



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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Работа выполнена в лаборатории «Электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Научный консультант: **Васильев Алексей Николаевич**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Официальные оппоненты: **Вендин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и электротехнологий в АПК», ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ
Сорочинский Владимир Федорович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «ВНИИЗ» филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
Сторчевой Владимир Федорович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и электротехнологии» ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева

Ведущая организация: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ)

Защита состоится «26» января 2021 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 006.110.02 при ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по адресу: 109456, РФ, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и на сайте <http://vim.ru/> в разделе «Диссертационные советы».

Автореферат размещен на сайте Министерства образования и науки Российской Федерации <http://www.vak.minobrnauki.gov.ru> «21» октября 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направить ученому секретарю диссертационного совета Д 006.110.02 по адресу: 109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5. Email: d006.110.02@mail.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

И.О. ученого секретаря
диссертационного совета
доктор технических наук



Белов
Александр Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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%. При этом сбор зерновых в 2019 году составил 120,6 млн тонн.

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. 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.

Таким образом увеличение производительности зерносушильного оборудования и снижение энергоёмкости процесса сушки является важной задачей реализации Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы.

Степень разработанности. Технологии и технические средства термообработки зерна, в том числе с применением электрофизических воздействий исследовались такими отечественными и зарубежными авторами, как: Лыков А.В., Бородин

И.Ф., Анискин В.И., Троцкая Т.П., Рудобашта С.П., Голубкович А.В., Вендин С.В., Пахомов В.И., Васильев А.Н., Чижиков А.Г., Ксенз Н.В., Дианов Л.В., Смелик В.А., Ширяев А.С., Бурков А.И., Годлевский В.Е., Сорочинский В.Ф., Сулинов А.В., Росляков Ю.Ф., Прудильникова Т.Н., Кучумов Н.Н., Чебанько Н.И., Гумаргалиева К.З., Шабалкин В.А., Бастрон А.В., Бусарева Н.Н., Иванов Ю.В., Ефимов Н.Ф., Пименов Ю.Н., Берзиньш Э.Р., Раецкис П.Ю., Аболтыньш А.Я., Судаев Е.М., Мустафаев С.К., Сторчевой В.Ф., Новикова Г.В., Романов Д.М., Фомичев В.Т. и др.

Одним из перспективных направлений совершенствования и разработки зерносушильного оборудования, разрабатываемый такими учеными как Вендин С.В., 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 для внедрения 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 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.

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, подтвержденные 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 ГАУ 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы работы, определены объект и предмет исследования, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, данные о научной новизне и практической значимости работы.

В первой главе «Состояние научной проблемы, цель и задачи исследований» проведен обзор объемов перерабатываемого материала; проведен обзор способов сушки зерна; оценены энергетические затраты на осуществление процесса сушки; проведен анализ технологий и оборудования с применением электрофизических воздействий для осуществления сушки зерна; обосновано применение микроволнового поля для совершенствования оборудования для сушки зерна; сформулированы цель и задачи работы. В таблице 1 представлены некоторые из технологий сушки зерна и их достоинства.

Таблица 1 – Технологии сушки зерновых

Технология	Энергоемкость, МДж/кг исп влаги	Производительность, т/ч	Исполнение	Достоинства
Классическая тепловая сушка	5-14	4-250	стационарные; мобильные	высокая номенклатура производительностей
Ультразвук	4,0-6,0	0,01-0,1	лабораторные	высокая интенсивность процесса влагопереноса
Озон	3,5-5,5	0,1-5,0	контейнерные, стационарные, мобильные	низкая энергоемкость; обеззараживание
Аэроионы	3,3-5,0	0,1-1,0	стационарные; лабораторные	низкая энергоемкость
Радиочастотная сушка	4,5-6,5	0,1-1,0	лабораторные	обеззараживание; увеличивает срок хранения конечной продукции;
Инфракрасное излучение	5,0-9,0	0,1-10,0	стационарные; лабораторные	высокая интенсивность нагрева;

Наряду с указанными достоинствами есть ряд недостатков, например: необходимость создания сушильной камеры, обеспечивающей равномерное воздействие акустических колебаний по всему высушиваемому материалу; низкой эффективности применения ультразвука при сушке зерна большого объема; малая глубина обработки УЗ-колебаниями; озон является сильным окислителем, ядовит в больших концентрациях; повышение температуры агента сушки влияет на разложение озона и снижение его концентрации; применение ОВС практически исключает комбинацию этой технологии с другими способами интенсификации; сложность доставки

аэроионов к материалу; радиочастотное излучение не позволяют обеспечить достаточный для сушки нагрев на данных частотах из-за малой рассеиваемой мощности при этом мала глубина проникновения поля в слой; при ИК обработке требуется перемешивание или создание кипящего слоя; вероятность травмирования зерна в процессе ИК обработки и др.

