутренней ставки рентабельности и модифицированный метод внутренней ставки рентабельности. Положительный денежный поток получается за счет экономии средств на сушку зерна по тарифам элеваторов (прием зерна 111,9 руб./т; сушка 86,6 руб./т·%; отгрузка 406,8 руб./т). Стоит отметить, что в данном расчете не учитывались транспортные расходы, потери при транспортировке, а также прочие потери.

Таблица 5.3 – Прогнозируемые денежные потоки компании

Год	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год	8-й год
Величина положительного денежного потока, тыс. руб.	3185,2	3185,2	3185,2	3185,2	3185,2	3185,2	3185,2	3185,2
Величина отрицательного денежного потока, тыс. руб.	4200	0	0	0	0	0	0	0
Текущие затраты, тыс. руб.	2006,3	2006,3	2006,3	2006,3	2006,3	2006,3	2006,3	2006,3
Текущий суммарный финансовый результат, тыс. руб.	-3021,1	-1842,2	-663,3	515,6	1694,5	2873,4	4052,3	5231,2

На рисунке 5.5 представлен денежный поток без учета дисконтирования для предлагаемого варианта и Агрохит 5, а также дисконтированный денежный поток для предлагаемого варианта при ставке дисконтирования 15%.

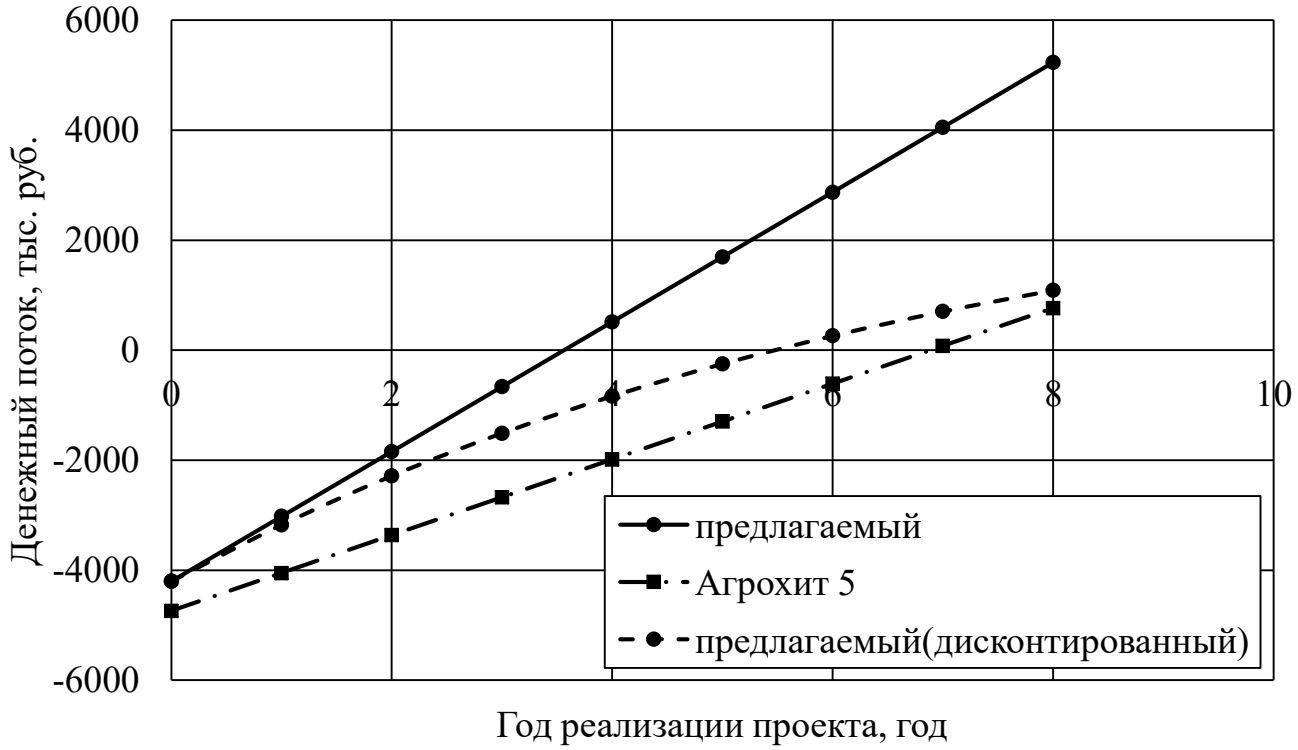


Рисунок 5.5 – Чистый денежный поток рассматриваемых проектов

5.2.3.1 Учетные (статические) методы оценки эффективности (ROI, PP, ARR)

Учетные методы оценки принадлежат к числу наиболее старых и широко используемых методов оценки инвестиций еще до того, как концепция дисконтирования денежных потоков приобрела всеобщее признание в качестве метода получения самой точной оценки. Так, методами оценки эффективности проекта, основанными на учетных оценках (без дисконтирования), являются период окупаемости (payback period, *PP*), коэффициент эффективности инвестиций (average rate of return, *ARR*) и показатель окупаемости инвестиций (Return on Investment, *ROI*).

5.2.3.1.1 Показатель окупаемости инвестиций (ROI)

На практике для оценки привлекательности инновационного проекта используют показатель окупаемости инвестиций (*ROI* - Return on Investment), с помощью которого можно сравнить экономичность различных проектов. Данный показатель можно рассчитать путем деления чистой прибыли (P_D) за период времени (обычно за год) на общий объем инвестиционных затрат:

$$ROI = \frac{P_D}{K_0}, \tag{5.21}$$

где P_D – чистая прибыль, руб.;

K_o – общий объем инвестиционных затрат, руб.

Соответственно для рассматриваемого проекта общий объем инвестиционных затрат за рассматриваемый период равен *Ko* = 4200 тыс. руб., чистая прибыль и показатель окупаемости за восемь лет составят: $P_{D\,общ} = \sum P_D$ = 52331,17 тыс. руб., *ROI* = 1,25.

Исходя из высокого показателя окупаемости инвестиций, можно сделать вывод, что проект является перспективным. Однако показатель окупаемости инвестиций имеет ряд существенных недостатков. Точнее, он не берет в расчет стоимость денег во времени и не предполагает дисконтирования, следовательно, не учитывает распределения доходов по годам, таким образом, он может применяться только для проектов в краткосрочном периоде и не подходит для адекватной оценки нашего проекта. Помимо этого, невозможно проанализировать вероятные расхождения проектов в разных периодах.

5.2.3.1.2 Простой срок окупаемости инвестиций (PP)

Простым сроком окупаемости инвестиций (payback period) является период от начала реализации до окупаемости вложений. Суть метода состоит в вычислении того периода, при котором денежные поступления сравниваются с суммой первоначальных инвестиций.

$$PP = \frac{K_O}{CF_\Sigma}, \tag{5.22}$$

где PP – срок окупаемости инвестиций (лет);

K_O – общий объем инвестиционных затрат, руб.;

CF_Σ – чистые денежные поступления от реализации инвестиционного проекта, руб.

Простой срок окупаемости инвестиций по анализируемому проекту представлен составляет 3,6 года, что является очень хорошим показателем для инновационного проекта в области сельского хозяйства. Простой срок окупаемости значительно меньше предполагаемого времени жизни проекта.

Проекты, у которых срок окупаемости меньше, чем заявленный инвесторами, принимаются; с большим сроком окупаемости – отвергаются; при сравнении проектов необходимо принимать проект с наименьшим сроком окупаемости.

Данный показатель позволяет рассчитать за какое время будет получена чистая прибыль, которая по сумме будет равна величине первоначально авансированного капитала.

5.2.3.1.3 Показатели простой рентабельности инвестиций (ARR)

Показатель рентабельности инвестиций (Accounting Rate of Return) является обратным по содержанию сроку окупаемости инвестиций. Расчет простой нормы рентабельности показывает эффективность инвестиций в процентном отношении денежных поступлений к общему объему первоначальных капиталовложений

$$ARR = \frac{CF}{K_0}, \tag{5.23}$$

где ARR – норма рентабельности инвестиций;

CF – среднегодовые денежные поступления, руб.;

K_o – стоимость первоначальных инвестиций, руб.

Таковы учетные методы оценки эффективности инвестиционных проектов. Общим недостатком их является то, что они не учитывают ряд факторов таких как, инфляция, распределение денежных потоков во времени и риски. Более того, данные методы основаны на бухгалтерских оценках прибыли, которые условны и зависят от выбранной учетной политики компании. Поэтому для оценки эффективности инновационных проектов эти методы не всегда применимы. Однако они важны для отбраковки заведомо неэффективных проектов, так как отличаются простотой в расчетах. Как указывается в некоторых источниках [186, 190, 208], учетные методы применяют для оценки проектов небольших фирм, которые не осуществляют крупные и долгосрочные инновационные проекты. Мы данный показатель в своих расчетах учитывать не будем.

5.2.3.2 Динамические (дисконтированные) методы оценки эффективности (*NPV*, *PI*, *IRR*, *DPP*)

Динамические методы оценки эффективности инновационных проектов основаны на модели дисконтированного денежного потока *DCF* (Discounted Cash Flows). Дисконтирование представляет собой приведение стоимости денежного потока проекта в разное время на конкретный период времени. Это можно сделать с помощью ставки дисконтирования, которая зависит от риска, связанного с будущим денежным потоком. Смысл *DCF* состоит в том, что деньги теряют свою покупательную способность, т.е. деньги в будущем периоде дешевле, чем в настоящем периоде.

Дисконтированные методы оценки более точны и применимы для оценки долгосрочных инновационных проектов, так как учитываются различные виды инфляции, изменения процентной ставки, нормы доходности и т.д. К этим показателям относят индекс рентабельности (profitability index, *PI*), чистую приведенную стоимость, иначе называемую “чистый дисконтированный доход” (net present value, *NPV*), внутреннюю норму (ставку) доходности (internal rate of return, *IRR*), дисконтированный период окупаемости (*DPP*).

5.2.3.2.1 Чистый дисконтированный доход (NPV)

Для легкости расчетов и удобства применения *NPV* разработаны специальные финансовые таблицы.

Стоит отметить, что в случае принятия инновационного проекта показатель *NPV* отражает прогноз изменения экономического потенциала компании. А также обладает свойством аддитивности, что позволяет суммировать *NPV* различных проектов.

С помощью *NPV* можем не только оценить эффективность проекта, но и определить ряд других показателей, а также он лежит в основе других методов оценки эффективности. Для использования *NPV* необходимо соблюсти ряд условий:

- денежные потоки инновационного проекта должны быть оценены для всего периода и соотнесены во временные интервалы;
- необходимы денежные потоки, связанные только с реализацией данного проекта;
- используемый при расчете *NPV* принцип дисконтирования, подразумевает возможность неограниченного привлечения и вложения финансовых средств по ставке дисконта;
- при сравнении эффективности нескольких проектов используется одинаковая для всех проектов ставка дисконтирования и единый период времени.

С учетом всего вышесказанного был проведен расчет чистых денежных потоков с инвестированием в течение первого года, и рассчитан чистый дисконтированный доход для каждого года проекта. Результаты расчетов представлены в таблице 5.8.

Из таблицы видно, что к моменту завершения проекта $NPV > 0$, что говорит о целесообразности его реализации.

Таблица 5.8 – Дисконтированные денежные потоки и чистый дисконтированный доход

Год	1	2	3	4	5	6	7	8
Ставка дисконтирования, %	15							
Коэффициент дисконтирования	0,87	0,76	0,66	0,57	0, 5	0,43	0,38	0,33
Денежные потоки, тыс. руб.	-3021,1	1178,9	1178,9	1178,9	1178,9	1178,9	1178,9	1178,9
Дисконтированные денежные потоки, тыс. руб.	-2627,04	891,42	775,15	674,04	586,12	509,67	443,19	385,38
Денежные потоки с нарастающим итогом, тыс. руб.	-3021,1	-1842,2	-663,3	515,6	1694,5	2873,4	4052,3	5231,2
Дисконтированные денежные потоки с нарастающим итогом, (ЧДД), NPV тыс. руб.	-3174,87	-2283,45	-1508,31	-834,27	-248,14	261,53	704,72	1090,10

Несмотря на то, что критерий *NPV*, является наиболее точным показателем оценки эффективности инновационных проектов, теоретически обусловленным, все же имеет недостатки. Во-первых, данный показатель не применим при сравнении проектов с большими первоначальными затратами и с меньшими при равной стоимости. Во-вторых, при выборе между проектом с большей реальной стоимостью при длительном периоде окупаемости и проектом с меньшей реальной стоимостью при коротком периоде окупаемости. Это означает, что метод *NPV* не определяет границу рентабельности и финансовую прочность проекта. Еще одной трудностью является определение процентной ставки.

Индекс прибыльности проекта (PI)

Индекс прибыльности отражает, какое количество единиц текущего объема денежного потока приходится на единицу ожидаемых первоначальных затрат. Используя расчетные данные из таблицы 5.8, для рассматриваемого проекта индекс прибыльности будет равен: $PI = 1{,}1$.

Если индекс прибыльности проекта превышает единицу, то текущая стоимость денежный поток проекта больше первоначальных инвестиций, а это в свою

очередь обеспечивает положительную величину *NPV*, что свидетельствует о возможности реализации предлагаемого проекта.

Одним из основных недостатков индекса прибыльности является чувствительность к масштабу проекта. Данный показатель не всегда дает однозначную оценку эффективности финансовых вложений, и проект с самым высоким индексом может не соответствовать проекту с высоким значением *NPV*. В связи с тем, что данный показатель не оценивает корректно взаимоисключающие инновационные проекты, он применяется как дополнение к методу *NPV*.

Внутренняя норма рентабельности инвестиций (IRR)

Внутренняя норма рентабельности – это ставка дисконтирования *r*, при которой *NPV*=0: *IRR* = *r*, при котором *NPV* = *f(r)* = 0.

IRR определяется как ставка дисконта, при *NPV* = 0, так как если при *NPV*>0 доходность проекта больше требуемой ставки *RD*, а при *NPV*<0, наоборот, доходность проекта меньше ставки дисконта, то при *NPV*=0 позитивная доходность равна ставке дисконта (стоимости капитала) *r*. *IRR* находится из уравнения (6). или :

$$NCF_0 + NCF_1(1+x)^{-1} + +NCF_2(1+x)^{-2} + \ldots + NCF_n(1+x)^{-n} = 0. \quad (5.24)$$

Для решения данного уровня используют приближенные методы, чаще всего метод линейной интерполяции:

- берем наугад две ставки дисконта r_1 и r_2, причем $r_1 < r_2$;
- затем, используя значения ставок, вычисляем NPV_1 и NPV_2;
- приближенное значение *IRR* получаем по формуле:

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)\cdot(r_2 - r_1)}, \quad (5.25)$$

Смысл расчета данного коэффициента при оценке эффективности заключается в том, что IRR показывает наибольший допустимый относительный уровень расходов, которые могут быть связаны с инновационным проектом. Например, если источниками средств проекта полностью ссуды коммерческого банка организациям, то значение IRR показывает верхнюю границу допустимого уровня банковской процентной ставки, если превысит, то проект не рентабельным.

Расчет внутренней нормы рентабельности производим с использованием формул Microsoft Excel, используя данные из таблицы 5.8. Для рассматриваемого проекта $IRR = 22{,}55\ \% > r = 15\%$.

Требуемый уровень рентабельности проекта зависит от его риска и состояния финансового рынка. Если $IRR < r$, т.е. доходность проекта меньше, чем требуемая инвесторами проекта ставка дохода на вложенный капитал, то проект отвергается.

В отличие от *NPV*, измеряющего абсолютную величину дохода, *IRR* показывает прибыль на единицу вложенного капитала. Таким образом при сопоставлении нескольких проектов *IRR* иногда противоречит *NPV*, так как проект может быть более прибыльным в расчете на вложенную единицу, а в абсолютном выражении давать меньший эффект из-за мелких масштабов инвестирования.

При расчете *IRR* предполагается, что получаемые доходы реинвестируются под ставку равную *IRR*. Если получается, что с *IRR* намного больше ставки дисконта, то это вносит существенные искажения в результаты расчета. Но в конечном счете выводы о эффективности проекта остаются в силе и получается *IRR* выполняет свою функцию.

Дисконтированный срок окупаемости инвестиций (DPP)

Итак, определяется момент, когда дисконтированные денежные потоки доходов сопоставляются с дисконтированными денежными потоками затрат.

Дисконтированный период окупаемости – это продолжительность наименьшего периода, по истечении которого текущий чистый дисконтированный доход становится и в дальнейшем остается неотрицательным.

$$\sum_{t=1}^{DPP} NCF_t \frac{1}{(1+r)^t} = I\ . \qquad (5.26)$$

В таблице 7.8 представлен расчет дисконтированного периода окупаемости и для сравнения приведен простой период окупаемости. Для предлагаемого варианта $DPP = 5{,}4$ года. Такой срок окупаемости меньше предполагаемого времени жизни проекта и является приемлемым для инвестирования в организацию производства нового продукта.

Данные, полученные в результате расчета, говорят о целесообразности внедрения предлагаемого проекта на предприятия при условии полной загрузки оборудования, в том числе при учет привлечения заемного капитала. Кроме того, дополнительная выгода может быть получена на предприятиях, занимающихся разведением животных и использующих обрабатываемый зерновой материал в качестве компонента корма, за счет дополнительных выгод от повышения питательности, а также обеззараживающих и инсектицирующих действий СВЧ-конвективной обработки.

В качестве ставки дисконта, *r,* использовался требуемый уровень доходности, который определяется с учетом риска. В результате применения статических методов финансовой оценки проекта получены следующие результаты для базового варианта:

- показатель окупаемости инвестиций *ROI* = 1,25;
- простой срок окупаемости инвестиций составил 3,6 года.

Это подтверждает самоокупаемость проекта и может служить основанием для его реализации. Поскольку проект является долгосрочным, были проанализированы дисконтированные методы оценки проекта и получены следующие результаты:

- чистый дисконтированный доход равен 1090,10 тыс. руб. на последний год реализации проекта (без учета дисконтирования 5231,2 тыс. руб.);
- дисконтированный срок окупаемости инвестиций составил 5,4 года;
- индекс прибыльности проекта *PI* = 1,1;
- внутренняя норма рентабельности инвестиций составила 22,55%.

На основе полученных значений, для базового варианта и его модификаций можно сделать вывод о том, что исследуемый инновационный проект по внедрению «автоматизированной системы энерго-ресурсосберегающей технологии сушки зерновых культур» может быть рекомендован к внедрению на сельскохозяйственных предприятиях Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие выводы:

1. Для обеспечения интенсификации процессов тепло- влагопереноса при сушке зерна за счет применения микроволновой энергии влагосъем необходимо осуществлять непосредственно в процессе микроволнового воздействия либо в течение 5-10 с после отключения СВЧ поля. При этом движущими силами, интенсифицирующими процесс сушки зерна, являются градиент температуры и давление водяных паров, обеспечиваемые более интенсивным разогревом и испарением во внутренних слоях зерновок за счет большего содержания влаги.

2. Параметры установок СВЧ-конвективной сушки определяются применяемыми источниками микроволновой мощности и диэлектрическими свойствами обрабатываемых материалов. При проектировании установок СВЧ-конвективной сушки необходимо обеспечить равномерность распространения электрического поля в объеме зерна с коэффициентом равным или более 0,368. Оценка равномерности распространения микроволнового поля в слое зернового материала может быть получена путем моделирования в системах электромагнитного моделирования, при этом для продуктопровода сечением 200 на 200 мм требуемый уровень коэффициента равномерности (0,368 и выше) может быть обеспечен при влажностях пшеницы до 22%.

3. Предложенная методика определения напряженности микроволнового поля в зерновом слое позволяет: строить картину распространения электрического поля с точностью, обеспечиваемой измерительным оборудованием; экспериментально определять коэффициент равномерности распространения электромагнитного поля в зерновом слое; проектировать поточные датчики изменения влажности зерна в процессе его СВЧ-конвективной обработки.

4. Полученные предлагаемым методом общий вид и функциональная зависимость изменения фактора диэлектрических потерь слоя зерновых материалов соответствуют справочным данным. Отклонения их абсолютных значений, достигаю-

щие 20% обусловлены различным состоянием слоя при измерениях в лабораторных и реальных условиях. Зависимости коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя от влажности и плотности слоя для таких материалов, как пшеница, ячмень, овес, тритикале могут быть аппроксимированы полиномом второй степени с коэффициентом детерминации 0,89 и выше.

5. Разработанные режимы работы оборудования СВЧ-конвективной сушки зерна, определяющиеся целевыми функциями по заданному критерию эффективности, при этом реализация управления по минимуму энергозатрат обеспечивает снижение энергоемкости сушки зерна в областях близких к кондиционной до 2,9 МДж на испарение килограмма влаги, а по критерию минимального времени сушки обеспечивается снижение времени сушки на 42%.

6. Расчёт экономической эффективности внедрения одной установки комбинированной СВЧ-конвективной сушки зерна, производительностью 5 тонн в час позволяет получить годовую экономию на один тонну обработанного зерна до 30,82 рублей, при этом чистый дисконтированный доход на восьмой год реализации проекта составил 5231,2 тыс. руб. (с учетом дисконтирования1090,10 тыс. руб.); простой срок окупаемости капитальных вложений составил 3,6 года, а дисконтированный 5,4 года.

Направления дальнейших исследований:

1. Исследование применения источников микроволновой мощности частотой 915 МГц, 433 МГц, что позволит снизить неравномерность распространения поля и увеличить глубину проникновения волны, тем самым позволяя применять продуктопроводы большего сечения.

2. Исследование Волноводов в комбинации с продуктопроводами для обеспечения наилучшей картины распространения микроволнового поля в обрабатываемом продукте.

3. Разработка оборудования поточного контроля влажности зернового слоя в процессе его тепловой обработки.

4. Расширение номенклатуры сведений о диэлектрических свойствах зерновых материалов различных культур и сортов.

5. Исследование местных источников возобновляемой энергии и возможности ее применения для обеспечения энергией установок тепловой обработки зерна.

Рекомендации сельскохозяйственным производителям:

1. При использовании установок СВЧ-конвективной тепловой обработки в линиях послеуборочной обработки: для сушки зерна рекомендуется обработка материала влажностью 18% и менее.

2. Снижения потерь в процессе сушки зерна можно за счет поэтапной сушки (первичная сушка на 2-4% с последующей досушкой до кондиционных значений) и увеличения сроков безопасного хранения зерна.

Рекомендации производителям сельскохозяйственной техники:

3. Перспективными и заслуживающими дальнейшего развития являются направления реализации систем управления, поддерживающих накопление статистических данных и передачу их для обучения моделей распространения микроволнового поля в материале с последующей генерацией обновленных программ управления.

4. Применение моделирования воздействия микроволнового поля на стадии проектирования оборудования обработки зерна позволяет снизить затраты на доработку конструкции.

Список сокращений

ARX – AutoRegresive model with eXternal input (АвтоРегрессионная модель с внешним входом).

FDTD – Finite Difference Time Domain.

FEM – Finite Element Method (метод конечных элементов).

FIT – Finite Integration Technique (метод конечного интегрирования).

SCADA-система – Supervisory Control And Data Acquisition (система диспетчерского управления и сбора данных).

АПК – агропромышленный комплекс.

АСУ – автоматизированная система управления.

ВЧ –высокая частота.

ИК – инфракрасный.

КСВН – коэффициента стоячей волны.

ОВС – озоновоздушная смесь.

ПДК – предельно допустимая концентрация.

ПО – программное обеспечение.

ПЧВ – преобразователь частоты векторный.

САПР (CAD или CADD) — система автоматизированного проектирования.

СВЧ – сверхвысокая (микроволновая) частота.

ТЭН – трубчатый электронагреватель.

УЗ -ультразвук.

УРМ – унифицированный регистрирующий модуль.

ЭАВ – электроактивированный воздух.

ЭМП – электромагнитное поле.

Список литературы

1. А. с. 1016643 СССР, МКИ5 F 26 B 3/34. Способ сушки материалов [Текст] / В.В. Илюхин, Б.Е. Носков, Б.С. Бабакин; (Московский технологический институт мясной и молочной промышленности). – №3352518 / 24 – 06; заявлено 27.10.81; опубликовано 07.05.83, Бюл. – 1983. – № 17.

2. А. с. 1095899 СССР, МКИ3 A 01 F 25/08. Способ сушки семян зерновых культур [Текст] / Н.А. Глущенко, Л.Ф, Глущенко, Т.П. Троцкая; (Гродненский сельскохозяйственный институт). – №3355297 / 30 – 15; заявлено 04.09.81; опубликовано 07.06.84, Бюл. – 1984. – № 21.

3. А. с. 1308255 СССР, МКИ4 A 01 F 25/08, F 26 B 3/34. Способ удаления свободной влаги из семян [Текст] / Э.А. Каменир, И.М. Печенкин, Е.В. Володин; (Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства). – №3956392 / 30 – 15; заявлено 26.06.85; опубликовано 07.05.87, Бюл. – 1987. – № 17.

4. А. с. №1630661 СССР, МКИ A01 F25/08. Способ сушки семян зерновых культур [Текст] / И.Б. Креймерис, К.Ц. Трюкас, В.А. Трюкене (Литовский НИИ мех. и электриф. с.-х., Литовский НИИ животноводства и ветеринарии). – №4659861/13; заявлено 10.02.89, опубликовано 28.02.91 // Бюл. – 1991. – №8.

5. А.с. 1551413 СССР, МКИ5 B 02 1/08 Способ автоматического управления процессом активного вентилирования зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Б.А. Карташов, Ю.И. Деянов, А.А. Бабенко. – № 447948 / 30 – 13; заявл. 28.06.88; опубл. 23.03.90, Бюл. № 11. – 33с.

6. А.с. 1734821 СССР, МКИ5 B 02 B1/08 Способ автоматического управления процессом активного вентилирования зерна [Текст] / А.Н. Васильев, В.М. Гетманенко. - №4699870 / 30 – 13; заявл. 02.06.90; опубл. 22.01.92, Бюл. № 19. – 25с.

7. А.с.1423150 СССР, МКИ4 B 02 B1/08 Способ автоматического управления процессом активного вентилирования зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Б.А. Карташов, М.М. Фомичев, С.В. Новоселов. – № 4118333 / 30 – 13; заявл. 15.09.86; опубл. 5.05.88, Бюл. № 14.– 32с.

8. Андреева, Н.И. Режимы активного вентилирования зерна и эксплуатация вентиляционных установок [Текст] / Н.И. Андреева, И.А. Клеев, Б.Е. Мельник, В.С. Уколов. – М.: Хлебоиздат, 1958. – 247 с.

9. Андриевский, Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB [Текст] / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999. – 466 с.

10. Андрюхов, В.Г. Подсолнечник [Текст] / В.Г. Андрюхов, Н.Н. Иванов. – М.: Росссельхозиздат, 1990. – 68 с.

11. Анискин, В.А. О повышении качества семян способами послеуборочной и предпосевной обработки [Текст] / В.И. Анискин: сб.науч.тр. / ВИМ. – 1987.– Т.112.– С. 3 – 20.

12. Анискин, В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием [Текст] / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук.– М.: КолосС, 1972.– 199 с.

13. Анфиногентов, В.И. Математическое моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков [Текст]: дис. докт. техн. Наук: 05.13.18. − Казань, 2006. – 305 с.

14. Анфиногентов, В.И. Моделирование СВЧ нагрева диэлектрика движущимся излучателем [Текст] / В.И. нфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. – 2003. – № 1(29). – С. 114-117.

15. Анфиногентов, В.И. Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков [Текст] / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2002. – № 3. – С. 36-38.

16. Анфиногентов, В.И. Управление движением границы раздела фаз при СВЧ-нагреве снега [Текст] / В.И. Анфиногентов, А.А. Тахаув // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 14. № 1, 2011. − С. 66-70.

17. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст] / В.И. Атаназевич. – М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.

18. Ахмадышин, Р.А. Микотоксины – контаминанты кормов [Текст] / Р.А Ахмадышин., А.В. Канарский, З.А. Канарская // Вестник Казанского технологического университета. - 2007. - №2. - С. 88-103.

19. Бабенко, А.А. Распространение электромагнитного импульса при СВЧ обработке [Текст] / А.А. Бабенко, С.В. Вендин // Моделирование и автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / МИИСП имени В.П. Горячкина. – М.: 1992. – С. 105-109.

20. Бабенко, А.А. Расчет импульсных электромагнитных полей при СВЧ облучении диэлектрических материалов, ограниченных металлическим экраном [Текст] / А.А. Бабенко, С.В. Вендин // Моделирование и автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / МИИСП имени В.П. Горячкина.– М.: 1991.– С. 14–18.

21. Банков, Е.А. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS [Текст] / Е.А. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг – М. «Солон», – 2004. – 208 с.

22. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / С. И. Баскаков – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.

23. Баутин, В.М. Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства [Текст] / В.М.Баутин, В.Е.Бердышев, Д.С.Буклагин и др. – М.: КолосС. 2000. – 536 с.

24. Белов А.А. Совершенствование технологии и сверхвысокочастотных установок для повышения кормовой ценности фуражного зерна [Текст]: дис. ... доктора технических наук 05.20.02 / Мичуринский государственный аграрный университет. Мичуринск-наукоград РФ. 2016. – 416 с.

25. Белов, А.А. Дезинтегратор с СВЧ генераторами для микронизации зерна [Текст] / А.А. Белов, В.Ф. Сторчевой, М.В. Белова, Е.Ю. Сергеева // Естественные и технические науки. – 2015. − № 6. – С. 502-503.

26. Белов, А.А. Использование энергии электромагнитного поля СВЧ для микронизации фуражного зерна [Текст] / А.А. Белов, Н.К. Кириллов, Г.В. Зайцев //

Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – Оренбург. − 2014. − № 2 (46). − С. 80-83.

27. Белов, А.А. Комбинированный диэлектрический и индукционный нагрев фуражного сырья [Текст] / А.А. Белов, В.Ф. Сторчевой // Науч.-практ. журнал «Природообустройство». – Москва: ФГБОУ ВПО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. − 2014. − № 3. – С. 79-83.

28. Белов, А.А. Резонаторы, обеспечивающие термообработку сырья в поточном режиме [Текст] / А.А. Белов, И.М. Селиванов, Г.В. Новикова, М.В. Белова, У.У. Умбетов // Естественные и технические науки. − 2015. − № 6. – С. 499-501.

29. Белов, А.А. СВЧ-установка для обеззараживания зерна и продуктов его переработки [Текст] / А.А. Белов, В.Ф. Сторчевой, М.В. Белова, А.Н. Коробков // Науч.-теор. журнал «Известия ТСХА». – Москва: ФГБОУ печатная ВПО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. − 2014. − № 6. – С. 101-107.

30. Белов, А.А. Технология и техническое средство для микронизации зерна [Текст] / А.А. Белов, Г.В. Зайцев, Н.К. Кириллов // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. – Чебоксары. − 2013. − № 4. – С. 27-30.

31. Белов, А.А. Установка для микронизации зерна [Текст] / А.А. Белов, Г.В. Новикова, Н.К. Кириллов // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. – Чебоксары. – 2012. – № 4. – С. 37-39.

32. Белов, А.А. Установка для обеззараживания комбикормов [Текст] / А.А. Белов, Г.Л. Долгов, Т.В. Шаронова // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. – Чебоксары. − 2013. − № 4. – С. 66-69.

33. Белов, А.А. Энтолейтор с источником энергии сверхвысокой частоты [Текст] / А.А. Белов, Самоделкин А.Г., Сторчевой В.Ф., Белов Е.Л. // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 497-498.

34. Беляев, А.А. Исследование распределения СВЧ поля в пространстве рабочей камеры [Текст] / А.А. Беляев, А.Л. Андержанов, С.А. Андреев, А.И. Соколов // Электропривод и электротехнология на объектах АПК: сб. науч. тр. / МИИСП имени В.П. Горячкина. – М., 1989. – С. 12–20.

35. Билько, М.И. Измерение мощности на СВЧ [Текст] / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – 2-е изд. перераб. и доп.– М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.

36. Боровицин, В.Н. Оптимизация использования энергетических ресурсов в технологических процессах сельскохозяйственного производства методами вычислительного эксперимента [Текст]: дис. … доктора техн. наук.: 05.20.01. / В.Н. Боровицын. – М.: СПб-Павловск, 2004. – 373 с.

37. Бородин, И.Ф. Изменение всхожести семян зерновых культур под влиянием СВЧ-обработки [Текст] / И.Ф. Бородин, С.В. Вендин, А.Д. Горин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1993. – № 2. – С. 92-95.

38. Бородин, И.Ф. Использование электроозонированного воздуха в сельскохозяйственном производстве [Текст] / И.Ф. Бородин, Н.В. Ксенз // Техника в сельском хозяйстве. – 1993. – №3. – С. 13–14.

39. Бородин, И.Ф. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов [Текст] / И.Ф. Бородин, Н.И. Кириллин. – М.: КолосС. 1977. – 328 с.

40. Бородин, И.Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве [Текст] / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. Горин. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 56 с.

41. Бошняга, Ю.А. Совершенствование технологии сушки в агропромышленном комплексе [Текст] / Ю.А. Бошняга, М.К. Болога // 1-я международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ-2002): Труды конференции: В 4 т. Т.3. – Москва, 2002. – С. 31–39.

42. Будников, Д.А. Анализ возможностей интенсификации сушки зерна электроактивированными средствами [Текст] / Д.А. Будников // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград, 2005. – С. 26-29.

43. Будников, Д.А. Аэродинамическое сопротивление зернового слоя при сушке [Текст] / Д.А. Будников, Н.Б. Руденко // Теоретический и научно-практический журнал ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии Инновации в сельском хозяйстве, – 2013 год. – №1. – С.44-47.

44. Будников, Д.А. Визначення динамічних властивостей зернового шару при НВЧ-конвективній дії [Текст] // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Ред. кол.: Ніколаєнко С.М.(відп. ред) та ін. – К.: ВЦ НУБіП України, 2015. – Вип. 209. – Ч.1 – 288 с. – С. 98-104.

45. Будников, Д.А. Влияние аэроионов отрицательной полярности на агент сушке зерна электроактивированным воздухом [Текст] / Д.А. Будников, Н.Б. Руденко, Н.Н. Грачева // Пленарные доклады и тезисы Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ. 2012. – 190с. – С.121–123.

46. Будников, Д.А. Влияние конструктивных особенностей СВЧ – конвективной зоны на эффективность сушки зерна [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, А.А. Васильев // «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства»: сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящѐнного 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (22-23 мая 2018 года). / М.: Издательство «Перо». – 2018. – С. 84-89.

47. Будников, Д.А. Диэлектрические свойства зерновых [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Цымбал // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства – 2016. – №4(24). – С. 52-56.

48. Будников, Д.А. Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Цымбал // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – №3(18). – С.154-159.

49. Будников, Д.А. Измерение напряженности СВЧ поля в зерновом слое [Текст] // Вестник ВИЭСХ – 2015. – №4(21). – С.40-44.

50. Будников, Д.А. Изучение напряженности СВЧ поля в зерновом слое [Текст] // Тези доповідей III Міжнародной науково-практичной конференціи Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК, м. Київ, 17-18 грудня. – 2015 р. – С. 46-47.

51. Будников, Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ [Текст]: автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 05.20.02. – Зерноград. – 2008. – 19 с.

52. Будников, Д.А. Исследование динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии [Текст] // Теоретический и научно-практический журнал ФГБНУ ВИЭСХ Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – №4(9). – С. 92-96.

53. Будников, Д.А. Исследование нагрева зерна при СВЧ рециркуляции [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко, А.А. Васильев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М., 2011. – №11. – С 26–29.

54. Будников, Д.А. Исследование распределения напряженности СВЧ поля в зерновом слое [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3234

55. Будников, Д.А. Исследование распространения электромагнитных волн в зерновом слое [Текст] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства – 2014. – №1. – С. 48-55.

56. Будников, Д.А. Компьютерное моделирование трехмерных структур при исследовании процессов диэлектрического нагрева сельскохозяйственной продукции [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Васильев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – №3(18). – С.171-175.

57. Будников, Д.А. Контроль температуры зерна в СВЧ камере [Текст] // Технические науки в России и за рубежом (II): материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2012 г.). – М.: Буки-Веди. – 2012. – С. 66-68.

58. Будников, Д.А. Косвенное измерение напряженности СВЧ поля в зерновом слое [Текст] // Электротехнологии, оптические излучения и электрооборудование в АПК: материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 27-29 сентября 2016 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. – 2016. – 132 с. – С. 51-56.

59. Будников, Д.А. Лабораторная установка и планирование эксперимента по СВЧ нагреву пшеницы разной плотности [Электронный ресурс] // Инновации в

сельском хозяйстве. – 2018, №2(27), С.36-40. Доступ: http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/10/insel27.pdf

60. Будников, Д.А. Математическая модель изменения температуры воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ-рециркуляционной сушке зерна активным вентилированием [Текст] / Д.А. Будников, Н.Б. Руденко, Н.Н. Грачева // Пленарные доклады и тезисы Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». –М.: ФГБОУ ВПО МГАУ. – 2012. – 190 с. – С.45–47.

61. Будников, Д.А. Моделирование влияния конструктивных параметров зоны обработки на распределение поля СВЧ в электро-технологическом модуле для сушки и обработки зерна [Текст] // Теоретический и научно-практический журнал ФГБНУ ВИЭСХ Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – №4(9). – С. 88-91.

62. Будников, Д.А. Моделирование волновода модульной СВЧ-сушилки [Текст] // Теоретический и научно-практический журнал ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии Инновации в сельском хозяйстве. – 2013. – №1. – С. 36-38.

63. Будников, Д.А. Моделирование нагрева зерна в СВЧ поле [Текст] // Инновационные технологии и технические средства для АПК Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Воронеж. – 2015. – С. 179-184.

64. Будников, Д.А. Моделирование нагрева зернового слоя в поле действия источника СВЧ [Текст] // Теоретический и научно-практический журнал ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – №1. – С.27-35.

65. Будников, Д.А. Моделирование процесса нагрева зерна в СВЧ поле универсального электротехнического модуля при различных алгоритмах работы электрооборудования [Электронный ресурс] // Вестник аграрной науки дона. – 2016. – №1(33). – С. 12-17. ISSN 2075-6704. http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/files/vestnik/VD01_15.pdf

66. Будников, Д.А. Моделирование процессов нагрева — охлаждения зерновки при воздействии СВЧ полем [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, А.А. Васильев // Аграрная наука. – 2015. – №1. – С. 27-29.

67. Будников, Д.А. Моделирование электромагнитного поля в зерновом слое различной плотности [Электронный ресурс] // Вестник аграрной науки дона. – 2018. – №1(41). – С. 40-45. ISSN 2075-6704. http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/files/vestnik/VD01_15.pdf

68. Будников, Д.А. Модель нагрева зерна в микроволновом поле [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Васильев, А.Н. Васильев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск 22–23 окт. 2014 г.). В 3 т. Т. 2./РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редколлегия: П.П. Казакевич (гл. ред.), С. Н. Поникарчик. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – 2014. – 268 с. – С.3-8.

69. Будников, Д.А. Модель напряженности СВЧ поля в зерновом слое [Текст] // Агротехника и энергообеспечение. – Орел. – 2015. – №4(8). – С.26-31.

70. Будников, Д.А. Модернизация кормоцеха животноводческих хозяйств [Текст] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. № 3 (31). С. 109-112.

71. Будников, Д.А. Обоснование параметров зон СВЧ с учетом обеспечения требуемых параметров равномерности [Текст] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – №3(18). – С.159-165.

72. Будников, Д.А. Определение динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии [Текст] // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Біологія, біотехнологія, екологія / Ред. кол.: Ніколаєнко С.М. (відп. ред) та ін. – К.: ВЦ НУБіП України. – 2015. – Вип. 214. – 319 с. – С. 43-51.

73. Будников, Д.А. Определение диэлектрических свойств зернового слоя в программах электродинамического моделирования [Текст] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2017. – № 3 (27). – С. 60-64.

74. Будников, Д.А. Определение коэффициента диэлектрических потерь псевдоожиженного слоя зерна [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №3. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4356

75. Будников, Д.А. Определение фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси [Электронный ресурс] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – №1(26). – С.9-15. Доступ: http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/08/Insel26.pdf

76. Будников, Д.А. Определения фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси [Электронный ресурс] // Теоретический и научно-практический журнал ФГБНУ ВИЭСХ Инновации в сельском хозяйстве – 2015. – №2(12). – С. 25-27. http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2015/06/201502end.pdf

77. Будников, Д.А. Оптимизация управления сушкой зерна электроактивированным воздухом [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сборник докладов XII международной научно-технической конференции (10-12 сентября 2012г., г. Углич) - М.: Известия. – 2012. – Ч. 1 – С. 672-677.

78. Будников, Д.А. Планирование численного эксперимент по СВЧ нагреву пшеницы разной плотности [Электронный ресурс] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2017. – №1(22). – С. 31-38. Доступ: http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2017/10/Insel22.pdf

79. Будников, Д.А. Планирование эксперимента по контролю изменения комплексного диэлектрического показателя зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Цымбал // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2015. – №4(20). – С. 39-42.

80. Будников, Д.А. Поглощение электромагнитного поля СВЧ сельскохозяйственными материалами [Текст] // Вестник ВИЭСХ. – 2013. – №2(11). – С.38-40.

81. Будников, Д.А. Построение системы управления сушкой зерна [Текст] // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях. Матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета. – 2014. – 327 с. – С. 68-71.

82. Будников, Д.А. Построение системы управления универсальным модулем для СВЧ-конвективной обработки и сушки зерна [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Васильев // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 9-й Международной научно-технической конференции (21 – 22 мая 2014 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Часть 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2014. – С. 84-88.

83. Будников, Д.А. Представление зернового слоя при моделировании электромагнитного воздействия [Текст] // Вестник ВИЭСХ. – 2016. – № 4 (25). – С. 50-54.

84. Будников, Д.А. Применение Matlab для получения регрессионных моделей сушки зерна с применением ЭАВ [Текст] / Д.А. Будников, Н.Н. Грачева // Теоретический и научно-практический журнал ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии Инновации в сельском хозяйстве. – 2013. – №1. – С.13-17.

85. Будников, Д.А. Применение Matlab для построения системы управления оборудованием [Текст] // Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Ч. 2 материалы 6-ой Международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2015» (Новосибирск, 22-23 октября 2015 г.) / Сибирский физико-технический институт аграрных проблем. – Новосибирск. – 2015. – 318с. – С.157–160. ISBN 978-5-8119-0637-6.

86. Будников, Д.А. Применение программных продуктов при моделировании СВЧ-обработки зерна [Текст] // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 7-й Международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2018» (Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 24-25 октября 2018 г.)

/ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем. – Новосибирская обл., р.п. Краснообск. – 2018. – С. 149-153.

87. Будников, Д.А. Применение факторного анализа при изучении влияния электротехнологий на сушку зерновых продуктов [Текст] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск 19–20 окт. 2012 г.). В 3 т. Т. 2. / РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редколлегия: П.П. Казакевич (гл. ред.), О.О. Дударев. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2012. – 310 с. – С.273-278.