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, что не позволяет полноценно использовать возможности микроволнового воздействия. Таким образом, в современных исследованиях на настоящий момент представлено недостаточное количество данных как о диэлектрических свойствах материалов, их зависимости от влажности, температуре, предварительной обработке и т.д., так и о научно-обоснованных подходах к определению параметров установок СВЧ-конвективной сушки зерна и режимов их работы.

Во второй главе «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- ВЛАГОПЕРЕНОСА» определены движущие силы процесса тепло- влагопереноса в зерне при комбинированном СВЧ-комбинированном воздействии; описаны общие положения СВЧ нагрева сельскохозяйственных продуктов; сформулированы требуемые условия применения микроволновой энергии для обеспечения интенсификации процессов тепло- влагопереноса при сушке зерна.

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

Решение системы дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса позволяет получить зависимости изменения температуры внутренних, $\Theta_{ц}$, °С и наружных, $\Theta_{п}$, °С слоев зерновки в процессе СВЧ воздействия:

$$\Theta_{ц} = \Theta_0 + \frac{2 Q_v \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^2} (e^{K_{РАЗ} \cdot \tau} - 1), \quad (1)$$

$$\theta_{II} = \theta_0 + 0,687 \cdot \frac{Q_v \cdot R^2 (e^{K_{PA3} \cdot \tau} - 1)}{\lambda \cdot \pi^3}, \quad (2)$$

где θ_0 – первоначальная температура зерна, °С; R – радиус зерновки, м; Q_v – удельная мощность, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии СВЧ поля, Вт/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; K_{PA3} – коэффициент разделения, с⁻¹, τ – время, с.

Изменение давления водяных паров в процессе СВЧ нагрева может быть описано зависимостью вида:

$$P(x, \tau_1) = 0,9492 \cdot P_{u_0} \cdot e^{-\tau_1 \frac{a_p \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \cdot \text{Cos} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{R} \right), \quad (3)$$

где a_p – коэффициент конвективной диффузии, м²/с, x – координата, м, P_{u_0} – давление в центре зерновки, Па.

Графическое представление изменения давления водяных паров в процессе СВЧ нагрева и после его снятия имеет вид, представленный на рисунке 1. Величины давлений далеки от реальных, но данные графики позволяют оценить динамику изменения давления, соизмерить время нарастания и время релаксации давления. При этом стоит учитывать изменение степени зависимости давления от температуры нагрева зерна. В процессе нагрева степень корреляции температуры и давления стремится к единице, в процессе охлаждения после снятия воздействия значительно ниже и зависит от времени. При этом релаксация давления происходит значительно быстрее, чем температуры.

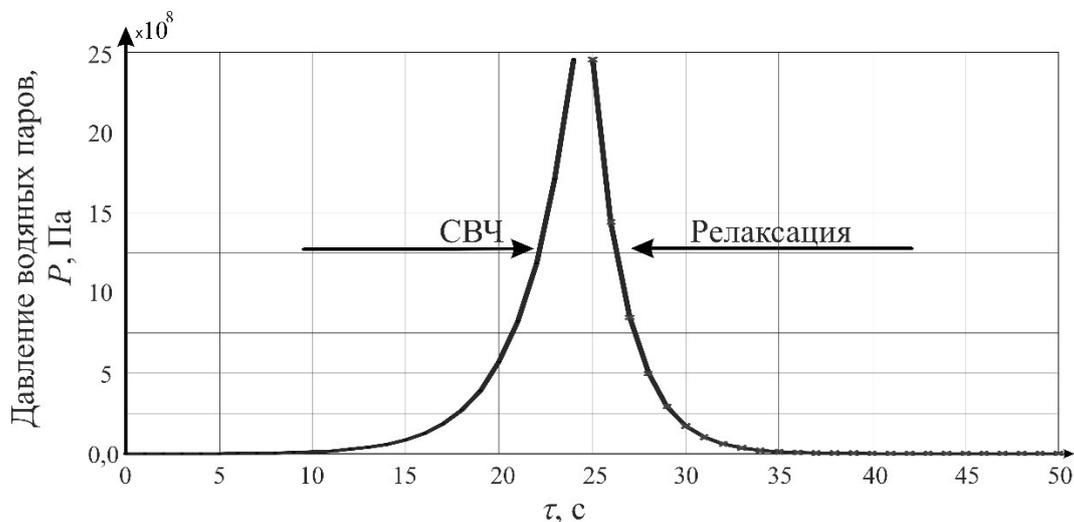


Рисунок 1- Изменение давления в процессе микроволнового нагрева

Таким образом, для того, чтобы в полной мере использовать положительное воздействие микроволнового фактора сушку необходимо проводить в процессе СВЧ нагрева и в первые 5-15 секунд после его снятия, что необходимо учитывать при проектировании оборудования и разработке режимов его работы.