88. Будников, Д.А. Применение ЭАВ и СВЧ при сушке зерна кормового назначения [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2012. – №3. – С. 67-73.

89. Будников, Д.А. Проблемы и возможности использования СВЧ для сушки зерна [Текст] / Д.А. Будников // Проблемы исследования и проектирования машин. – Пенза. – 2006. – С. 113 – 115.

90. Будников, Д.А. Промежуточные результаты численного эксперимент по СВЧ нагреву пшеницы разной плотности [Электронный ресурс] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2017. – №2(23). – С.22-28. Доступ: http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2017/10/Insel23.pdf

91. Будников, Д.А. Разработка лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно [Электронный ресурс] // Инновации в сельском хозяйстве. – – 2018. – №3(28). – С. 20-25. Доступ: http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/10/%D0%98%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%A5-28.pdf

92. Будников, Д.А. Разработка лабораторной установки электрофизического воздействия на зерновой слой с различной плотностью [Текст] // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 3 (2). – С. 97-106.

93. Будников, Д.А. Реализация управляющих программ для исследования сушки зерна электрофизическими методами [Текст] // Тези доповідей III

Міжнародной науково-практичной конференціи молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК», м. Київ. 17-18 грудня. – 2015 р. – С. 31-32.

94. Будников, Д.А. Реализация управляющих программ универсального модуля СВЧ-конвективной обработки зерна [Электронный ресурс] // Теоретический и научно-практический журнал ФГБНУ ВИЭСХ Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – №4(14). – С. 21-25. http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2016/02/insel14.pdf

95. Будников, Д.А. Регрессионные модели нагрева в поле действия СВЧ нагрева зерна при рециркуляционной сушке активным вентилированием [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации сельского хозяйства / сборник научных трудов ВИМ. – Москва. – 2011 ЧАСТЬ 1. – С.407-411.

96. Будников, Д.А. Регрессионные модели ЭАВ сушки зерна [Текст] / Д.А. Будников, Н.Н. Грачева // Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых учёных: тр. V Междунар. науч.-практ. конф. мол. учёных, посвящ. 10 -летию её проведения (20 апреля 2012 г., пос. Краснообск) / СО Россельхозакадемии. – Новосибирск. – 2012. – 448 – С.14-16.

97. Будников, Д.А. Регрессионный анализ сушки зерна с применением ЭАВ [Текст] // Труды ГОСНИТИ – М. – 2013. – Том 111 часть 1. – С.145-148.

98. Будников, Д.А. Результаты эксперимента по определению энергоэффективных режимов сушки зерна с применением микроволнового излучения [Текст] // Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве. – 2020. – Т. 67. – № 1 (38). – С. 22-27. DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-1-22-27

99. Будников, Д.А. Результаты экспериментальных исследований фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси [Электронный ресурс] // Вестник аграрной науки дона. – 2018. – №3(43) – С. 16-20. ISSN 2075-6704. Доступ: http://ачгаа.рф/files/vestnik/VD3_2018_43.pdf

100. Будников, Д.А. Совершенствование способов и оборудования для сушки зерна [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Вестник ВИЭСХ. – 2012. – №3(8). – С.51-54.

101. Будников, Д.А. Сушка зерна активным вентилированием с применением электромагнитного поля СВЧ [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – №8. – С. 59-61.

102. Будников, Д.А. Сушка зерна с применением электроактивированного агента [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Хранение и переработка сельхозсырья – 2012. – №7. – С. 59-60.

103. Будников, Д.А. Теоретические исследования теплообмена в слое рециркулируемого зерна при СВЧ нагреве [Текст] // Теоретический и научно-практический журнал ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии Инновации в сельском хозяйстве. – 2012. – №1. – С.35-39.

104. Будников, Д.А. Термическая обработка зерна в СВЧ поле [Текст] // Материалы седьмой международной конференции Комбикорма-2013» современное производство комбикормов – Москва, МПА, 5-6 февраля 2013 г. – С.126-129.

105. Будников, Д.А. Управление процессом сушки зерна в секционных установках бункерного типа [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, О.В. Северинов // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сборник докладов XII международной научно-технической конференции (10-12 сентября 2012г., г. Углич) - М.: Известия. – 2012. – Ч. 2 – С. 646-652.

106. Будников, Д.А. Факторный анализ многократного СВЧ нагрева зерна при рециркуляционной сушке активным вентилированием [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации сельского хозяйства / сборник научных трудов ВИМ. – Москва. – 2011. ЧАСТЬ 1. – С. 411-419.

107. Будников, Д.А. Экспериментальная установка для сушки и обеззараживания зернового материала с применением электрофизических способов воздействия [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Васильев // Материалы Международного агроэкологического форума. Т 2. Экологические аспекты производства продукции рас-

тениеводства; энергообеспечение и информационные технологии в сельском хозяйстве. – СПб.: ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии. – 2013. – 268 с. – С. 235-238.

108. Будников, Д.А. Энергетические затраты на влагосъем при различной плотности зернового материала [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 3 (28). – С. 44-48.

109. Будников, Д.А. Энергосберегающая сушка зерна в псевдоожиженном слое [Текст] / Д.А. Будников, А.А. Васильев // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации: сборник научных трудов М75 студентов и молодых исследователей. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – 2018. – Вып. 2. – С. 201-204.

110. Буянов, В.А. Применение СВЧ энергии для сушки зерна [Текст] / Е.А. Буянов // Мех. и электр. с.-х. – 1982. – № 1. – С. 55-56.

111. Васильев А.А. Обоснование режимов послеуборочного обеззараживания зерна с использованием поля СВЧ [Текст]: дис. на соиск. учен. Степ. канд. техн. наук: 05.20.02 / Васильев Алексей Алексеевич. – М. – 2018. – 186 с.

112. Васильев, А.Н. Совершенствование технологии сушки зерна в плотном слое с использованием электротехнологий, АСУ и моделирования процесса [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А.Будников, Н.Н. Грачева, О.В. Севериов. – М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – 2016. – 176 с.

113. Васильев, А.Н. Совершенствование процессов сушки и обеззараживания зерна в СВЧ поле Васильев / А.Н. Васильев, А.Б. Оспанов, Д.А. Будников и др. – Алматы: Нур-Принт. 2017. – 163с. ISBN 978-601-7869-71-7.

114. Васильев, А.Н. Расчет коэффициента конвективного теплообмена при СВЧ сушке зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007.– №11. – С 20–21.

115. Васильев, А.А. Влияние неравномерности распределения влаги в зерне на расчет теплопроводности при СВЧ обеззараживании / А.А. Васильев, Д.А. Будников // Вестник ВИЭСХ – 2013. – №2(11). – С.41-44.

116. Васильев, А.А. Математическое описание теплообмена в зерне при воздействии поля СВЧ [Текст] / А.А. Васильев, А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – №101(07).

117. Васильев, А.Н Зависимость скорости сушки зерна от распределения и параметров воздуха в СВЧ - конвективной зоне [Электронный ресурс] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев, Б.А. Попов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №3. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4516

118. Васильев, А.Н. Алгоритм управления сушкой зерна в секционных бункерах активного вентилирования [Текст] / А.Н. Васильев, О.В. Северинов, Д.А. Будников // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий / Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции (17–18 сентября 2014 г., Москва). – М.: ФГБНУ ВИМ. – 2014. – С.23-25.

119. Васильев, А.Н. Вариант решения уравнений тепло и - влагообмена в зерновом слое при СВЧ - конвективном воздействии [Текст] / А.Н. Васильев, А.А. Васильев, Д.А. Будников // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – №11-6(42). – С. 53-56.

120. Васильев, А.Н. Влияние градиента температур на давление паров в зерновке при СВЧ нагреве [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Агроинженерия. Вестник МГАУ. – М. 2007. – Выпуск 3/1. – С. 27-29.

121. Васильев, А.Н. Влияние особенностей уборки зерна на режимы его обеззараживания в поле СВЧ / А.Н. Васильев, А.А. Васильев, Д.А. Будников // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – №1. – С. 82-85.

122. Васильев, А.Н. Использование теории подобия для описания СВЧ сушки зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград. – 2007. – С.72-77.

123. Васильев, А.Н. Исследование возможности использования термопар в СВЧ активной зоне [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев, Д.А.

Филоненко // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград. – 2007. – С.82-85.

124. Васильев, А.Н. К определению граничных условий при СВЧ нагреве зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев // Пленарные доклады и тезисы Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ. – 2012. – 190с. – С. 70-71.

125. Васильев, А.Н. Компьютерная модель тепло - влагообмена в зерновом слое при СВЧ – конвективном воздействии / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4310

126. Васильев, А.Н. Конструкция бункера для сушки зерна активным вентилированием / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – №9. – С. 57-58.

127. Васильев, А.Н. Контроль процесса активного вентилирования зерна электрическим способом [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н / Васильев Алексей Николаевич; МИИСП. – М. – 1988. – 16 с.

128. Васильев, А.Н. Критерии оптимального управления сушкой зерна [Текст]/ А.Н. Васильев, А.Б. Оспанов, Д.А. Будников и др. // Международная агроинженерия: Научно-технический журнал. – Алматы. – 2015. – №2. – С. 12-17.

129. Васильев, А.Н. Математическая модель оптимального управления сушилкой зерна, с максимальным использованием потенциала агента сушки [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, О.В. Северинов // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сборник докладов XII международной научно-технической конференции (10-12 сентября 2012г., г. Углич) – М.: Известия. – 2012. – Ч. 2. – С. 677-682.

130. Васильев, А.Н. Математическая модель сушки зерна электроактивированным воздухом [Текст] / А.Н. Васильев, Н.Н. Грачева, Д.А. Будников // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – №1(14). – С. 61-67.

131. Васильев, А.Н. Моделирование рециркуляционной сушки зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М. – 2012. – №5. – С. 33–35.

132. Васильев, А.Н. Модель распределения температуры нагрева зерна по объему СВЧ активной зоны [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград. – 2007. – С. 78-81.

133. Васильев, А.Н. Модульная установка для обработки зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев, В.Г. Гусев, Ю.Ю. Ротачев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – №5. – С. 27-30.

134. Васильев, А.Н. Постановка задачи теплопроводности при СВЧ нагреве зерна для обеззараживания [Текст] / А.Н. Васильев, А.А. Васильев, Д.А. Будников // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства – 2014. – №1. – С. 56-62.

135. Васильев, А.Н. Предварительные результаты эксперимента по СВЧ сушке зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград. – 2007. – Т.1. – С. 78-81.

136. Васильев, А.Н. Применение критерия электроактивации при описании процесса сушки зерна с использованием электротехнологий [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. Агроинженерия. – 2012. – №3 (54). – С. 9-12.

137. Васильев, А.Н. Проблемы оптимального управления сушкой зерна активным вентилирование [Текст]: 1-я международ.науч.-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» / МГАУ. – М. – 2002. – С. 80-83.

138. Васильев, А.Н. Распространение СВЧ-поля в зерновом материале различной плотности [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства»: сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящѐнного 175-летию со дня рождения

К.А. Тимирязева (22-23 мая 2018 года). / М.: Издательство «Перо». – 2018. – 291 с. – С. 80-83.

139. Васильев, А.Н. Регрессионные зависимости коэффициента сушки от параметров агента сушки, вида и параметров электрофизического воздействия [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев // «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства»: сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящѐнного 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (22-23 мая 2018 года). / М.: Издательство «Перо». – 2018. – 291 с. – С. 30-35.

140. Васильев, А.Н. Регулирование скорости асинхронного электропривода вентиляторов в бункерах активного вентилирования [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тихомиров, Д.А. Будников // Международный научно-исследовательский журнал, – № 8 (50). – Часть 3. Август DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.166 http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8-3-50.pdf

141. Васильев, А.Н. Результаты эксперимента нагрева зерна в СВЧ зоне [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве / Всерос. науч.-исслед. ин-т электрификации сел. хоз-ва. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – Москва. – 2008. – Ч. 2. – С. 253-257.

142. Васильев, А.Н. Способ интенсификации сушки зерна активным вентилированием электроактивированным воздухом [Текст] / А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко, Н.Н. Грачева, Д.А. Будников // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 9-й Международной научно-технической конференции (21 – 22 мая 2014 года, г.Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Часть 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2014. – С. 88-91.

143. Васильев, А.Н. Тепловая обработка зерна в поле высокой частоты [Текст] / А.Н. Васильев, А.Б. Оспанов, Д.А. Будников и др. // Международная научная конференция: Хранителна наука, техника и технология. – Пловдив. – 2015. 23-24 октября.

144. Васильев, А.Н. Управление СВЧ-нагревом зерна при его обеззараживании [Текст] / А.Н. Васильев, А.А. Васильев, Д.А. Будников // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий / Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции (17–18 сентября 2014 г., Москва). – М.: ФГБНУ ВИМ. – 2014. – С. 255-258.

145. Васильев, А.Н. Факторный анализ экспериментальных исследований сушки зерна с использованием электроактивированного воздуха [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. Агроинженерия. – 2012. – №2 (53). – С. 58-60.

146. Васильев, А.Н. Экспериментальная установка и планирование эксперимента по определению динамических свойств зернового слоя при его СВЧ нагреве [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА – Зерноград. – 2006. – Т.1. – С. 74-78.

147. Васильев, А.Н. Экспериментальная установка и планирование эксперимента по СВЧ сушке зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве: сб. науч. тр. / СтГАУ – Ставрополь: АРГУС, 2006. – С. 103-107.

148. Васильев, А.Н. Экспериментальное исследование сушки зерна электроактивированным воздухом [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Н.Н. Грачева // Вестник ОрелГАУ. Орел. – 2012. – №5 (38). – С.160-162.

149. Васильев, А.Н. Экспериментальные исследования влияния режимов работы магнетрона на энергоёмкость и производительность обработки зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев // Вестник аграрной науки дона. – 2015. – №2(30). – С. 41-48. ISSN 2075-6704.

150. Васильев, А.Н. Эффективность применения поля СВЧ для интенсификации сушки зерна активным вентилированием [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №7. – С. 29-30.

151. Вендин, С.В. Интегральная оценка температурного действия СВЧ обработки семя0н [Текст] / С. В. Вендин // Техника в сельском хозяйстве. – 1995.– №3. – С. 31–32.

152. Вендин, С.В. Обработка семян электромагнитным полем [Текст]: дис. ...докт. техн. наук: 05.20.02 / С.В.Вендин. – Москва, 1994. – 463 с.

153. Вендин, С.В. Теория и математические методы анализа электродинамики процессов СВЧ обработки семян: монография [Текст] / С.В. Вендин. – М.: ЦКБ «Бибком», 2015. – 137 с.

154. Вобликов, Е.М. Послеуборочная обработка и хранение зерна [Текст] / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов, Б.К. Маратов. – Ростов н/Д.: МарТ,,00 2001. – 240 с.

155. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров, врачей [Текст] / под ред.: Н.В. Лазарева и И.Д. Гадаскиной // В 3-х томах. Т.3.: Неорганические и элементорганические соединения. – Изд. 7-е, пер. и доп. – Ленинград: Химия, 1977. – С.16–17.

156. Гинзбург, А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности [Текст] / А.С. Гинзбург. − М.: Пищевая промышленность, 1973. − 527 с.

157. Головина, Т. А. Влияние энергии СВЧ-поля на фитопатогенный комплекс и качественные показатели зерна пшеницы [Текст]: Дис. канд. Биол. наук 03.00.16. − М.: РГБ. – 2005.

158. Голубкович, А.В. Режимы сушки семян с применением УЗ-излучений [Текст] / А.В. Голубкович, С.А. Павлов // В сборнике: Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение производства зерна Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. – 2010. – С. 360-363.

159. Голубкович, А.В. Сушка семян и зерна озоно-воздушной смесью [Текст] / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 1. – С. 37–40.

160. Голубкович, А.В. Энергосбережение при активном вентилировании и низкотемпературной сушке зерна озоно-воздушной смесью [Текст] / А.В. Голубкович, С.П. Рудобашта, Н.Н. Нуриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – №8. – С. 59–60.

161. Голубкович, А.В. Эффективность применения озоно-воздушных смесей в процессах сушки зерна [Текст] / А.В. Голубкович, Ю.Н. Выговский, Н.Ю. Выговская, А.Н. Малов // Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: материалы 26-го Всероссийского семинара. – Москва. – 2003. – С.67–86.

162. Горновский И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч [Текст] – Киев.: Наукова думка, 1987. – 837 с.

163. Горский, И.В. Обработка семян пшеницы озонированным воздухом. [Текст]: дис. канд. техн. наук.: 05.20.02 / И.В.Горский. – М. – 2004. – 202 с.

164. Грачева Н.Н. Использование электроактивированного воздуха для интенсификации сушки зерна активным вентилированием [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Специальность: 05.20.02 / Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия. – Зерноград. – 2012. – 19 с.

165. Грачева, Н.Н. Критериальное уравнение сушки зерна активным вентилированием электроактивированным воздухом [Текст] // Н.Н. Грачева, Васильев А.Н., Будников Д.А. и др. // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – №73(09).

166. Гуляев, Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна [Текст] / Г.А. Гуляев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 240 с.

167. Гухман, А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена [Текст] / А.А. Гухман. – М.: Высш. школа, 1967. – 303 с.

168. Данилов, А. Компьютерный практикум по курсу "Теория управления". Simulink-моделирование в среде Matlab [Текст] / А. Данилов.– М.: МГУИЭ, 2002. – 128 с.

169. Дринча, В.М. Современные тенденции развития сельскохозяйственных машин [Текст] / В.М. Дринча, Б.И. Шихсаидов, Ч.М. Мутуев // Современные проблемы инновационного развития АПК. Сборник научных трудов Всероссийской

научно-практической конференции, посвященной 80-летию "Дагестанского государственного аграрного университета имени М.М. Джамбулатова и 35-летию инженерного факультета. – 2012. – С. 49–53.

170. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании [Текст] / В.П. Дьяков. – М.:Солон – пресс, 2003. – 565 с.

171. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки [Текст] / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: КолосС, 1982. – 239 с.

172. Завьялов, М.А. Исследование нетеплового воздействия электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона на клеточные и споровые культуры [Текст] / М.А. Завьялов, В.А. Ломачинский, А.О. Никонов, А.В. Прокопенко, В.П. Филиппович // Научная сессия МИФИ – М. – 2008. – Том 5.

173. ЗАО научно-производственное предприятие «Магратеп» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Http://магратеп.рф/ (Дата обращения: 01.04.2017).

174. Зимин, Е.М. Совершенствование конструкции зерно-сушильно-очистительных комплексов [Текст] / Е.М. Зимин // Техника в сельском хозяйстве. – 1981. – № 11. – С. 52 – 53.

175. Инжиниринговая компания «Синергис» Микроволновые технологии и оборудование (г. Санкт-Петербург) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Http://senergys.ru/ (дата обращения: 06.04.2020).

176. Исмаилов, Э.Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений [Текст] / Э.Ш. Исмаилов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

177. Казарцев, Д.А. Совершенствование процесса сушки семян кориандра в аппарате с СВЧ-энергопроводом. [Текст]: дис. … канд. техн. наук.: 05.18.12 / Д.А.Казарцев. – Воронеж, 2004. – 147 с.

178. Каталог продукции производственной компании OWEN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://owen.ru/catalog (дата обращения: 06.04.2020).

179. Каун, В.Д. Скорость потока влаги зерна при СВЧ обработке [Текст] / В.Д. Каун // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – №4. – С. 6–8.

180. Качеишвили, С.В. Обоснование параметров обработки семян зерновых культур в электростатическом поле [Текст]: дис. … канд. техн. наук / С.В. Качеишвили; Азово-Черномор. гос. агроинж. акад. – Зерноград, 2000. – 120 с.

181. Киров, Н. Консервирование влажного зерна [Текст] / Н. Киров, О. Божинова, Л. Недляков; под. ред. В.И. Анискин. – М.: КолосС, 1982. – 160 с.

182. Клоков, Ю.В. Теория удаления влаги. 1. О градиентах процесса удаления влаги [Текст] / Ю.В.Клоков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – №1.– С. 7–10.

183. Клоков, Ю.В. Теория удаления влаги. 3. О коэффициенте затухания электромагнитных волн при диссипации энергии СВЧ в пищевых продуктах [Текст] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. – №12. – С. 28 –29.

184. Клоков, Ю.В. Теория удаления влаги. 4. Температурный коэффициент диссипируемой энергии поля СВЧ в пищевых продуктах [Текст] / Ю.В.Клоков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. – № 2.– С. 29 – 31.

185. Клоков, Ю.В. Теория удаления влаги. О нагреве пищевых продуктов в ЭМП СВЧ "объемно" [Текст] / Ю.В.Клоков // Хранерие и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 7. – С.29 – 31.

186. Ковалев, В.В. Методы оценки инвестиционных проектов [Текст] / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 220 с.

187. Компания ООО "Евроинтех" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Http://www.eurointech.ru/ (Дата обращения: 04.07.2018).

188. Краусп, В.Р. Автоматизация зернопунктов [Текст] / В.Р. Краусп, В.Н. Расстригин, В.Н. Грошев. – М.: Россельхозиздат, 1973. – 248 с.

189. Краусп, В.Р. Автоматизация послеуборочной обработки зерна [Текст] / В.Р Краусп – М.: Машиностроение, 1975. – 277 с.

190. Крылов, Э.И. Анализ эффективности инвестиционной и инновационной деятельности предприятий: учеб. пособие [Текст] / Э.И. Крылов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 608 с.

191. Ксенз, Н.В. Озон в технологиях сельскохозяйственного производства [Текст] / Н.В. Ксенз. – Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2008. – 176 с.

192. Кулагин, М.С. Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна и семян [Текст] / М.С. Кулагин, В.М. Соловьев, В.С. Желтов. – М.: КолосС, 1979. – 256 с.

193. Курдюмов, В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография [Текст] / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин. – Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

194. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков – М. Издательство МЭИ, 2010. – 160с.

195. Куцакова, В.Е. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов [Текст] / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.

196. Кучин, Л.Ф. Воздействие низкоэнергетическими СВЧ-полями на биологические объекты растениеводства [Текст] /Л.Ф. Кучин // Использование СВЧ-энергии в с.х. производстве: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ.– Зерноград, 1989.– С. 18–23.

197. Левков, Л.Э. Терморежимы и циклы вентилирования зерна в металлических хранилищах. [Текст]: дис. … канд. техн. наук.: 05.20.01 / Л.Э.Левков. – М., 2004. – С. 18–23.

198. Ленкова, Т. Эффективность СВЧ-обработки зерна [Текст] / Т. Ленкова, П. Паньков // Комбикорма. – 2000. – № 4. – С. 31– 32.

199. Лоенко, В.В. СВЧ-сушка моркови и растительного сырья [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / В.В. Лоенко. – М., 1999. – 18 с.

200. Лыков, А.В. Исследование процесса сушки в поле высокой частоты [Текст] / А.В. Лыков, Г.А. Максимов // Тепло-и массообмен в капиллярно-пористых телах. – Л., М.: Госэнергоиздат, 1957. – С. 133-142.

201. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Л., М.: Госэнергноиздат, 1963. – 535 с.

202. Максимов, Г.А. Исследование процессов тепло- и массообмена при внутреннем источнике [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук / Г.А. Максимов; МТИПП. – М., 1956. – 35 с.

203. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна [Текст] / Н.И. Малинин. – М.: Агропромиздат, 1989. – 159с.

204. Малин, Н.И. Теория и практика энергосберегающей сушки зерна [Текст]: дисс. … доктора техн. наук.: 05.18.01 / Н.И. Малин. – М.: Хлебпродинформ, 2001. – 381 с.

205. Малин, Н.И. Энерго– и ресурсосбережение при сушке зерна / Н.И. Малин, Ю.А. Канатников / Актуальные проблемы энергетики АПК материалы VII международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Трушкина В.А. – 2016. С.124-131.

206. Матвеев, Б.А. Влияние электромагнитного поля сверхвысокой частоты на всхожесть семян щетинника зеленого [Текст] / Б.А. Матвеев // Применение энергии высоких и сверхвысоких частот в технологических процессах сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1983. – С. 50-54.

207. Мельник, Б.Е. Вентилирование зерна [Текст] / Б.Е. Мельник. – М.: КолосС, 1970. –183 с.

208. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники: нормативно-справочный материал [Текст]. Ч.2. – М.: Минсельхозпром России, 2000. – 252 с.

209. Миляев, В.А. Ядовитый озон. Новая экологическая угроза для России [Текст] / В.А.Миляев, С.Н.Котельников // Экология и жизнь. – 2008. – №2. – С. 53–54.

210. Монастырский, О.А. Токсины фитопатогенных грибов [Текст] // Защита и карантин растений. – 1996. – №3. – С. 12-14.

211. Морозов, О.А. Промышленное применение СВЧ-нагрева [Текст] / О.А. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко, В. Требух, И. Воробьев // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – №3(101). – С. 110-113.

212. Морозов, О.А. Микроволновая установка большой производительности для обработки злаковых культур [Текст] / О.А. Морозов, А.Н. Каргин, Д.А. Будников и др. // Междунар. журн. Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №3 часть 1. – С. 178–183.

213. Некрутман, С.В. Тепловая обработка пищевых продуктов в электрическом поле сверхвысокой частоты [Текст] / С.В. Некрутман. – М.: Экономика, 1972. – 141 с.

214. Новикова, Г.В. Установка для обеззараживания комбикормов комплексным воздействием электрофизических факторов [Текст] / Г.В. Новикова, Т.В. Шаронова, М.В. Белова, Г.Л. Долгов // Монография. – Чебоксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, – 2014. – 135 с. (6,75 п.л., ISBN 978-5-7677-1897-9).

215. Общество с ограниченной ответственностью «Аграрные сверхвысокочастотные технологии» (ООО «АСТ») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.act-agro.ru/ (Дата обращения: 04.07.2018).

216. Окресс, Э. СВЧ энергетика [Текст] / Э.Окресс – М.: МИР, 1971. – Т.2. – 272 с.

217. ООО «Производственная компания Старт» Инфракрасное оборудование, технологии, инжиниринг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pcstart.ru/barabannaya-sushilka-sb-3 (Дата обращения: 04.07.2018).

218. Остапенков, А.М. К решению задачи тепломассопереноса в продукте, нагреваемом в поле СВЧ [Текст] / А.М. Остапенков // Электронная обработка материалов. – 1979. – № 4. – С. 76-78.

219. Оценка качества зерна урожая 2016 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.fsvps.ru/fsvps-docs/ru/news/files/20306/grain_presentation.pdf (дата обращения 10.05.2018).

220. Павлык, В.А. Исследование процесса сушки зернового вороха в ионизированной воздушной среде [Текст] / В.А. Павлык, А.Е. Иванов // Механизация и автоматизация технологических процессов в агропромышленном комплексе: сб. науч. тр. / ВИМ. – М., 1998.– Ч.1. – 168 с.

221. Пат. 2282109 Российская Федерация, МПК F24F3/16. Способ озонирования воздуха жилого помещения и устройство для его осуществления [Текст] / Фатыхов Р.А.; заявитель и патентообладатель Фатыхов Р.А. – № 2005108686/06; заявл. 28.03.05; опубл. 20.08.06.

222. Пат. 2355963 Российская Федерация, МПК F26B17/12. Бункер активного вентилирования [Текст] / Цугленок Н.В., Пиляева О.В., Демский Н.В., Манасян С.К., (ФГОУ ВПО Красноярский Государственный Аграрный Университет). – № 2008101301/06, заявл. 09.01.08; опубл. 20.05.09, Бюл. – 2009. – №14.

223. Патент № 159476 РФ МПК G01R 21/02. Устройство для измерения удельной мощности электромагнитного поля СВЧ в объеме, заполненном сыпучим либо жидким материалом [Текст] / Д.А. Будников, А.Н. Васильев и др. заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВИЭСХ– №2015143411/28 заявл. 13.10.2015; опубл. 10.02.2016., Бюл. №4.

224. Патент № 179642 РФ МПК A01C 1/00 Устройство обеззараживания зерна для зерно– и семяочистительного агрегата [Текст] / Васильев А.Н., Будников Д.А., Васильев А.А. Заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – № 2015150524, заявл. 25.11.2015; опубл. 21.05.2018., Бюл. №15.

225. Патент № 2501201 РФ МПК A01C 1/00 A01C 1/06. Способ обеззараживания зерна [Текст] / Васильев А.А., Будников Д.А., Васильев А.Н., Краусп В.Р. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №2012113912/13 заявл. 10.04.2012; опубл. 20.12.2013., Бюл. №35.

226. Патент № 2501203 РФ МПК A01C 1/06. Способ обеззараживания зерна и продуктов его переработки [Текст] / Васильев А.А., Будников Д.А., Васильев А.Н., Краусп В.Р. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №2012113911/13 заявл. 10.04.2012; опубл. 20.12.2013., Бюл. №35.

227. Патент № 2502027 РФ МПК F26B 3/06. Способ сушки зерна [Текст] / Будников Д.А., Васильев А.Н., Грачева Н.Н. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №2012113909/06 заявл. 10.04.2012; опубл. 20.12.2013., Бюл. №35.

228. Патент № 2505766 РФ МПК F26B 25/22 F26B 3/02. Способ управления процессом сушки зерна электроактивированным воздухом [Текст] / Будников Д.А., Васильев А.Н. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №2012113910/06 заявл. 10.04.2012; опубл. 27.01.2014., Бюл. №3.

229. Патент №113631 РФ МПК A01F 25/14. Бункер для хранения и вентилирования зерна [Текст] / Васильев А.Н., Будников Д.А., и др. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №201138312/13 заявл. 19.09.2011; опубл. 27.02.2012., Бюл. №6.

230. Патент №2479982 РФ МПК A01F 25/14. Способ сушки зерна в бункерах активного вентилирования [Текст] / Васильев А.Н., Будников Д.А., и др. заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии – №201138313/13 заявл. 19.09.2011; опубл. 27.04.2013., Бюл. №2.

231. Пахомов, В.И. Динамика СВЧ нагрева при микронизации зерна [Текст] / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Обоснование и разработка новых технологий и технологических средств в животноводстве: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 2001. – С. 100-109.

232. Пахомов, В.И. Обоснование параметров излучателя сушилки СВЧ [Текст] / В.И. Пахомов, В.И. Шустов // Математическое моделирование уборочно-транспортных процессов: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1986. – С. 138-143.

233. Пахомов, В.И. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией [Текст] / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Мех. и электр. с.-х. – 2000. – № 9. – С. 8-10.

234. Пахомов, В.И. Основные закономерности тепломассопереноса при микронизации зерна с использованием СВЧ-энергии [Текст] / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Совершенствование технологических процессов, машин и аппаратов в инженерной сфере АПК: материалы науч. конф. / АЧГАА. – Зерноград. 1999. – С. 79.

235. Пахомов, В.И. Параметры процесса сушки зерна с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты колебаний [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Зерноград, 1988. – 220 с.

236. Пахомов, В.И. Повышение кормовой ценности зерна высокоинтенсивной тепловой СВЧ обработкой [Текст] / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – №4. – С. 4-5.

237. Пахомов, В.И. Сушка измельченных растительных материалов с использованием СВЧ-энергии [Текст] / В.И. Пахомов, Е.Д. Прончев // Исследование и разработки по механизации возделывания, уборки и переработки сельскохозяйственных культур: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1992. – С. 171-177.

238. Пенской А.С. Волны в волноводах при наличии тонких пленок полярных диэлектриков [Текст]: дис. ... канд. Физ.-мат. наук: 01.04.04 – Волгоград, 2016. – 111 с.

239. Потенциал оптимизации производства зерновых в мире и в России [Электронный ресурс]: Автономная некоммерческая организация Международный независимый институт аграрной политики (АНО МНИАП) URL: http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Potencial-optimizacii-proizvodstva-zernovyh-v-mire-i-v-Rossii/ дата обращения 05.04.2020.

240. Пюшнер, Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. [Текст] / Г. Пюшнер.– М.: «Энергия», 1968.– 311 с.

241. Распространение фузариоза [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rosselhoscenter.com/index.php/analitika/7018-informatsiya-o-rasprostraneniya-fuzarioza-na-posevakh-zernovykh-kultur-v-otdelnykh-sub-ektakh-yuga-rossijskoj-federatsii-v-2016-g (Дата обращения 10.05.2018).

242. Рекомендуемые нормы и правила по предотвращению и уменьшению загрязнения микотоксинами хлебных злаков CAC/RCP 51-2003. - Продовольственная сельскохозяйственная организация Объединённых Наций (FAO), Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Http://www.codexalimentarius.org (Дата обращения 10.05.2018).

243. Ресурсы и использование зерна [Электронный ресурс]: Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат). – Режим доступа: https://www.gks.ru/ (дата обращения 05.04.2020).

244. Рогов, И.А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 212 с.

245. Рогов, И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Агропромиздат, 1986. – 351 с.

246. Рогов, И.А. Физические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 584 с.

247. Рогов, И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат. 1988. – 272 с.

248. Руденко, Н.Б. Совершенствование конструкций бункеров активного вентилирования [Текст] / Н.Б. Руденко, Н.Н. Грачева, Д.А. Будников // Труды I Всероссийской заочной научно-практической конференции «Новые технологии в промышленности и сельском хозяйстве» (г. Бийск, декабрь 2012 г.). – Бийск, 2012. – С. 245-250.

249. Рудобашта, С.П. Кинетика низкотемпературной сушки зерна озонированным воздухом [Текст] / С.П. Рудобашта, Н.Н. Нуриев // 1-я международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ–2002): труды конференции: В 4 т.– Москва, 2002. –Т.4. – С. 56–59.

250. Сакун, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна [Текст] / В.А. Сакун. – М.: КолосС. 1969. – 176 с.

251. Сакун, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов [Текст] / В.А.Сакун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС. 1974. – 216 с.

252. СКНИИМЭСХ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://skniimesh.ru (Дата обращения: 04.07.2018).

253. Сорочинский, В.Ф. Повышение эффективности конвективной сушки и охлаждения зерна на основе интенсификации тепломассообменных процессов. [Текст]: дис. … док. техн. наук.: 05.18.12 / В.Ф. Сорочинский – М., 2003. – 407 с.

254. Сторчевой, В.Ф. Нанотехнология озонирования и ионизации воздушной среды в птицеводстве [Текст] / В.Ф. Сторчевой // Наноэлектротехнологии в сельском хозяйстве: материалы научно-технического семинара. – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – С. 54–61.

255. Сэнтин, Э. Рост плесневых грибов и продуцирование микотоксинов [Текст] // Европейский семинар по микотоксинам. Оценка воздействия микотоксинов в Европе / Европейский лекционный тур 7 февраля – 5 марта 2005. – С.27-42.

256. Тихенький, В.И. Методы и средства повышения эффективности процесса сушки семян при электроразрядном воздействии на поток воздуха: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст]: 05.20.01 / В.И. Тихенький. – Сагнкт Петербург-Пушкин: НПО «Нечерноземагромаш», 1993. – 16 с.

257. Ткачев, Р.В. Электроактивирование процесса сушки семян: диссертация кандидата технических наук [Текст]: 05.20.02 / Р.В. Ткачев. – Москва, 2000. – 177с.

258. Троцкая, Т.П. Озонная технология сушки зерна [Текст] / Т.П. Троцкая, А.А. Литвинчук, А.М. Миронов, В.М. Грищук, О.Л. Сороко // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2008. – № 2(2). – С. 20–25.

259. Троцкая, Т.П. Электроактивирование процессов сушки растительных материалов: автореферат диссертации доктора технических наук [Текст]: 05.20.02 / Т.П. Троцкая. – Москва, 1998. – 31 с.

260. Троцкая, Т.П. Энергосберегающая технология сушки сельскохозяйственных материалов в озоно-воздушной среде [Текст] / Т.П. Троцкая. – Минск: БелНИИМСХ, 1997. – 750 с.

261. Тутельян, В.А. Природные токсины и проблемы биобезопасности [Текст] // Тез. док. 2-го съезда токсикологов России. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России. – 2003. – С. 32-35.

262. Удалов, В.Н. Термообработка пищевых продуктов с применением СВЧ-энергии [Текст] / В.Н. Удалов, С.В. Симовьян, А.И. Маштакова, Н.К. Беляева. – М.: «Электроника», 1985. – 42 с.– Электроника (ВЧ): Обзоры по электронной технике / ЦНИИ.

263. Удинцова, Н.М. Разработка способа применения электрооборудования и обоснование мощности электрокалориферов бункеров активного вентилирования при предпосевной обработке семян [Текст]: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Зерноград, 1998. – 24 с.

264. ФАО. 2019. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства. Курс на сокращение потерь и порчи продовольствия. Рим. Лицензия: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. [Электронный ресурс]: Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН — организация ООН URL: http://www.fao.org/3/ca6030ru/ca6030ru.pdf дата обращения 05.04.2020.

265. Фомин, Ю.А. Комплексная механизация и автоматизация по хранению и переработки зерна [Текст] / Ю.А. Фомин, Н.А. Малин, Т.В. Шленская. – М.,1986.– 57 с.– (Автоматизация производственных процессов на предприятий отрасли: Обзорная информация / ЦНИИТЭИ Минхлебпродукта СССР)

266. Харвей, А. Ф. Техника сверхвысоких частот. Т.2: пер. с англ. [Текст] / А.Ф.Харвей. – М.: Советское радио, 1965.– 774 с.

267. Хасанова, З.М. Действие электрического поля на морфофизиологические особенности и продуктивность яровой пшеницы [Текст]: дис. … док. биол. наук / З.М. Хасанова. – СПб, 1992. – 423 с.

268. Хмелев, В.Н. Исследования процесса ультразвуковой сушки [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.В. Неверов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1 (29). – С. 69-75.

269. Хмелёв, В.Н. Модель влияния ультразвукового воздействия на массоперенос в гетерогенных системах [Текст] / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, Г.А. Боброва // В сборнике: Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2019) Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2019. – С. 38-42.

270. Шванская, И.А. Сушка семян масленичных культур с использованием СВЧ нагрева [Текст] / И.А. Шванская // Техника и оборудование для села. – 2003. – №8. – С. 18–19.

271. Шибаев, Г.Н. Активное вентилирование семян [Текст] / Г.Н.Шибаев, Б.А. Карпов. – М.: Россельхозиздат, 1969. – 110 с.

272. Экологически чистый способ сушки предпосевной обработки семян зерновых культур озонированным воздухом [Текст] // НТИ и рынок. – 1998. – №5. – С. 42-43.

273. Электроозонированная сушка зерна активны вентилированием [Текст] // Повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники: материалы междунар. науч.– практ. конф., посвященной 70-летию академика С.И. Назарова. – Горки, 1998. – С.22-24.

274. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов [Текст]: Справочник / Под ред. И.А. Рогова. – М., Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 288 с.

275. Энергосбережение в процессах сушки с.-х. материалов [Текст] // Достижения науки – сельскому хозяйству «Верхневолжья»: тез. докл.XVI научно-практич. конф. – Тверь, 1993. – С. 99.

276. Юсупова, Г.Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование комплексной системы обеззараживания зерна и продуктов его переработки. Дис. доктора с.х. наук [Текст]: 05.18.01 / Г.Г. Юсупова – М.: РГБ, – 2005. – 302 с.

277. AACCI March 2008, Volume 85, Number 2 Pages 224 – 229.

278. Alexsandar Antic, James M. Hill The double-diffusivity heat transfer model for grain stores incorporating microwave heating. Applied Mathematical Modelling Volume 27, Issue 8, August 2003, Pages 629–647.

279. Bahareh Abdoli, Dariush Zare, Abdolabbas Jafari & Guangnan Chen (2018): Evaluation of the air-borne ultrasound on fluidized bed drying of shelled corn: Effectiveness, grain quality, and energy consumption, Drying Technology, DOI: 10.1080/07373937.2018.1423568

280. Baptista F. Energy Efficiency in Agriculture // F. Baptista, L.L. Silva, C. de Visser/ 5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.

281. Brockley, R.P. Foliar sampling guiedelines and nutrient interpretative criteria for lodgepole pine [Text] // B.C. Ministry of forest, research branch (Victoria), 2001. – Extension. – №52.

282. Buchner R., Barthel J. and Stauber J., The dielectric relaxation of water between 0 C and 35 C, Chemical Physics Letters, 306 (1999) 57-63.

283. Budnikov, D., Vasilyev, A.N. Development of a Laboratory Unit for Assessing the Energy Intensity of Grain Drying Using Microwave. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Volume 1072. Pp. 93-100.

284. Budnikov, D., Vasilyev, A.N. The Mechanism of Intensification of Heat and Moisture Transfer During Microwave-Convective Processing Grain. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Volume 1072. Pp. 231-239.

285. Budnikov, D.A. Increasing Efficiency of Grain Drying With the Use of Electroactivated Air and Heater Control / D.A. Budnikov, A.N. Vasilyev ets. // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resourcesfor Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — P. 255–282. — ISBN 9781522538677. — DOI: 10.4018/978- 1- 5225- 3867- 7.ch011. — URL: https://www.igi-global.com/chapter/increasing-efficiency-of-grain-drying-with-the-use-of-electroactivated-air-and-heater-control/201341.

286. Budnikov, D.A. Propagation of Microwave Fields in Grain Material of Various Densities / D.A. Budnikov, A.N. Vasilyev, D.A. Tikhomirov, A.A. Vasilyev // Springer Innovations in Communication and Computing. 2019. 115p. Pp. 69-70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03898-4

287. Budnikov, D.A. The Model of Optimization of Grain Drying with Use of Eletroactivated Air / D.A. Budnikov, A.N. Vasiliev // Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, volume 866). 28 September 2018. ICO 2018: Intelligent Computing & Optimization. 2019. Volume 866. Pp 139-145 DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_14

288. Budnikov, D.A. The Use of Microwave Energy at Thermal Treatment of Grain Crops / D.A. Budnikov, A.N. Vasiliev // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resourcesfor Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — P. 475-499. — ISBN 9781522538677. — DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch020. — URL: https://www.igi-

global.com/chapter/the-use-of-microwave-energy-at-thermal-treatment-of-grain-crops/201350.

289. Budnikov, D.A. To Methodology Research of Microwave: Convective Processing of Grain / D.A. Budnikov, A.N. Vasiliev, A.A. Vasiliev, A.A. Belov // Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2019. — P. 163-195. — ISBN 9781799812166. — DOI: DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch007 — URL: https://www.igi-global.com/chapter/to-methodology-research-of-microwave/239103.

290. Bykov, Y.V. [Text] /Y.V. Bykov, K.I. Rybakov, E. Semenov // J. Pys D: Appl. Phys. 2001.– V 34.– P. 55.

291. Calla, O P N [Text] / O. Calla, I. Hannan, IJRSP, vol. 30, April 2001. – P. 106-111.

292. Cheng, W.P; Fang, H.J. ets. Using SCADA to Detect and Locate Bursts in a Long-Distance Water Pipeline. WATER. 2019. Vol. 12. #12. DOI: 10.3390/w10121727.

293. Copson, D.A. [Text] / D.A. Copson / Microwave Heating, Westport, Connecticut, AVI, 1962. – 292 p.

294. De Freitas et al. Development of a solid-liquid extraction method with low-temperature partitioning for the determination of insecticides in ozonized maize grain. Quimica nova. 2014. Vol. 37, #2, pp. 238-243.

295. De Freitas et al. (2017). Degradation kinetics of pirimiphos-methyl residues in maize grains exposed to ozone gas. Journal of stored products research, vol. pp. 1-5.

296. Debabandya Mohapatra, Saroj Giri, Abhijit Kar Effect of Microwave Aided Disinfestation of Callosobruchus Maculatus on Green Gram Quality International Journal of Agriculture and Food Science Technology. ISSN 2249-3050 Volume 5, Number 2 (2014), pp. 55-62.

297. Decareau, R.V. For microwave heating tune to 915 MHz or 2450 MHz [Text] / R.V. Decareu // Food Eng., 37, 1965. – P. 55-56.

298. Deep N. Yadav, Prakash Eknathrao Patki, Gopal Kumar Sharma, Gopal Kumar Sharma Effect of microwave heating of wheat grains on the browning of dough and

quality of chapattis International Journal of Food Science & Technology 43(7):1217 - 1225·December 2007.

299. Determination of water content of soil by the microwave oven method D 4643-93 [Text] // Annual book of ASTM standarts, 1996.

300. English N. J. and MacElroy J. M. D., Molecular dynamics simulations of microwave heating of water, Journal of Chemical Physics,118 (2003) 1589-1592.

301. Fadhel, M. I.; Sopian, K.; Daud, W. R. W. (2011). Renewable & sustainable energy reviews. Vol: 15 # 2 P. 1152-1168. DOI: 10.1016/j.rser.2010.10.007

302. Fawwaz, T Ulaby Microwave remote sensing Active and Passive Vol. 1 [Text] / Fawwaz, T Ulaby, Richard, K Moore and Adrian K Fung // Addision-Wesley publishing company Inc. Vol. 3 (1986) Artech House Inc. 1 1981. – 317 p.

303. Fernandes, F. A. N. et al. (2016). Effects of Ultrasound Assisted Air-Drying on Vitamins and Carotenoids of Cherry Tomatoes. Drying Technol., 34(8), 986–996.

304. Gongar, I. Uber die mechanische und dielectrische Zerklainerung von Getreibe – und Olsaaten, m. Fetle Seifen – Anstrichmittee, 1968. - № 6. – P. 28-30.

305. Granella, Suian Jose; Christ, Divair; Werncke, Ivan et al. (2018). Effect of drying and ozonation process on naturally contaminated wheat seeds. Journal of cereal science. Vol.80, pp. 205-211. DOI: 10.1016/j.jcs.2018.03.003

306. Grothaus, H.P. Einsatz thermischer Verfahren zur Abtotung von Phoma betae in Zuckerrubensaatgut unter besonderer Berucksichtigung von Mikrowellenenergie [Text]: Diss... Gottingen, 1997. – 139 p.

307. Grundas, S., Warchalewski, J.R., Dolińska, R. and Gralik, J. (2008), Influence of Microwave Heating on Some Physicochemical Properties of Wheat Grain Harvested in Three Consecutive Years. Cereal Chemistry, 85: 224-229. doi:10.1094/CCHEM-85-2-0224

308. Hasted J. B., Liquid water: Dielectric properties, in Water A comprehensive treatise, Vol 1, Ed. F. Franks (Plenum Press, New York, 1972) pp. 255-309.

309. He, Z.; Zhang, Y. et al. (2016). Reducing Wood Drying time by Application of Ultrasound Pretreatment. Drying Technology, 34(10), 1141–1146.

310. Hoover, M.W. Experimental and engineering aspects of accelerated freeze-drying of foods by means of UHF dielectricheating / M.W. Hoover, A. Markantonatos, W.N. Parker // Food Technol., 1966.- v. 20.– pp. 103-110.

311. Iason, A.C. Dielectric thawing offish [Text] / A.C. Iason, H.R. Sanders. Experiments with frozen with, Food Technol., 16, 1962. - P. 107 - 112.

312. Jerzy R. Warchalewski et al. Changes in Microwave-treated Wheat Grain Properties Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. 2011. pp. 503-530.

313. Jomeh, Z.E. Microwave Draying, as Against Combined Method of Drying Sliced Apple [Text] / Z.E. Jomeh, G.R. Askari. Iran.J. Agr.Sc., 2004. – T. 35.– №3. – pp. 777-785.

314. Kaasová J., Hubáčková B., Kadlec P., Příhoda J., Bubník Z. (2002). Chemical and biochemical changes during microwave treatment of wheat. Czech J. Food Sci., 20: 74–78

315. Kaatze, U., R. Behrends and R. Pottel, Hydrogen network fluctuations and dielectric spectrometry of liquids, Journal of Non-Crystalline Solids, 305 (2002) 19-28.

316. Keey, R.B. DRYERS (2011), Thermopedia DOI: 10.1615/AtoZ.d.dryers

317. Kent M. Electrical and dielectric properties of food materials: a bibliography and data. Science and Technology Publishers Ltd, 1987, 149 p. ISBN 0 948323 60 4.

318. Khmelev V.N. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems [Text] /V.N.Khmelev, S.V.Levin, S.N.Tsyganok, A.N.Lebedev //International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2007. - P.293-298.

319. Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications / U Kogelschatz // Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003. – Vol. 23. – No 1, March. – P. 1-46.

320. Kraszewski A. Composite model of the complex permittivity of ceral grain / A. Kraszewski, S.O. Nelson // J. agric. Engng Res. (1989) 43, 211-219.

321. Lentz, C.P. Thermal conductivity of meats, fast, gelatis gels and ice [Text] / C.P. Lentz. Food Technol., 15, 1961. -P. 243-247.

322. M. Bourgin et al. (2011). Ozonation of imidacloprid in aqueous solutions: Reaction monitoring and identification of degradation products. Journal of Hazardous Materials, 190, 60–68. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.065

323. Magdalena Zielinska & Marek Markowski (2017). The effect of microwave-vacuum, ultrasonication and freezing on mass transfer kinetics and diffusivity during osmotic dehydration of cranberries. Drying Technology, DOI: 10.1080/07373937.2017.1390476

324. Mann, C.A. Mechanism of dielectric drying [Text] / C.A. Mann, N.H. Geaglsre, A.S. Oslon. Industr. Eng Chem. 8. 1949, p. 1686 - 1964.

325. Meissner T. and Wentz F. J., The complex dielectric constant of pure and sea-water from microwave satellite observations, IIEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42 (2004) 1836-1849.

326. Microwave dryer to be available in early 1982 [Text] // Farm Industry News. -Midwest. -1981. – 214 p.

327. Microwave Journal [Text], v. 19, - № 8, august, 1976, - P. 13.

328. Mohapatra, D., & Mishra, S. (2011). Current trends in Drying and Dehydration of Foods. In Food Engineering. NOVA Science Publishers Inc.

329. Mohapatra, Giri, & Kar. (2014). Effect of Microwave Aided Disinfestation of Callosobruchus Maculatus on Green Gram Quality. International Journal of Agriculture and Food Science Technology, 5(2), 55-62.

330. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press. 2015. 229 p.

331. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural products and some applications // Res. Agr. Eng., 54, 2008(2): 104-112.

332. Nelson, S. O. (2015). Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press.

333. Nelson, S.O. (2004). RF and microwave permittivities of insects and some applications. URSI EMTS, 1224-1226.

334. Nelson, S.O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. Res. Agr. Eng., 54(2), 104-112.

335. Okress, E.S. Microwave Power Engineering [Text] / E.S. Okres – New – York – London, 1968, v.2. – 270 p.

336. Ospanov A.B., Vasilev A.N. et al. (2016). Changing parameters of the microwave field in the grain layer. J.Eng.Applied Sci., 11 (Special Issue 1): 2915-2919. ISSN: 1816-949X

337. Ospanov A.B., Vasilev A.N. et al. (2016). Controlling reactions of biological objects of agricultural production with the use of electrotechnology. International Journal of Pharmacy and Technology, IJPT, vol. 8, Issue No. 4, 26855-26869 pp., ISSN: 0975-766X.

338. Pallai-Varsányi E., Neményi M., Kovács A.J., Szijjártó E. Selective Heating of Different Grain Parts of Wheat by Microwave Energy. Advances in Microwave and Radio Frequency Processing. 2007. 312-320.

339. Pan, Zhongli & Atungulu, Griffiths. (2010). Infrared Dry Blanching. 10.1201/9781420090994-c9.

340. Puescner, H. Heating with microwaves [Text] / H. Puesner. – Holland, 1966. – 317 p.

341. Raila Algirdas et al. (2006). Application of ozone for reduction of mycological infection in wheat grain. Annals of agricultural and environmental medicine. Vol. 13, #2 pp. 287-294.

342. Ranjbaran M, Zare D, Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans, Energy Volume 59, 15 September 2013, pp. 484-493, URL: dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.057.

343. Ratti, C., & Mujumdar, A. S. (1995). Infrared drying (2nd ed). In A. S.Mujumdar (Ed.), Handbook of industrial drying (Vol. 1, pp. 567-589), Marcel Dekker.

344. Rechcigl, J.E. Comporation of various soil drying tehniquest on extractable nutrients [Text] / J.E. Rechcigl, G.G. Payne, C.A. Sanchez // Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1992. Vol 23, № 17-20. P 2347-2363.

345. Shogo Nishiyama, Tetsuya Nagata et all The Distance to the Galactic Center Derived from Infrared Photometry of Bulge Red Clump Stars The Astrophysical Journal, 647:1093-1098, 2006 August 20.

346. Sifri, M. A summary of a panel discussion on safety levels for mycotoxins // The World Mycotoxin Forum - the fourth conference, November 6-8, 2006, Cincinnati, Ohio, USA. Abstracts of lectures and posters. – P. 90-91.

347. Staney, E. Microwave Vacuum drying [Text] / E. Staney // Food Eng. - 1979. - v. 51. P 73-79.

348. Thakur. A.K., GuptaI A.K. Energy Conversionand Management 47 (2006) 3069-3083.

349. Tireki, Sumnu, & Esin. (2006). Effect of Microwave, Infrared and Infrared-assisted Microwave Heating on the Drying Rate of Bread Dough. American Journal of Food Technology. DOI: 10.3923/ajft.2006.82.93

350. Trygve Magne Eikevik, et al. (2012). Microwave-Assisted Atmospheric Freeze Drying of Green Peas: A Case Study, Drying Technology. An International Journal, 30:14, 1592-1599.

351. Vankatesh M.S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials / M.S. Vankatesh, G.S.V. Raghavan // Biosystems Engineering (2004) 88(1), 1–18 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007.

352. Vankatesh M.S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. Biosystems Engineering (2004) 88(1), 1–18 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007.

353. Van't Land, C. M. (1984) Selection of industrial dryers, Chem. Eng., 91(5), 53-61.

354. Vasiliev A.N., Ospanov A.B., Budnikov D.A. ets. Improvement of grain drying and disinfection process in the microwave field. Monography. – Almaty: Nur-Print, 2017. - 155p. ISBN 978-601-7869-72-4.

355. Vasiliev, A.N. How to Manage the Effectiveness of Presowing Treatment of Seeds / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov, A.A. Vasiliev ets. // Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2019. — P. 262-286. — ISBN 9781799812166. — DOI: DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch011 — URL:

https://www.igi-global.com/chapter/how-to-manage-the-effectiveness-of-presowing-treatment-of-seeds/239107.

356. Vasiliev, A.N. Increasing Efficiency of Grain Drying With the Use of Electroactivated Air and Heater Control / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov, N.N. Gracheva, A.A. Smirnov // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resourcesfor Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — P. 255–282. — ISBN 9781522538677. — DOI: 10.4018/978- 1-5225- 3867- 7.ch011. — URL: https://www.igi-global.com/chapter/increasing-efficiency-of-grain-drying-with-the-use-of-electroactivated-air-and-heater-control/201341.

357. Vasiliev, A.N. Influence of the Direction of Air Movement in the Microwave-Convection Drier on the Energy Intensity of the Process / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov, N.B. Rudeko, N.N. Gracheva // Springer Innovations in Communication and Computing. 2019. 115p. Pp. 23-30. ISBN 9 78-3-030-03897-7 ISBN 9 78-3-030-03898-4 https://doi.org/10.1007/978-3-030-03898-4

358. Vasiliev, A.N. The Functional Dependencies of the Drying Coefficient for the Use in Modeling of Heat and Moisture-Exchange Processes / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov // Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, volume 866). 28 September 2018. ICO 2018: Intelligent Computing & Optimization. 2019. Volume 866. Pp 239-DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_24

359. Vasiliev, Aleksey N., Goryachkina, V. P., Budnikov, Dmitry Research Methodology for Microwave-Convective Processing of Grain. International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE)9(2) April-June 2020. Article: 1. Pages: 11. DOI: 10.4018/IJEOE.2020040101.

360. Vasilyev, A.N. The mathematical model of grain drying with the use the electroactivated air // A.N. Vasilyev, N.N. Gracheva, D.A. Budnikov // Research in Agricultural Electric Engineering – 2014, vol. 2, no. 1, pp. 32-37.

361. Wang J. and Nguyen A. V., Historical perspective A review on data and predictions of water dielectric spectra for calculations of van der Waals surface forces, Advances in Colloid and Interface Science, (2017) Article in press, doi.: 10.1016/j.cis.2017.10.004.

362. Wang, Y. (2011). Review of dielectric drying of foods and agricultural products. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 4(1). Retrieved from http://www.ijabe.org

363. Warchalewski, J. R., & Gralik, J. (2010). Influence of microwave heating on biological activities and electrophoretic pattern of albumin fraction of wheat grain. Cereal Chemistry, 87(1), 35-41.

364. Wilson, Shante Development of Infrared Heating Technology for Corn Drying and Decontamination to Maintain Quality and Prevent Mycotoxins. 2016. Theses and Dissertations. 1542.

365. Water and Microwaves. Доступ: http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html (Дата обращения: 13.07.2015).

366. Yunyang Wang Review of dielectric drying of foods and agricultural products/ Yunyang Wang, Yuanrui Li, Shaojin Wang, Li Zhang, Mengxiang Gao, Juming Tang // Int J Agric & Biol Eng Open Access at http://www.ijabe.org Vol. 4 No.1

367. Zhang, F; Dai, J.C. ets. Investigation of the Pitch Load of Large-Scale Wind Turbines Using Field SCADA Data. Energies. 2018. Vol. 12. #3. DOI: 10.3390/en12030509.

368. Zhao, Y.; Wang, W.; et al. (2017). Microwave Vacuum Drying of Lotus Seeds: Effect of a Single-Stage Tempering Treatment on Drying Characteristics, Moisture Distribution and Product Quality. Drying Technol. 35(13), 1561–1570.

Приложения

Приложение А – Сводные сведения об энергоемкости сушильного оборудования

Таблица А.1 – Сводные сведения об энергоемкости сушильного оборудования

№	Фирма, страна	Наименование (Модель)	Тип	Производительность, т/час	Установленная эл. мощность, кВт	Мощность на выходе (тепловая), кВт	Энергоемкость, МДж/кг исп вл	Топливо	Прим.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	RIELA, Германия	GDT 240 5/1	стационарная прямоточная	7,5	10	550	5,719148936	дт /природный газ	с 19 до 15%
2		GDT 240 10/2		19	18	1150	4,70862262		
3		GDT 240 15/2		24	26	1500	4,870212766		
4		GDT 300 12/1		24	26	1500	4,870212766		
5		GDT 300 16/2		31	36,5	2000	5,031846259		
6		GDT 300 20/3		42	49	2860	5,305167173		
7		GDT 300 24/3		50	57	3200	4,989446809		
8		GDT 300 28/2		60	65	4000	5,189361702		
9		GDT 240 5/1	мобильная прямоточная	6,3	18	450	5,689969605		
10		GDT 240 8/1		11,5	27	700	4,842183164		
11		GDT 240 12/1		16	34	1150	5,668085106		
12		GDT 240 13/1		26	45	1600	4,846153846		
13		GTR 1500	мобильная циркуляционная	4,8	10	300	4,946808511		
14		GTR 1700		4,8	10	300	4,946808511		
15		GTR 2500		8	18	500	4,959574468		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	Брестсельмаш, Республика Беларусь	СКЗ-8Т-1	стационарная колонковая открытого исполнения	8	45	500	3,515121112	дрова	план.т(с 20 до 14)
17		СКЗ-8Г-1		8	51	700	4,843772395	природный газ	
18		СКЗ-8Ж-1		8	51	700	4,843772395	печное вытовое, дт	
19		СЗШ-16Г-1	шахтная, модульная, открытого исполнения	16	106	1600	5,501648273	природный газ	
20		СЗШ16Ж-1		16	106	1600	5,501648273	печное вытовое, дт	
21		СЗШ-20Г-1		20	121	1600	4,440017199	природный газ	
22		СЗШ-20Ж-1		20	121	1600	4,440017199	печное вытовое, дт	
23		СЗШ-30Г		30	130	2500	4,523434141	природный газ	
24		СЗШМ-30Ж		30	130	2500	4,523434141	печное вытовое, дт	
25		СЗШН-5-ТЦ	стац. шахтн. наборная	5	24	500	5,407481726	твердое топливо(дрова, торф)	
26	Мельинвест, РФ	Vesta 5	Шахтная	5	12	450	4,767665186	дт /природный газ	план.т(с 20 до 14)
27		Vesta 10		10	30,2	830	4,438469256		
28		Vesta 15		15	28,1	1186	4,176350867		
29		Vesta 20		20	36,3	1540	4,066704887		
30		Vesta 30		30	39,15	2372	4,147025942		
31		Vesta 40		40	48	3080	4,034972051		
32		Vesta 50		50	60,15	4886	5,104239645		
33		ASTRA I	Колонковая	20	39	900	3,596170213		с 19 до
34		AsTRA II		40	78	1800	3,596170213		
35		ASTRA III		60	117	2700	3,596170213		
36		AsTRA IV		80	156	3600	3,596170213		
37	Фильтр, РФ	МИГ-6	Конвеерная	6,2	18	500	5,115207373	дт	с 20 до
38		МИГ-12		14	35	1000	4,526239067		
39		МИГ-25		28	80	2000	4,548104956		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	GSI, США	GSI 1200	Башенная	29	44	2202	4,741731175	дт /природный газ	
41		GSI 1500		37	55	2806	4,734142306		
42		GSI 1800		44	55	2977	4,218923933		
43		GSI 2000		49	73	3588	4,574344023		
44		GSI 2400		59	73	3942	4,166378416		
45		GSI 2500		61	87	4438	4,541652727		
46		GSI 3000		73,5	111	5285	4,494793836		
47		GSI 3500		86	132	6398	4,648789748		
48		GSI 4000		99	165	7016	4,440940012		
49		GSI 4718		115,5	165	7774	4,20832229		
50		GSI 5000		123	219	10264	5,218018915		
51		GSI 6000		148	219	11094	4,679950359		
52		GSI 7000		172	276	12364	4,499288087		
53		GSI 10000		246	368	18199	4,620955699		
54	Agrex, Италия	PRT75/M PRT75/ME	Мобильная	5	22	384	6,219574468	дт(ВОМ), эл.	с 19 до 15%
55		PRT120/M PRT120/ME		7,5	44	697	7,567659574		
56		PRT200/M PRT200/ME		12,5	59	1046	6,77106383		
57		PRT250/M PRT250/ME		15,5	66	1046	5,495126973		
58		PRT250/FE	Стационарная	16,5	46	1046	5,069245648		
59	Smart grain, РФ	SGR-20	Шахтная	20	47	1950	5,152071091	природный газ	план.т(с 20 до
60		SGR-30		30	58	2928	5,13573169		
61		SGR-40		40	69	3900	5,119822273		
62		SGR-50		50	80	4880	5,11853232		
63		SGR-100		100	160	9760	5,11853232		
64		SGR-150		150	240	9760	3,439873871		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
65	Mecmar, Италия	CPT	Мобильные	2,9	7	450	9,648135116	природный газ	с 20 до 15%
66		SRT		3,8	7	830	13,48549946		
67		FSN		4,8	7	830	10,67602041		
68		D		5,6	7	830	9,150874636		
69		SSI		7,4	7	1186	9,870380585		
70		S		12	10	1540	7,908163265		
71		SSI F		5	7	1186	14,60816327		
72		S F		12	10	1540	7,908163265		
73		SF 55		17	10	2443	8,834333733		
74		F		17	10	2443	8,834333733		
75		RT1500/7	Мобильные	6,2	15	830	8,344305464	природный газ	с 20 до 15%
76		RT1750/8		7,2	18	1186	10,23809524		
77		RT2000/9		8	22	1186	9,244897959		
78		RT2250/10		9	30	1186	8,272108844		
79		RT2500/11		10	30	1540	9,612244898		
80		RT2750/12		10,5	37	1540	9,195335277		
81		RM1500/9	Стационарные	9	30	1200	8,367346939	природный газ	с 20 до 15%
82		RM2000/11		12	37	1540	8,045918367		
83		RM2500/13		15	45	2000	8,346938776		
84		RM3000/16		17,5	55	2500	8,93877551		
85		RM3500/19		21,2	55	3000	8,822680015		
86		RM4000/21		23,7	75	3500	9,235339706		
87		RG4000/14		26,2	74	3500	8,351768188	природный газ	с 20 до 15%
88		RG5000/16		30	90	5000	10,3877551		
89		RG6000/18		37,5	110	5500	9,159183673		
90		RG7000/20		41,2	150	6500	9,882108183		
91		RG8000/22		45	150	6500	9,047619048		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
92	Romax, РФ	GM5	Шахтная	13	22,5	1000	6,024549918	природный газ	с 19 до
93		GM6		15	45	1150	6,10212766		
94		GM7		17,5	45	1300	5,886930091		
95		GM8		20	45	1500	5,917021277		
96		GL5		18	45	1300	5,723404255	природный газ	с 19 до 15%
97		GL6		21,5	45	1550	5,682335477		
98		GL7		25	67,5	1850	5,874893617		
99		GL8		29	67,5	2150	5,856933236		
100		GL9		33,5	67,5	2500	5,870435059		
101		GL10		39	90	2900	5,872340426		
102		GL11		45	90	3300	5,770212766		
103		GL12		50	90	3700	5,805957447		
104		GXL5		27	67,5	2000	5,865248227	природный газ	с 19 до 15%
105		GXL6		32,5	67,5	2400	5,815384615		
106		GXL7		37	90	2800	5,982748706		
107		GXL8		43,5	90	3200	5,793103448		
108		GXL9		48,5	122,5	3600	5,878920816		
109		GXL10		55	122,5	4000	5,741199226		
110		GXL11		60	135	4400	5,789361702		
111		GXL12		65	135	4800	5,815384615		
112		GXL13		70	157,5	5200	5,86231003		
113		GXL14		75	180	5600	5,902978723		
114		GXL15		80	180	6000	5,917021277		
115		GXL16		85	202,5	6400	5,949687109		
116		GXL17		90	202,5	6800	5,959574468		
117		GXL18		95	225	7200	5,98656215		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
118	MEPU, Финляндия	CF-12	Непрерывного действия	8,6	22,5	1000	9,106877783	природный газ	с 19 до
119		CF-25		18	45	2000	8,70212766		
120		CF-50		36	67,5	4400	9,505319149		
121		M 150k	Мобильная	2,8	17	310	8,945288754	природный газ	с 19 до 15%
122		M 180k		3,74	17,5	310	6,707247696		
123		M 205k		4,2	19	400	7,641337386		
124		M 240k		4,9	21	400	6,580981329		
125		M 300k		6,3	28	500	6,419452888		
126	Fratelli pedrotti, Италия	Basik 55	Мобильная	2,9	25,6	300	8,599853265	природный газ, дт	с 19 до 15%
127		Basik 90		3,75	29,4	350	7,749446809		
128		Basik140		6,7	47,8	550	6,834169578		
129		Super160		7,5	51,5	600	6,653617021		
130		Super200		11,7	51,5	1000	6,883797054		
131		Large 240		14,1	58,9	1200	6,838750566		
132		Large 300		16,2	66,2	1300	6,459574468		
133		XLM 350		17,5	88,3	1500	6,951829787		
134		XL 400		20	88,3	1550	6,274340426		
135		XL550		20	90	1550	6,280851064		
136	Агропромтехника, РФ	C-5	Шахтная	5	30	500	5,469399455	природный газ, дт	план.т(с 20 до 14)
137		C-10		10	65	1000	5,495198509		
138		C-15		15	75	1500	5,417801347		
139		C-20		20	110	2000	5,443600401		
140		C-30		30	135	3000	5,392002293		
141		C-40		40	220	4000	5,443600401		
142		C-60		60	265	6000	5,387702451		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
143	Alvan Blanch, Великобритания	DF10500	Непрерывная двухпоточная (конвеерная)	11	25,6	800	4,595176252	природный газ, дт	с 20 до 15%
144		DF12800		14	30	1000	4,504373178		
145		DF15200		16	36	1200	4,729591837		
146		DF17655		19	48,3	1400	4,666917293		
147		DF19000		21	48,3	1700	5,097084548		
148		DF22000		24	60,7	1700	4,491581633		
149		DF25000		28	68,5	2000	4,522959184		
150		DF26500		29	85,1	2000	4,402040816		
151		DF30000		33	90,2	2200	4,248979592		
152		DF33500		37	104	2800	4,805295091		
153		DF37000		41	115,6	3400	5,249776008		
154		DF48000		53	135	4000	4,776665383		
155	ARAJ, Польша	S 38	Шахтная (проточная)	6,5	11,5	800	7,643642072	природный газ, дт	с 20 до 15%
156		S 311		10	17,7	1000	6,230816327		
157		S 69		20	40,7	2000	6,247040816		
158		S 614		30	79,5	3000	6,284693878		
159		S 618		40	71	4000	6,231122449		
160		S 628D		60	159	6000	6,284693878		
161		S 636D		80	142	8000	6,231122449		
162	Контей агро-индустриальные системы (КАИС), РФ	DB-256	Горизонтальная	9	14	1500	10,29931973	природный газ, дт	с 20 до
163		DB-259		14	32	2700	11,94752187		
164		DB-2511		16,5	34	3550	13,2987013		
165		DBB-2513		21	34	3550	10,44897959		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
166	Воронежсельмаш, РФ	СВМ-3-6	Шахтная жалюзийного типа	17	16,5	2020	6,182035888	природный газ, дт	план.т(с 20 до 14)
167		СВМ-4-6		23	20,5	2440	5,520667132		
168		СВМ-5-6		29	23,9	3250	5,825905568		
169		СВМ-6-6		34	27,5	4200	6,416537372		
170		СВМ-3-8		23	20,5	2440	5,520667132		
171		СВМ-4-8		30	25,7	3250	5,634805046		
172		СВМ-5-8		38	31,4	4200	5,74640874		
173		СВМ-6-8		46	34,9	4880	5,513823793		
174		СВМ-7-8		53	42,5	5700	5,591407738		
175		СВМ-8-8		61	45,9	6100	5,199381486		
176		СВМ-4-12		46	39,5	4880	5,518984344		
177		СВМ-5-12		57	46,3	5700	5,202468614		
178		СВМ-6-12		68	53,5	7900	6,035946775		
179		СВМ-7-12		80	61,3	7900	5,135586296		
180		СВМ-8-12		91	68,3	9760	5,573564623		
181		СВМ-4-16		61	49,9	6100	5,202765453		
182		СВМ-5-16		76	61,3	7900	5,405880311		
183		СВМ-6-16		91	68,3	9760	5,573564623		
184		СВМ-7-16		106	83,5	9760	4,792252683		
185		СВМ-8-16		122	90,3	11400	4,860350241		
186		СВМ-6-24		137	101,7	11400	4,332489285		
187		СВМ-7-24		150	124,5	13020	4,522190367		
188		СВМ-8-24		182	134,7	16270	4,651499017		
189		СВМ-9-24		200	145,5	19520	5,074240252		

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	Воронежсельмаш, РФ	СВШ-3-12	Шахтная	19	20,5	2440	6,682912844	природный газ, дт	план.т(с 20 до 14)
191		СВШ-4-12		26	27,5	3250	6,505270819		
192		СВШ-5-12		32	31,5	4200	6,824021646		
193		СВШ-6-12		38	35,5	4200	5,751976702		
194		СВШ-7-12		45	42,5	4880	5,645068807		
195		СВШ-8-12		51	46,5	5700	5,81472612		
196		СВШ-4-18		38	35,5	4200	5,751976702		
197		СВШ-5-18		48	42,5	4880	5,292252007		
198		СВШ-6-18		58	49,5	5700	5,11561808		
199		СВШ-7-18		67	57,5	7900	6,129116459		
200		СВШ-8-18		77	65,5	7900	5,338488919		
201		СВШ-4-24		51	49,5	5700	5,817761738		
202		СВШ-5-24		64	57,5	7900	6,416418793		
203		СВШ-6-24		77	65,5	7900	5,338488919		
204		СВШ-7-24		90	79,5	9760	5,641915138		
205		СВШ-8-24		103	87,5	9760	4,933836956		
206		СВШ-6-36		115	95,5	11400	5,158531113		
207		СВШ-7-36		135	116,5	16270	6,263952599		
208		СВШ-8-36		154	128,5	16270	5,495148487		
209		СВШ-9-36		173	137,5	19520	5,86378732		

Приложение Б – Патенты по теме исследования

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **113 631** (13) **U1**

(51) МПК
A01F 25/14 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2011138312/13, 19.09.2011**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.09.2011

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **19.09.2011**

(45) Опубликовано: **27.02.2012** Бюл. № **6**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1-й Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Васильев Алексей Николаевич (RU).
Северинов Олег Викторович (RU).
Руденко Нелли Борисовна (RU).
Будников Дмитрий Александрович (RU).
Мацынин Сергей Николаевич (RU).
Васильев Алексей Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ) (RU)

(54) БУНКЕР ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ЗЕРНА

(57) Формула полезной модели

Бункер для хранения и вентилирования зерна, содержащий кольцевую рабочую камеру с внутренней и внешней перфорированными стенками, разделенную воздухопроницаемой стенкой на отдельные камеры, загрузочное, разгрузочное средства раздельного заполнения и опорожнения камер и вентилятор, отличающийся тем, что кольцевая рабочая камера разделена второй воздухопроницаемой стенкой таким образом, что образованные три кольцевые камеры имеют одинаковый объем.

RU 113631 U1

RU 113631 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **159 476** (13) **U1**

(51) МПК
G01R 21/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2015143412/28, 13.10.2015**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.10.2015

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **13.10.2015**

(45) Опубликовано: **10.02.2016** Бюл. № **4**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1 Вешняковский пр-д, 2, ФГБНУ ВИЭСХ, патентный отдел, Голубевой О.В.

(72) Автор(ы):
Будников Дмитрий Александрович (RU),
Васильев Алексей Николаевич (RU),
Васильев Алексей Алексеевич (RU),
Цымбал Андрей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное научное Учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ФГБНУ ВИЭСХ) (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЧ В ОБЪЕМЕ, ЗАПОЛНЕННОМ СЫПУЧИМ ЛИБО ЖИДКИМ МАТЕРИАЛОМ

(57) Формула полезной модели

Устройство для измерения удельной мощности электромагнитного поля СВЧ в объеме, заполненном сыпучим либо жидким материалом, содержащее детектор, блок опроса сигнала, блок обработки и вывода данных результатов измерений, отличающееся тем, что детектор содержит корпус в форме шара, заполненный материалом для которого известны зависимости теплоемкости и диэлектрических свойств от температуры на исследуемой частоте, при этом в детектор встроена термопара, которая соединена с блоком опроса сигнала термопар, который соединен с блоком обработки и вывода данных результатов измерений на экран и их запись в файл, причем блок опроса сигнала термопар и блок обработки и вывода данных результатов измерений на экран и их запись в файл выполнены в одном корпусе.

RU 159476 U1

RU 159476 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 479 982** (13) **C1**

(51) МПК
A01F 25/14 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2011138313/13, 19.09.2011**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.09.2011

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **19.09.2011**

(45) Опубликовано: **27.04.2013** Бюл. № **12**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **Будников Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля свч./Автореферат дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. - ЗЕРНОГРАД: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2007, с.1-16. BY 13728 C1, 30.10.2010. RU 94006054 A1, 20.06.1996. RU 84520 U1, 10.07.2009. DE 10111582 C1, 02.05.2002.**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1-й Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, патентный отдел, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Васильев Алексей Николаевич (RU),
Руденко Нелли Борисовна (RU),
Будников Дмитрий Александрович (RU),
Васильев Алексей Алексеевич (RU),
Мацынин Сергей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU)

RU 2479982 C1

(54) СПОСОБ СУШКИ ЗЕРНА В БУНКЕРАХ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ

(57) Реферат:

Способ сушки зерна в бункерах активного вентилирования заключается в том, что перед загрузкой в бункер активного вентилирования зернистый материал подвергают воздействию СВЧ поля. После обработки полем СВЧ материал загружают в бункер и вентилируют заданное время, затем дозированно, порциями выпускают из бункера по вертикальным зонам из различных выпускных устройств, контролируют его влажность. Зернистый материал, достигший заданной влажности, направляют на технологическую линию дальнейшей обработки, а влажный материал направляют в зону воздействия СВЧ поля, там перемешивают, троекратно циклически воздействуют СВЧ полем и направляют обратно в бункер на досушку. Способ позволяет снизить неравномерность высыхания зерна по слою и увеличить производительность установки, осуществить дезинфекцию зерна. 1 пр., 1 ил.

RU 2479982 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 501 201** (13) **C1**

(51) МПК
A01C 1/00 (2006.01)
A01C 1/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012113912/13, 10.04.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **10.04.2012**

(45) Опубликовано: **20.12.2013** Бюл. № **35**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 563938 A1, 05.07.1977. SU 1762775 A1, 23.09.1992. RU 2344590 C2, 27.01.2009. US 6350409 B1, 26.02.2002. RU 2051552 C1, 10.01.1996.**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1 Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, патентный отдел, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Васильев Алексей Алексеевич (RU),
Будников Дмитрий Александрович (RU),
Васильев Алексей Николаевич (RU),
Краусп Валентин Робертович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU)

(54) СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЗЕРНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к сельскому хозяйству, в частности к обеззараживанию зерна. Способ обеззараживания зерна включает обработку зерна полем СВЧ, которое подают в слой материала периодически для перемещения влаги в зерновке от ее центра к поверхности. Затем с помощью поля СВЧ нагревают поверхность зерновки до предельного максимального значения температуры, зависящего от типа зерна. После чего выдерживают зерно при данной температуре, периодически обрабатывая зерновой слой полем СВЧ. Затем зерно охлаждают воздухом, насыщенным озоном с концентрацией от 0,16 г/м^3 до 2 г/м^3 в зависимости от исходной степени зараженности зерна и требуемых показателей зараженности зерна. При охлаждении зерновой материал перемешивают. Использование изобретения позволит повысить эффект обеззараживания зерна, увеличить производительность и снизить материалоемкости процесса. 1 ил.

RU 2501201 C1

RU 2501201 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 501 203** (13) **C1**

(51) МПК
A01C 1/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012113911/13, 10.04.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **10.04.2012**

(45) Опубликовано: **20.12.2013** Бюл. № **35**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 563938 A, 05.07.1977. SU 1502924 A1, 23.08.1989. RU 50643 U1, 20.01.2006. US 3263052 A1, 26.07.1966. RU 64211 U1, 27.06.2007.**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1 Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, патентный отдел, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Васильев Алексей Алексеевич (RU).
Будняков Дмитрий Александрович (RU).
Васильев Алексей Николаевич (RU).
Краусп Валентин Робертович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU)

(54) СПОСОБ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЗЕРНА И ПРОДУКТОВ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

(57) Реферат:

Способ включает увлажнение зерна, отлежку увлажненного зерна и последующую его обработку полем СВЧ. Дополнительно введен продув зерна нагретым воздухом, температура которого не превышает 55°С. При этом СВЧ-поле включают периодически для нагрева зерна до предельной максимальной температуры. После этого поле СВЧ отключают и охлаждают зерно продуванием через него воздуха до температуры нагретого воздуха. При этом процесс продолжают циклически в течение заданного времени, обеспечивающего требуемый уровень дезинфекции зерна. Использование изобретения позволит увеличить продолжительность воздействия поля сверхвысокой частоты на зерно и повысить эффект его обеззараживания. 1 ил.

RU 2501203 C1

RU 2501203 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 502 027** (13) **C1**

(51) МПК
F26B 3/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012113909/06, 10.04.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **10.04.2012**

(45) Опубликовано: **20.12.2013** Бюл. № **35**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1040298 A1, 07.09.1983. SU 1147907 A2, 30.03.1985. SU 578097 A1, 30.10.1977. SU 1114867 A1, 23.09.1984. CN 101329134 A, 24.12.2008. US 7003896 B2, 28.02.2006.**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1 Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, патентный отдел, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Будников Дмитрий Александрович (RU).
Васильев Алексей Николаевич (RU).
Грачева Наталья Николаевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU)

(54) СПОСОБ СУШКИ ЗЕРНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу сушки зерна и семян различных культур и может быть использовано в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, в системе хлебопродуктов и хранения зерна и смежных отраслях промышленности. Способ сушки зерна заключается в пропускании сквозь зерновой слой атмосферного или подогретого воздуха, обогащенного аэроионами. Обогащение агента сушки аэроионами осуществляют периодически, при этом периоды обогащения аэроионами зависят от культуры зерна и конструктивных особенностей установки для сушки зерна и изменяются в пределах от 5 до 60 минут. Изобретение должно обеспечить повышение интенсивности сушки, снижение удельных энергозатрат на процессе сушки. 1 ил.

RU 2502027 C1

RU 2502027 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 505 766** (13) **C2**

(51) МПК
F26B 25/22 (2006.01)
F26B 3/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012113910/06, 10.04.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **10.04.2012**

(43) Дата публикации заявки: **20.10.2013** Бюл. № 29

(45) Опубликовано: **27.01.2014** Бюл. № 3

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1040298 A1, 07.09.1983. SU 1147907 A2, 30.03.1985. SU 578097 A1, 30.10.1977. SU 1114867 A1, 23.09.1984. US 7003896 B2, 28.02.2006.**

Адрес для переписки:
109456, Москва, 1 Вешняковский пр-д, 2, ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, патентный отдел, О.В. Голубевой

(72) Автор(ы):
Будников Дмитрий Александрович (RU).
Васильев Алексей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU)

RU 2505766 C2

(54) СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕРНА ЭЛЕКТРОАКТИВИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам управления сушкой зерна и семян и может быть использовано в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, в системе хлебопродуктов и хранения зерна и смежных отраслях промышленности. Способ управления процессом сушки зерна электроактивированным воздухом в качестве агента сушки заключается в том, что контролируют начальную и текущую влажность зерна, температуру и относительную влажность атмосферного воздуха, регулируют относительную влажность воздуха, подающегося в зерновой слой, управляют работой источника аэроионов. Работой источника аэроионов управляют по критерию минимума времени сушки зерна, выбирая один из двух режимов - с постоянной концентрацией аэроионов в агенте сушки, с циклическим изменением концентрации аэроионов в агенте сушки, который выбирают в зависимости от состояния зерна и характеристик агента сушки, при этом концентрация аэроионов не превышает $3,5 \cdot 10^{10}$ $м^{-3}$, а продолжительность циклов включения источника аэроионов находится в диапазоне 5-60 мин и зависит от культуры. Изобретение должно обеспечить повышение интенсивности сушки, снижение удельных энергозатрат на процессе сушки. 5 ил.

RU 2505766 C2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **179 642**(13) **U1**

(51) МПК
A01C 1/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01C 1/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: **2015150524, 25.11.2015**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.11.2015

Дата регистрации:
21.05.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **25.11.2015**

(45) Опубликовано: **21.05.2018** Бюл. № **15**

Адрес для переписки:
109428, Москва, 1-й Институтский пр., 5, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

(72) Автор(ы):
Васильев Алексей Алексеевич (RU),
Будников Дмитрий Александрович (RU),
Васильев Алексей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2369081 C1, 10.10.2009. RU 49416 U1, 27.11.2005. US 4156642 A, 29.05.1979.**

(54) УСТРОЙСТВО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЗЕРНА ДЛЯ ЗЕРНО- И СЕМЯОЧИСТИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к сельскохозяйственному машиностроению и, в частности, к зерно- и семяочистительным агрегатам и может быть применена для очистки зернового вороха, обеззараживания зерна и подготовки семян к сушке и хранению. Задачей предлагаемой полезной модели является обеззараживание зерна от спор плесневых грибов и продуцируемых ими микотоксинов, а также снижение энергозатрат на последующую сушку зерна. В результате использования предлагаемой полезной модели появляется возможность на раннем этапе уничтожить споры плесневых грибов и обеспечить более длительные сроки безопасного хранения зерна и семян за счет установки в агрегате модуля СВЧ обработки зерна. Технический результат достигается тем, что в предлагаемый агрегат для очистки и обеззараживания зерна, включающий приемное устройство, воздушно-решетную фракционную зерноочистительную машину, бункеры для сбора зерна очищенного и фуражного, а также неиспользуемых отходов, триеры, пневмосортировальный стол, бункеры для активного вентилирования или силосы для хранения основной фракции, ленточные транспортеры, нории, клапан и делитель, содержит модуль СВЧ обработки зерна, установленный на выходе зернового потока из воздушно-решетной фракционной зерноочистительной машины и соединенный с бункером очищенного зерна, бункером фуражного зерна и участком протравливания и затаривания семян.

RU 179642 U1

RU 179642 U1

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 33398

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION

(21) 2017/0815.1

(22) 29.09.2017

Қазақстан Республикасы өнертабыстары мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Inventions of the Republic of Kazakhstan: 16.01.2019

(54) Сусымалы материалдарды кептіруге арналған қондырғы
Установка для сушки сыпучих материалов
Installation for drying bulk materials

(73) "Еуразия технологиялық университеті" жауапкершілігі шектеулі серіктестігі (KZ)
Товарищество с ограниченной ответственностью "Евразийский технологический университет" (KZ)
"Eurasian Technological University" Limited Liability Partnership (KZ)

(72) Оспанов Асан Бекешович (KZ)
Васильев Алексей Николаевич (RU)
Будников Дмитрий Александрович (RU)
Васильев Алексей Алексеевич (RU)
Карманов Дархан Кабдыкалыкович (KZ)
Шалгинбаев Даулет Бахдаулетович (KZ)
Токсанбаева Ботагөз Ондасынқызы (KZ)

Ospanov Asan Bekeshovich (KZ)
Vasilyev Aleksey Nikolayevich (RU)
Budnikov Dmitriy Aleksandrovich (RU)
Vasilyev Aleksey Alekseyevich (RU)
Karmanov Darkhan Kabdykalykovich (KZ)
Shalginbaev Daulet Bakhdauletovich (KZ)
Toksanbayeva Botagoz Ondasynkyzy (KZ)

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

Приложение В – Rational Quadratic GPR - модель

```
function [trainedModel, validationRMSE] = trainRegressionModel(train-
ingData)
% [trainedModel, validationRMSE] = trainRegressionModel(trainingData)
% returns a trained regression model and its RMSE. This code recreates
the
% model trained in Regression Learner app. Use the generated code to
% automate training the same model with new data, or to learn how to
% programmatically train models.
%
%  Input:
%     trainingData: a table containing the same predictor and response
%       columns as imported into the app.
%
%  Output:
%     trainedModel: a struct containing the trained regression model.
The
%         struct contains various fields with information about the
trained
%       model.
%
%     trainedModel.predictFcn: a function to make predictions on new
data.
%
%     validationRMSE: a double containing the RMSE. In the app, the
%       History list displays the RMSE for each model.
%
% Use the code to train the model with new data. To retrain your model,
% call the function from the command line with your original data or
new
% data as the input argument trainingData.
%
% For example, to retrain a regression model trained with the original
data
% set T, enter:
%   [trainedModel, validationRMSE] = trainRegressionModel(T)
%
% To make predictions with the returned 'trainedModel' on new data T2,
use
%   yfit = trainedModel.predictFcn(T2)
%
% T2 must be a table containing at least the same predictor columns
as used
% during training. For details, enter:
%   trainedModel.HowToPredict
```

```
% Auto-generated by MATLAB on 14-Apr-2020 16:46:55


% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'W', 'x', 'y', 'z'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.Q;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false];

% Train a regression model
% This code specifies all the model options and trains the model.
regressionGP = fitrgp(...
    predictors, ...
    response, ...
    'BasisFunction', 'constant', ...
    'KernelFunction', 'rationalquadratic', ...
    'Standardize', true);

% Create the result struct with predict function
predictorExtractionFcn = @(t) t(:, predictorNames);
gpPredictFcn = @(x) predict(regressionGP, x);
trainedModel.predictFcn    =    @(x)    gpPredictFcn(predictorExtrac-
tionFcn(x));

% Add additional fields to the result struct
trainedModel.RequiredVariables = {'W', 'x', 'y', 'z'};
trainedModel.RegressionGP = regressionGP;
trainedModel.About = 'This struct is a trained model exported from
Regression Learner R2019a.';
trainedModel.HowToPredict = sprintf('To make predictions on a new ta-
ble, T, use: \n  yfit = c.predictFcn(T) \nreplacing ''c'' with the
name of the variable that is this struct, e.g. ''trainedModel''. \n
\nThe table, T, must contain the variables returned by: \n  c.Re-
quiredVariables \nVariable formats (e.g. matrix/vector, datatype) must
match the original training data. \nAdditional variables are ignored.
\n \nFor more information, see <a href="matlab:helpview(fullfile(do-
croot, ''stats'', ''stats.map''), ''appregression_exportmodeltowork-
space'')">How to predict using an exported model</a>.');

% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
```

```
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'W', 'x', 'y', 'z'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.Q;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false];

% Set up holdout validation
cvp = cvpartition(size(response, 1), 'Holdout', 0.3);
trainingPredictors = predictors(cvp.training, :);
trainingResponse = response(cvp.training, :);
trainingIsCategoricalPredictor = isCategoricalPredictor;

% Train a regression model
% This code specifies all the model options and trains the model.
regressionGP = fitrgp(...
    trainingPredictors, ...
    trainingResponse, ...
    'BasisFunction', 'constant', ...
    'KernelFunction', 'rationalquadratic', ...
    'Standardize', true);

% Create the result struct with predict function
gpPredictFcn = @(x) predict(regressionGP, x);
validationPredictFcn = @(x) gpPredictFcn(x);

% Add additional fields to the result struct


% Compute validation predictions
validationPredictors = predictors(cvp.test, :);
validationResponse = response(cvp.test, :);
validationPredictions = validationPredictFcn(validationPredictors);

% Compute validation RMSE
isNotMissing = ~isnan(validationPredictions) & ~isnan(validationRe-
sponse);
validationRMSE = sqrt(nansum(( validationPredictions - validationRe-
sponse ).^2) / numel(validationResponse(isNotMissing) ));
```

Приложение Г – Акты внедрения

«Утверждаю»
Директор ООО «АСТ»



Смирнов Б.Г.

20 сентября 2007 г.

АКТ
О внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что в соответствии с договором о научном сотрудничестве между ООО «АСТ» и ФГОУ ВПО АЧГАА от 10.01. 2006 г. аспирантом кафедры информационных технологий Будниковым Д.А., и заведующим кафедрой, профессором Васильевым А.Н. выполнена следующая научная работа:

- теоретическими исследованиями найдена взаимосвязь давления жидкости в зерновке, при нагреве ее СВЧ полем, с перепадом температур между центром и поверхностью зерновки;
- установлена корреляционная зависимость релаксации давления пара в зерновке с перепадом температур внутри нее;
- получена регрессионная модель, показывающая распределение температуры нагрева зерна в активной СВЧ зоне от одного магнетрона.

Выполненные разработки позволили при проектировании и изготовлении активной СВЧ зоны определить необходимые размеры и конфигурацию стенок СВЧ активной зоны, рассчитать количество магнетронов в ряду активной зоны в зависимости от производительности сушилки, определить режим работы магнетронов при сушке зерна различной влажности.

Зав каф. И.Т.
к.т.н., профессор **Васильев А.Н.**

Инженер **Будников Д.А.**

«Утверждаю»
Директор ООО «АСТ»

Смирнов Б.Г.

20 сентября 2007 г.

АКТ
О внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что в соответствии с договором о научном сотрудничестве между ООО «АСТ» и ФГОУ ВПО АЧГАА от 10.01. 2006 г. аспирантом кафедры информационных технологий Будниковым Д.А., и заведующим кафедрой, профессором Васильевым А.Н. выполнена следующая научная работа:

- теоретическими исследованиями найдена взаимосвязь давления жидкости в зерновке, при нагреве ее СВЧ полем, с перепадом температур между центром и поверхностью зерновки;
- установлена корреляционная зависимость релаксации давления пара в зерновке с перепадом температур внутри нее;
- получена регрессионная модель, показывающая распределение температуры нагрева зерна в активной СВЧ зоне от одного магнетрона.

Выполненные разработки позволили при проектировании и изготовлении активной СВЧ зоны определить необходимые размеры и конфигурацию стенок СВЧ активной зоны, рассчитать количество магнетронов в ряду активной зоны в зависимости от производительности сушилки, определить режим работы магнетронов при сушке зерна различной влажности.

Зав каф. И.Т.
к.т.н., профессор **Васильев А.Н.**

Инженер **Будников Д.А.**

Утверждаю
Ректор ФГОУ ВПО АЧГАА
Член-корреспондент РАСХН
Таранов М.А.

20 сентября 2007 г.

АКТ
подтверждения проведения производственных испытаний

Настоящий акт составлен в том, что в период проведения уборочных работ в июле-августе 2006 и 2007 годов аспирантами кафедры информационных технологий ФГОУ ВПО АЧГАА Будниковым Д.А., Гюриным С.В. и профессором этой кафедры Васильевым А. Н. на территории тока учебно-опытного фермерского хозяйства академии проводили экспериментальные и производственные испытания сушки зерна с СВЧ активной зоной.

При проведения испытаний в 2006 году использовали свежеубранное зерно озимой пшеницы влажностью 30,7%. Сушку зерна проводили двумя способами: активным вентилированием атмосферным воздухом и активным вентилированием с СВЧ активацией.

При проведении испытаний в 2007 году использовали свежеубранное зерно ячменя влажностью 20%. Проводили сравнительные испытания по сушке зерна активным вентилированием атмосферным воздухом и активным вентилированием с предварительной активацией в СВЧ зоне.

Результаты испытаний подтвердили эффективность использования СВЧ активации зерна при его сушке активным вентилированием. Время сушки скращается не менее чем на 30%.

Проректор по производству
и экономике ФГОУ ВПО АЧГАА
к.т.н.,доцент А.Ф. Меркулов

Зав каф. ИТ, к.т.н., профессор А.Н. Васильев

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГНУ ВИЭСХ
Россельхозакадемии
академик РАСХН, д.т.н.,
профессор Стребков Д.С.

_____ 2012 года

"УТВЕРЖДАЮ"
Проректор по научной работе и инновациям МГАУ им. В.П. Горячкина доктор технических наук, профессор Левшин Александр Григорьевич

_____ 2012 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что научные разработки, выполненные ассистентом кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ВПО АЧГАА Грачевой Н.Н, научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по науке ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. внедрены в учебный процесс МГАУ им. В.П. Горячкина на кафедре «Электротехнологии в с. х. производстве».

Конечному пользователю передаются результаты исследования по использованию электроактивированного воздуха (ЭАВ) в процессах низкотемпературной сушки сыпучих материалов активным вентилированием, а именно: режимы сушки зерна активным вентилированием с использованием ЭАВ; математические модели процесса сушки с применением ЭАВ, которые имеют широкую применимость в разработке учебно-методических пособий и лабораторного оборудования для подготовки специалистов по направлению 110800 - Агроинженерия, программа - «Электрооборудование и электротехнологии».

Заведующий кафедрой
электротехнологии в с. х. производстве
д.т.н., профессор Башилов А.М.

От исполнителей Грачева Н.Н.
Будников Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГНУ ВИЭСХ
Россельхозакадемии
академик РАСХН, д.т.н.,
профессор Стребков Д.С.

1 марта 2012 года

"УТВЕРЖДАЮ"
Первый заместитель директора
ГНУ ВИМ по научной работе
доктор технических наук,
профессор
Елизаров В.П.

1 марта 2012 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что научные разработки, выполненные ассистентом кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ВПО АЧГАА Грачевой Н.Н, научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по науке ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. приняты к использованию в научной работе по проведению исследований в области низкотемпературной сушки и сушки зерна активным вентилированием с использованием электротехнологий.

ГНУ ВИМ передаются результаты исследования по использованию электроактивированного воздуха (ЭАВ) в процессах низкотемпературной сушки сыпучих материалов активным вентилированием, а именно: теоретическое обоснование использования циклических режимов воздействия электроактивированным воздухом на зерновой слой, режимы сушки зерна активным вентилированием с использованием ЭАВ; математические модели процесса сушки с применением ЭАВ.

Заместитель директора
по развитию и инновациям
д.т.н., профессор Лобачевский Я.П.

От исполнителей Грачева Н.Н.
Будников Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО АЧГАА

Таранов Д.М.

26 октября 2012 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что научные разработки, выполненные аспирантом отдела автоматизации электрифицированного с.х. производства ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.А., научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по научной работе ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. внедрены в учебный процесс академии.

Так работа по исследованию возможности использования полей СВЧ для обеззараживания зерна в технологических линиях послеуборочной обработки, выразившаяся в разработке способов обеззараживания зерна, нашла отражение в преподавании дисциплины «Электротехнология» по направлению подготовки бакалавров «Агроинженерия».

Зав. кафедрой
Энергетики к.т.н., доцент Калинин А.Э.

От исполнителей Васильев А.Н.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГНУ ВИЭСХ
Россельхозакадемии
академик РАСХН, д.т.н.,
профессор Стребков Д.С.
16 апреля 2012 года

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВПО АЧГАА
Серёгин А.А.
12 апреля 2012 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что научные разработки, выполненные ассистентом кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ВПО АЧГАА Грачевой Н.Н., ведущим научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по науке ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. внедрены в учебный процесс академии.

Результаты исследования возможности использования электроактивированного воздуха при сушке зерна активным вентилированием нашли отражение в учебно-методическом комплексе С.Д.Ф.5 – «Светотехника и электротехнологии» по специальности 110302.65 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» и учебно-методическом комплексе Б3.В.7 – «Электротехнологии» по направлению подготовки 110800 – Агроинженерия, профиль – «Электрооборудование и электротехнологии в АПК».

Зав. кафедрой энергетики Калинин А.Э.

От исполнителей Грачева Н.Н.

Будников Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГНУ ВИЭСХ
Россельхозакадемии
академик РАСХН, д.т.н.,
профессор С.Стребков Д.С.

«31» октября 2011 года

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВПО АЧГАА

Серёгин А.А.

24 октября 2011 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что научные разработки, выполненные ассистентом кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ВПО АЧГАА Руденко Н.Б, ведущим научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по науке ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. внедрены в учебный процесс академии.

Результаты исследования возможности использования полей СВЧ для рециркуляции зерна, при его низкотемпературной сушке и сушке активным вентилированием, разработанный способ сушки нашли отражение в учебно-методических комплексах: СД.Ф.08 – «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства» и СД.Ф.1 – «Процессы и аппараты» по направлению 110800 – Агроинженерия, профиль – «Технологическое оборудование перерабатывающих производств», специальности 110403 – Механизация переработки сельскохозяйственной продукции.

Зав. кафедрой
механизации и технологии
производства и переработки
сельскохозяйственной продукции — Удовкин А.И.

От исполнителей — Руденко Н.Б.

Будников Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГНУ ВИЭСХ
Россельхозакадемии
академик РАСХН, д.т.н.,
профессор Стребков Д.С.
«31» октября 2011 года

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО
«Аграрные сверхвысокочастотные технологии»
Плешаков А.Г.
31 октября 2011 г.

А К Т

о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что ассистентом кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ВПО АЧГАА Руденко Н.Б, ведущим научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Будниковым Д.А., зам. директора по науке ГНУ ВИЭСХ Васильевым А.Н. выполнена работа по исследованию возможности использования полей СВЧ для рециркуляции зерна, при его низкотемпературной сушке и сушке активным вентилированием. В результате проведённых исследований получены следующие результаты:

- экспериментальные кривые изменения температуры зерна и межзернового пространства смеси сухого и влажного зерна при циклическом воздействии поля СВЧ;

- получены математические модели изменения скорости и энергоёмкости сушки зерна, при использовании СВЧ рециркуляции;

- разработан способ сушки зерна с использованием СВЧ рециркуляции, который может быть применим при низкотемпературной сушке зерна и при сушке активным вентилированием.

Указанные разработки использованы ООО «АСТ» при проектировании СВЧ активных зон для сушки зерна и разработке технологии послеуборочной обработки зерна.

От исполнителей Руденко Н.Б.
Будников Д.А.

Общество с ограниченной ответственностью

«КУРИЛОВСКОЕ СЕЛЬХОЗУПРАВЛЕНИЕ МЭС»

601223, область Владимирская,
район Собинский, деревня Курилово,
улица Юбилейная, 41

Телефон (49242) 3-61-23

Факс (242) 36141

Утверждаю

Директор

СПРАВКА

о внедрении результатов научных исследований

Разработанный в ГНУ ВИЭСХ «Россельхозакадемии» зав. сектором технического и программного обеспечения Васильевым Алексеем Алексеевичем и старшим научным сотрудником отдела автоматизации к.т.н. Будниковым Дмитрием Александровичем модуль СВЧ-конвективной обработки зерна был установлен в кормоцехе Куриловского сельхозуправления МЭС. В течении 2 месяцев с июля по август 2013 года использовался для обеззараживания зерна в линии кормоприготовления для коровника на 200 голов, обработано 14 тонн. Так же использовался в линии послеуборочной обработки и подсушки зерна тритикале, обработано 6 тонны.

Главный агроном А. С. Шишигин

Утверждаю
Директор ГНУ ВИЭСХ
Академик РАСХН
_____ Стребков Д.С.
«4» апреля 2013г.

А К Т

об изготовлении макетного образца универсального электро-технологического модуля для сушки зерна активным вентилированием, разработанного по плану НИОКР ВИЭСХ на 2013 год (поз.10)

Комиссия в составе представителей Изготовителя – руководителя темы д.т.н. Васильева А.Н., к.т.н. Будникова Д.А.,

и представителей Заказчика - комиссии по приемке назначенной Указанием директора института Стребкова Д.С. №3 от 4 апреля 2013 года:

Тихомиров А.В. – заместитель директора по научной работе – председатель комиссии; члены комиссии Лихачев В.Ф. – заведующий отделом координации и организации научных работ; Коршунов А.Б. – заведующий отделом научно-технической информации и маркетинга, Антонов Ю.М. – ученый секретарь института, Исакова Н.Н. – главный бухгалтер института;

составила настоящий акт о том, что в соответствии с планом НИОКР института на 2013 год (поз.10) изготовлен экспериментальный образец модуля для СВЧ-конвективной обработки зерновых культур, который соответствует техническим характеристикам по плану НИОКР.

Образец подготовлен для проведения лабораторно-стендовых испытаний.

ПОДПИСИ:

Тихомиров А.В.

Лихачев В.Ф.

Коршунов А.Б.

Антонов Ю.М.

Исакова Н.Н.

Васильев А.Н.

Будников Д.А.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ФГБНУ ВИЭСХ,
академик

_____ Д.С. Стребков

«12» ноября 2014 г.

А К Т

об изготовлении макетного образца устройства для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ выделяемой в зерновом слое, разработанного по плану НИОКР ВИЭСХ на 2014 год (поз.9)

Комиссия в составе представителей Изготовителя – лаборатории АСУ ТП в сельском хозяйстве, старшего научного сотрудника Будникова Д.А,

и представителей Заказчика - комиссии по приемке назначенной Указанием директора института Стребкова Д.С. №10 от 10 июня 2014 года:
Тихомиров А.В. – заместитель директора по научной работе – председатель комиссии; члены комиссии Лихачев В.Ф. – заведующий отделом координации и организации научных работ; Коршунов А.Б. – заведующий отделом научно-технической информации и маркетинга, Уханова В.Ю. – ученый секретарь института, Исакова Н.Н. – главный бухгалтер института;

составила настоящий акт о том, что в соответствии с планом НИОКР института на 2014 год (поз.9) изготовлен макетный образец устройства для определения величины удельной мощности электромагнитного поля СВЧ выделяемой в зерновом слое, который соответствует техническим характеристикам по плану НИОКР.

Образец подготовлен для проведения лабораторно-стендовых исследований.

ПОДПИСИ:

Тихомиров А.В.

Лихачев В.Ф.

Коршунов А.Б.

Уханова В.Ю.

Исакова Н.Н.

Будников Д.А.

«Утверждаю»
Генеральный директор
ТОО «КазНИИМЭСХ»
_____ Кенчов С.А.
«___» _____ 2018 г.

А к т
о внедрении научной разработки

Настоящий акт составлен в том, что на экспериментально-производственной базе ТОО «Казахского научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства» изготовлен экспериментальный образец универсального СВЧ – конвективного модуля для сушки зерна и проведены его производственные испытания, выполненные в рамках научно-исследовательского проекта по грантовому финансированию МОН РК на 2015-2017 годы «Разработка универсального СВЧ – конвективного модуля для сушки и обеззараживание зерна: максимум производительности, минимум энергозатрат» № 381/ГФ4.

В научных исследованиях принимали участие научный сотрудник лаборатории «Электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, к.т.н. Васильев А.А., ведущий научный сотрудник лаборатории «Электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, к.т.н. Будников Д.А. и руководитель научного направления ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, д.т.н. Васильев А.Н., также научный руководитель проекта д.т.н. Оспанов А.Б. и старший научный сотрудник проекта к.т.н. Карманов Д.А.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

-получены математические модели процессов распределения электромагнитного поля в рабочей зоне установки при различных параметрах излучателя и зернового слоя;

- выполнено моделирование тепло-и влагообмена в зерновом слое при СВЧ – конвективном воздействии;

- проведены экспериментальные исследования режимов работы установки СВЧ на энергоемкость и производительность обработки зерна.

Указанные разработки использованы для разработки технического задания и технического предложения на разработку опытного образца универсального СВЧ – конвективного модуля для сушки и обеззараживания зерна.

От исполнителей Оспанов А.Б.

Васильев А. А.

Будников Д. А.

Карманов Д.А.

Приложение Д – Договор о научно-техническом сотрудничестве

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор ооо «АСТ»
Б.Г. Смирнов
«10» января 2006 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Ректор ФГОУ ВПО АЧГАА
М.А. Таранов
«10» января 2006 г.

ДОГОВОР
О НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ

Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия (кафедра информационных технологий), в лице ректора, профессора Таранова М.А., действующего на основании Устава, с одной стороны и общество с ограниченной ответственностью « Аграрные сверхвысокочастотные технологии» в лице Генерального директора, Смирнова Бориса Григорьевича, действующего на основании Устава с другой стороны, заключили договор о нижеследующем:

1. ПРЕДМЕТ И ЦЕЛЬ ДОГОВОРА

1.1. Целью заключения данного договора является расширение и углубление научных, научно-творческих и научно-практических связей между кафедрой информационных технологий и ООО «АСТ»;
1.2. Разработка способов сушки и конструктивных особенностей зерносушильного оборудования для сушки семян сельскохозяйственных культур, с использованием СВЧ;
1.3. Совершенствование технологии первичной обработки зерна на перерабатывающих пунктах и зерноперерабатывающих предприятиях, путем внедрения микропроцессорных систем управления и СВЧ технологий;
1.4. Совместное издание статей, монографий по заявляемой тематике.

2. ОБЯЗАННОСТИ СТОРОН

2.2. Составить программу совместных научных и научно-производственных работ;
2.3. Создать совместный банк информации по тематике исследований;
2.4. Предоставлять друг другу возможность использования материально-технической и научной базы для проведения совместных исследований.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ:
Укрепление и развитие связей в области научных изысканий.

СРОК ДЕЙСТВИЯ ДОГОВОРА
С момента подписания до 31 декабря 2010 года

Зав. кафедрой
информационных технологий
ФГОУ ВПО АЧГАА, профессор А.Н. Васильев

Приложение Е – Проект технических условий



Утверждаю
Директор ГНУ ВИЭСХ
Академик РАСХН
Стребков Д.С.
_____ 2013г.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ И СУШКИ ЗЕРНА

Проект
Технических условий

47 3528.2013

Москва. 2013 г.

Настоящие технические условия распространяются на электротехнологические модули для обработки зерна с целью сушки и обеззараживания с использованием СВЧ МСО-6,

Изделия поставляются на внутренний рынок и на экспорт.

Вид климатического исполнения У3 по ГОСТ 15150

Рабочие условия применения:

- температура окружающей среды, °С от -30 до +40;
- атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.) от 86 до106(от 650 до 800).

1 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Электротехнологические модули для СВЧ-конвективной обработки и сушки зерна должны соответствовать требованиям настоящих технических условий.

Все комплектующие изделия, входящие в состав приборов, должны соответствовать требованиям государственных стандартов или технических условий на них.

При поставке на экспорт приборы должны отвечать требованиям заказ-наряда.

1.1 Назначение

Модульные конструкции предназначены для:

1. Сушки и обеззараживания зерна от спор плесневых грибов и микотоксинов с использованием поля СВЧ.
2. СВЧ-конвективной сушки зерна.
3. Поджарки зерна перед скармливанием животным и птице для лучшего усвоения питательных веществ.

1.2 Зона применения

Во всех зонах Российской Федерации.

1.3 Условия работы

Модуль может устанавливаться в зависимости от природно-климатической зоны, как вне помещений, на открытых токах, так и под навесами крытых токов, в крытых помещениях из легких строительных конструкций.

Для обеспечения требуемой производительности может использоваться комплекс, состоящий из нескольких модулей МСО 6. При компоновке из нескольких модулей комплекса по обработке зерна должна быть предусмотрена возможность параллельной загрузки каждой конструкции.

Модуль используется самостоятельно или в комплексе с другими машинами при обработке и хранении зерна в следующих вариантах:

– в качестве основных установок для сушки и обеззараживания свежеубранного зерна при подработке на зернотоку.

– в качестве основных установок для сушки и обеззараживания зерна при его хранении в буртах.

– в качестве дополнительных установок для сушки зерна при подработке на зернотоку.

– в качестве основных установок для поджарки зерна перед скармливанием.

Обеззараживание свежеубранного зерна:

с использованием полей СВЧ – влажностью до 18%;

Сушку зерна конвективным способом с использованием электромагнитного поля СВЧ до кондиционной влажности с неравномерностью сушки ± 1%.

Обеззараживание зерна без сушки - обеззараживание зерна пшеницы, ячменя, овса, кукурузы при хранении.

В зависимости от места установки конструкции для ее заполнения должны использоваться шнеки, подборщики и другие транспортеры, используемые на току.

Поджарка зерна при помощи модуля СВЧ обработки может использоваться как на открытых площадках, так и на территориях, закрытых навесами, в помещениях кормоприготовительных цехов. Может устанавливаться как перед бункером накопителем дробилки, так и отдельно.

1.4 Качественные показатели технологического процесса

Модуль должен обеспечивать:

1.4.1 Обеззараживание зерна СВЧ полем, с характеристиками, представленными в таблице 1:

Таблица 1 – Производительность МСО 6 в режиме обеззараживания

Производительность кг/час, не менее	Температура обрабатываемого продукта °С, не ниже	Время выдержки при заданной температуре с, не менее
250	60	60
200	90	60

1.4.2 Сушку зерна, обеспечиваемую нагревом продукта полем СВЧ до 50 °С и продувом зернового слоя воздухом.

1.4.3 Нагрев зерна до температуры 110 °С с выдержкой времени не менее 10 минут.

1.5 Технико-эксплуатационные требования и показатели, регламентирующие надежность

Конструктивные особенности. Конструкция представляет зону СВЧ воздействия, выполненную из листового металла со встроенными магнетронами, расположенными в определенной последовательности в несколько уровней в количестве 6. Модуль выполнен в корпусе, обеспечивающем модульное наращивание, подключение основных коммуникаций (воздуховоды, электрические провода), встраивание в установленную технологическую линию, а так же обеспечение безопасности обслуживающего персонала.

Комплектация. Модуль должен комплектоваться механизмами и оборудованием, обеспечивающим комплексную механизацию и автоматизацию процессов сушки.

Элементы конструкции общие

Накопительный бункер предназначен для накопления зерна при загрузке модуля.

Выгрузной шнек предназначен для выгрузки (выпуска) зерна из модуля обеззараживания. Скорость истекания зерна должна регулироваться. Шнек должен иметь электрический привод с возможностью выгрузки без включения магнетронов.

СВЧ - активная зона предназначена для СВЧ – конвективной обработки зерна поступающего в зоны бункера. Целью обработки зерна является обеззараживание, поджарка или сушка.

Зерно может подвергаться обработке, как при загрузке бункера новой партией, так и при перемещении зерна на рециркуляцию.

Система автоматического управления СВЧ – активной зоной должна обеспечивать контроль за температурой и допустимым уровнем зерна, работу электрических блокировок, обеспечивающих безопасную эксплуатацию устройства.

Защита элементов всей установки обслуживающего персонала должна быть выполнена в соответствии с ГОСТ 26797-85 «Защита оборудования проводной связи и обслуживающего персонала от влияния электромагнитных полей. Методы испытаний, СанПиН 2.2.4. 119-03» Электромагнитные поля в производственных условиях.

Система управления универсального модуля. Предназначена для управления всеми процессами, выполняемыми на установке. Включает несколько подсистем:

- управления транспортерами перемещения зерна;
- управления СВЧ-активной зоной с контролем уровня загрузки.

Система управления должна обеспечивать функционирование установкой во всех вариантах ее использования, указанных в п. 4.1.

Все электрооборудование конструкции должно быть выполнено в соответствии с ГОСТ 19348-82 «Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения»

- Система питания – сеть переменного тока 380В, 50Гц, 10 кВт.
- Частота электромагнитного поля СВЧ – 2 450 МГц.
- Наработка на отказ электронной части модуля не менее 5000 часов, магнетронов не менее 1000 часов, механической не менее 5000 часов.
- Срок службы не менее 7 лет.
- Гарантийный срок работы модуля – не менее 1 года.
- Количество линий аналогового ввода, max – 8.

- Количество линий аналогового вывода, max – 8.
- Температура наружного воздуха – от -30 до 40 ºС.
- Допустимая относительная влажность воздуха 10 – 100%.
- Время работы 12 – 16 часов в сутки.
- Обслуживающий персонал - 1 человек.

Коэффициенты: готовности - 0,96; использование рабочего времени смены - 0,95; надежность технологического процесса – 0,98.

Комплект должен удовлетворять следующим нормативным документам: ПУЭ7 «Правила устройства электроустановок», «Единые требования к конструкции тракторов и сельскохозяйственных машин по безопасности и гигиене труда».

2 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1 Требования безопасности приборов должны соответствовать ГОСТ 12.2.003.

2.2 При перемещении МСО 6 использовать подъемные устройства. Крюки стропов подъемных устройств закрепить за рым-болты.

2.3 Все электрооборудование конструкции должно быть выполнено в соответствии с ГОСТ 19348-82 «Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения».

2.4 Защита элементов всей установки обслуживающего персонала должна быть выполнена в соответствии с ГОСТ 26797-85 «Защита оборудования проводной связи и обслуживающего персонала от влияния электромагнитных полей. Методы испытаний, СанПиН 2.2.4. 119-03» Электромагнитные поля в производственных условиях.

2.5 Модуль должен соответствовать *ГОСТ* 12.1.010-76 1999 «взрывобезопасность».

3 ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

3.1 модули должны подвергаться следующим видам испытаний:

- приемо-сдаточным;
- периодическим.

3.2 Приемо-сдаточные испытания проводит ОТК предприятия- изготовителя, с целью контроля установок на соответствие требованиям чертежей и настоящих технических условий.

3.2.1 Приемо-сдаточным испытаниям подвергаются 100% выпускаемых установок, испытания проводятся по методам, изложенным в разделе 4 настоящих технических условий.

3.2.2 Если в процессе приемо-сдаточных испытаний будет обнаружено соответствие установок всем из вышеперечисленных требований, то результаты испытаний считают положительными.

3.2.3 На установки, прошедшие приемо-сдаточные испытания с положительными результатами, в паспорте проставляется клеймо, удостоверяющее приемку продукции.

3.3 Периодические испытания проводятся инженерной службой предприятия-изготовителя с целью подтверждения возможности изготовления установок по действующей документации и их приемки.

3.3.1 Периодичность испытаний - не реже одного раза в три года, в соответствии с планом-графиком, утвержденным главным инженером.

3.3.2 Периодическим испытаниям подвергают не менее двух установок, выдержавших приемо-сдаточные испытания.

3.3.3 Если при испытаниях обнаружено, что установки соответствуют всем требованиям настоящих технических условий, то результаты периодических испытаний считаются положительными.

3.3.4 Результаты периодических испытаний оформляют актом.

4 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ (ИСПЫТАНИЙ)

4.1 При проверке производственных параметров должны соблюдаться нормальные условия, изложенные в вводной части настоящих технических условий.

4.2 Допускается применять методы и средства проверки, не указанные в настоящих технических условиях, при условии обеспечения ими необходимой точности.

4.3 Проверка производительности проверяется взвешиванием с помощью весов.

4.4 Температура зерна внутри активной зоны определяется с помощью термопар К типа.

4.5 Время выдержки зерна при определенной температуре определяется секундомером с учетом производительности установки.

5 ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ

5.1 Транспортирование и хранение приборов должно производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 19348-82, раздел 2.

5.2 Упаковываемое изделие может транспортироваться всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах.

5.3 Транспортирование грузов должно производиться в соответствии с правилами перевозок грузов, действующими на каждом виде транспорта. Транспортирование и крепление груза должно соответствовать техническим условиям погрузки и крепления груза, действующими на каждом виде транспорта.

6 УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

6.1 Эксплуатация установок должна производиться в точном соответствии с указаниями, изложенными в паспорте.

7 ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ

7.1 Предприятие - изготовитель гарантирует соответствие установок требованиям настоящих технических условий при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения и эксплуатации.

7.2 Гарантийный срок эксплуатации - 12 месяцев со дня ввода установок в эксплуатацию.

7.3 Время безотказной работы магнетронов – 1000 часов со дня ввода установок в эксплуатацию.

Приложение Ж – Результаты испытаний на МИС

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФГБУ «Владимирская государственная зональная
машиноиспытательная станция»

ПРОТОКОЛ № 03-31-13 (1070022)
приемочных испытаний
универсального модуля для СВЧ – конвективной
обработки и сушки зерна МСО 6



Покров 2013

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

ФГБУ «Владимирская МИС» отмечает, что представленный на приемочные испытания образец универсального модуля для СВЧ – конвективной обработки и сушки зерна МСО 6 по установленным значениям функциональных характеристик не является опытным образцом, готовым к применению в сельскохозяйственном производстве в данном конструкционном исполнении и констатирует:

1. Разработанный образец является экспериментальным в части проведения исследований, понимания процессов и обоснования перспективности электротехнического воздействия на обработке зерновых материалов и обеспечивает требуемые температурные режимы обработки.
2. Определено, что воздействие полей СВЧ может быть использовано в сельскохозяйственном производстве на сушке, обеззараживании и подготовке зерновых материалов в качестве корма животным и птице.
3. Установленные испытаниями показатели назначения образца, недостатки его в части безопасности и эргономичности, а также его конструкционное исполнение требуют изготовления модернизированного, более совершенного изделия с возможностью его применения в высокопроизводительных технологических линиях обработки зерна.

ФГБУ «Владимирская МИС» рекомендует изготовить промышленный образец универсального модуля для СВЧ – конвективной обработки и сушки зерна МСО 6 и представить его на приемочные испытания с проверкой на применимость в существующих линиях обработки зерна.

Директор	Ю.А. Матвиенко
Главный инженер	С.Б. Ефремов
Зав. отделом испытаний с/х техники	И. М. Жильцов
Ведущие инженеры	Ю. Ю. Ротачев
	В. Г. Гусев
Представитель организации-разработчика ГНУ «ВИЭСХ Россельхозакадемии»	А. А. Васильев
	А. Н. Васильев
	Д. А. Будников

Приложение З – Результаты фитопатологической экспертизы

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ
(Россельхознадзор)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОСТОВСКИЙ РЕФЕРЕНТНЫЙ ЦЕНТР
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И
ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ»
(ФГУ «Ростовский референтный центр Россельхознадзора»)

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
Аттестат аккредитации № Росс RUS ПС 01.6.1.1494

344034, г. Ростов-на-Дону, пер. Синявский, 21 В тел./факс (863) 266-90-06, 224-13-38

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 5568-Ф от 11.09.09

Выдан ФГОУ ВПО «АЧГАА»,
Зерноградский район, Ростовская область

1. Результаты фитопатологической экспертизы:

№	Характеристика образца согласно данных заявителя	Твердая головня, (спор/зернов ку)	Болезни проростков, %					
			Гель-минто-спориоз	Фуза-риоз	Альтер нариоз	Плесне вение	Бакте-риоз	Общая зараже-нность
1	Озимая пшеница «Юбилейная» урожая 2009 г. вентилирован .	1,6	0,5	25,5	12	1	1,5	40,5

Заспоренность семян твердой головней – слабая степень.
Зараженность корневыми гнилями – средняя степень.

Зав. лабораторией *Н.Г.Гурский*

Специалист лаборатории *Н.А. Мамлаева*

ФГУ "Ростовский референтный центр Россельхознадзора" ИЛС

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ
(Россельхознадзор)

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОСТОВСКИЙ РЕФЕРЕНТНЫЙ ЦЕНТР
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И
ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ»**
(ФГУ «Ростовский референтный центр Россельхознадзора»)

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
Аттестат аккредитации № Росс RUS ПС 01.6.1.1494

344034, г. Ростов-на-Дону, пер. Синявский, 21 В тел./факс (863) 266-90-06, 224-13-38

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 5569-Ф от 11.09.09

**Выдан ФГОУ ВПО «АЧГАА»,
Зерноградский район, Ростовская область**

1. Результаты фитопатологической экспертизы:

№	Характеристика образца согласно данных заявителя	Твердая головня, (спор/зернов ку)	Болезни проростков, %					
			Гель-минто-спориоз	Фуза-риоз	Альтер нариоз	Плесне вение	Бакте-риоз	Общая зараже-нность
1	Озимая пшеница «Юбилейная» урожая 2009 г. вент. + СВЧ 40°	1,4	0	13,5	9	0,5	0,5	23,5

Заспоренность семян твердой головней – слабая степень.
Зараженность корневыми гнилями – слабая степень.

Зав. лабораторией *Н.Г.Гурский*

Специалист лаборатории *Н.А. Мамлаева*

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ
(Россельхознадзор)

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОСТОВСКИЙ РЕФЕРЕНТНЫЙ ЦЕНТР
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ВЕТЕРИНАРНОМУ И
ФИТОСАНИТАРНОМУ НАДЗОРУ»**
(ФГУ «Ростовский референтный центр Россельхознадзора»)

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
Аттестат аккредитации № Росс RUS ПС 01.6.1.1494

344034, г. Ростов-на-Дону, пер. Синявский, 21 В тел./факс (863) 266-90-06, 224-13-38

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 5570-Ф от 11.09.09

**Выдан ФГОУ ВПО «АЧГАА»,
Зерноградский район, Ростовская область**

1. Результаты фитопатологической экспертизы:

№	Характеристика образца согласно данных заявителя	Твердая головня, (спор/зернов ку)	Болезни проростков, %					
			Гель-минто-спориоз	Фуза-риоз	Альтер нариоз	Плесне вение	Бакте-риоз	Общая зараже-нность
1	Озимая пшеница «Юбилейная» урожая 2009 г. вент. + СВЧ 50°	0,8	0	11	9	0,5	0,5	21

Заспоренность семян твердой головней – слабая степень.
Зараженность корневыми гнилями – слабая степень.

Зав. лабораторией *Н.Г.Гурский*

Специалист лаборатории *Н.А. Мамлаева*

Сгенерировано автоматизированной системой "Веста", шифр документа 3h5ARLIT3zSp4yrK1nf0pE

Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Федеральный центр охраны здоровья животных»
(ФГБУ «ВНИИЗЖ»)
Центр МЭБ по сотрудничеству в области диагностики и контроля болезней животных
для стран Восточной Европы, Центральной Азии и Закавказья
Региональная референтная лаборатория МЭБ по ящур

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
(Аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.21 ПП 74)
600901, г. Владимир, мкр-н Юрьевец тел. (4922) 26-19-18, 26-17-65

Протокол испытаний № 791 от 18.09.2013

При исследовании образца № 3357: Корма для продуктивных животных (тритикале, контроль)
заказчик: ГНУ ВИЭСХ "Россельхозакадемия"
юридический адрес: г. Москва, 1 Вяшняковский проезд, д.2
место отбора проб: г. Москва, кормоцех село Куриловское
дата поступления: 04.09.2013 14:09
принадлежащего: Российская Федерация, г. Москва, г. Москва, 1 Вяшняковский проезд, д.2, ГНУ ВИЭСХ "Россельхозакадемия"
на соответствие требованиям: ТР ТС 015/2011 от 09.12.2011г. №874
получен следующий результат:

№ п/п	Показатель	Фактическое значение	Погрешность	Нормативное значение	НД на нормативное значение	НД на метод	Исполнитель	Подпись
B3d. Микотоксины								
1	афлатоксин B1	0,002мг/кг	-	не более 0,02мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
2	дезоксиниваленол	не обнаружено	-	не более 1,0мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
3	зеараленон	не обнаружено	-	не более 1,0мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	

Сгенерировано автоматизированной системой "Веста", шифр документа 3h5ARLIT3zSp4yrK1nf0pE

№ п/п	Показатель	Фактическое значение	Погрешность	Нормативное значение	НД на нормативное значение	НД на метод	Исполнитель	Подпись
83d. Микотоксины								
4	Т-2 токсин	не обнаружено	-	не более 0,1мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
Микробиологические показатели								
5	КМАФАнМ	**1,3*10⁴КОЕ/г**	-	5*10⁵КОЕ/г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
6	патогенные, в т.ч. сальмонеллы	не обнаружено	-	не допускается в 50 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
7	токсинообразующие анаэробы	не обнаружено	-	не допускается в 1 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
8	энтеропатогенные типы кишечной палочки	не обнаружено	-	не допускается в 1 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
Показатели качества								
9	зараженность вредителями	не обнаружено	-	не допускается,кроме зараженности клещом не выше 2 степени	ГОСТ Р 52554-2006	ГОСТ 13586.6-93	Учаева С.В.	

Руководитель испытательного центра (подпись) Прунтова О.В.

Результаты испытаний распространяются на испытуемый образец.
Перепечатка протокола без разрешения Испытательного центра ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

23.09.2013

Ответственный за оформление протокола: Третьяков А.В.

Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Федеральный центр охраны здоровья животных»
(ФГБУ «ВНИИЗЖ»)
Центр МЭБ по сотрудничеству в области диагностики и контроля болезней животных
для стран Восточной Европы, Центральной Азии и Закавказья
Региональная референтная лаборатория МЭБ по ящур

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
(Аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.21 ПП 74)
600901, г. Владимир, мкр-н Юрьевец тел. (4922) 26-19-18, 26-17-65

Протокол испытаний № 791 от 18.09.2013

При исследовании образца № 3358: Корма для продуктивных животных (тритикале, ПЧВ 10 сушка)
заказчик: ГНУ ВИЭСХ "Россельхозакадемия"
юридический адрес: г. Москва, 1 Вяшняковский проезд, д.2
место отбора проб: г. Москва, кормоцех село Куриловское
дата поступления: 04.09.2013 14:09
принадлежащего: Российская Федерация, г. Москва, г. Москва, 1 Вяшняковский проезд, д.2, ГНУ ВИЭСХ "Россельхозакадемия"
на соответствие требованиям: ТР ТС 015/2011 от 09.12.2011г. №874
получен следующий результат:

№ п/п	Показатель	Фактическое значение	Погрешность	Нормативное значение	НД на нормативное значение	НД на метод	Исполнитель	Подпись
B3d. Микотоксины								
1	афлатоксин B1	0,002мг/кг	-	не более 0,02мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
2	дезоксиниваленол	не обнаружено	-	не более 1,0мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
3	зеараленон	не обнаружено	-	не более 1,0мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	

404

№ п/п	Показатель	Фактическое значение	Погрешность	Нормативное значение	НД на нормативное значение	НД на метод	Исполнитель	Подпись
B3d. Микотоксины								
4	Т-2 токсин	не обнаружено	-	не более 0,1мг/кг	ТР ТС 015/2011 от 9.12.2011г №874	МУК 5-1-14/1001.Методические указания по экспресс-определению микотоксинов в зерне, кормах и компонентах для их производства.Управление ветеринарии Минсельхоза	Пастухова И.Б.	
Микробиологические показатели								
5	КМАФАнМ	**8,9*10⁵КОЕ/г**	-	5*10⁵КОЕ/г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
6	патогенные, в т.ч. сальмонеллы	не обнаружено	-	не допускается в 50 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
7	токсинообразующие анаэробы	не обнаружено	-	не допускается в 1 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
8	энтеропатогенные типы кишечной палочки	не обнаружено	-	не допускается в 1 г	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Правила бактериологического контроля исследования кормов.- Москва, 1976	Балашова М.А.	
Показатели качества								
9	зараженность вредителями	не обнаружено	-	не допускается,кроме зараженности клещом не выше 2 степени	ГОСТ Р 52554-2006	ГОСТ 13586.6-93	Учаева С.В.	

Руководитель испытательного центра (подпись) Прунтова О.В.

Результаты испытаний распространяются на испытуемый образец.
Перепечатка протокола без разрешения Испытательного центра ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

23.09.2013

Ответственный за оформление протокола: Третьяков А.В.