Для реализации СВЧ-конвективного способа сушки предложена схема, представленная на рисунке 2.

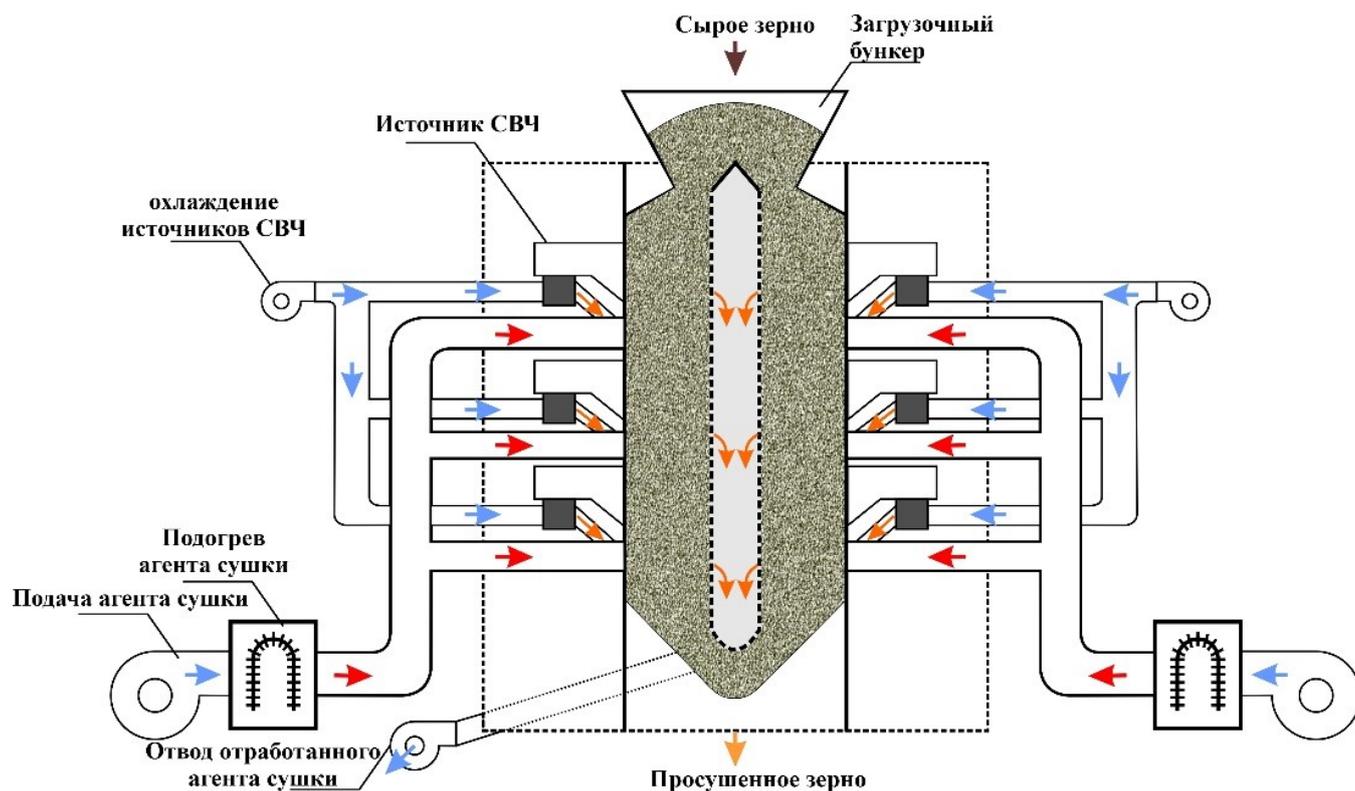


Рисунок 2 – Технологическая схема СВЧ-конвективной сушки зерна

Зависимость роста температуры зерна при воздействии микроволнового поля зависит от равномерности распространения поля и диэлектрических свойств обрабатываемого материала. Так на рисунке 3 представлены расчетные зависимости нагрева зерна от источника СВЧ мощности в зависимости от расстояния от источника и времени воздействия.

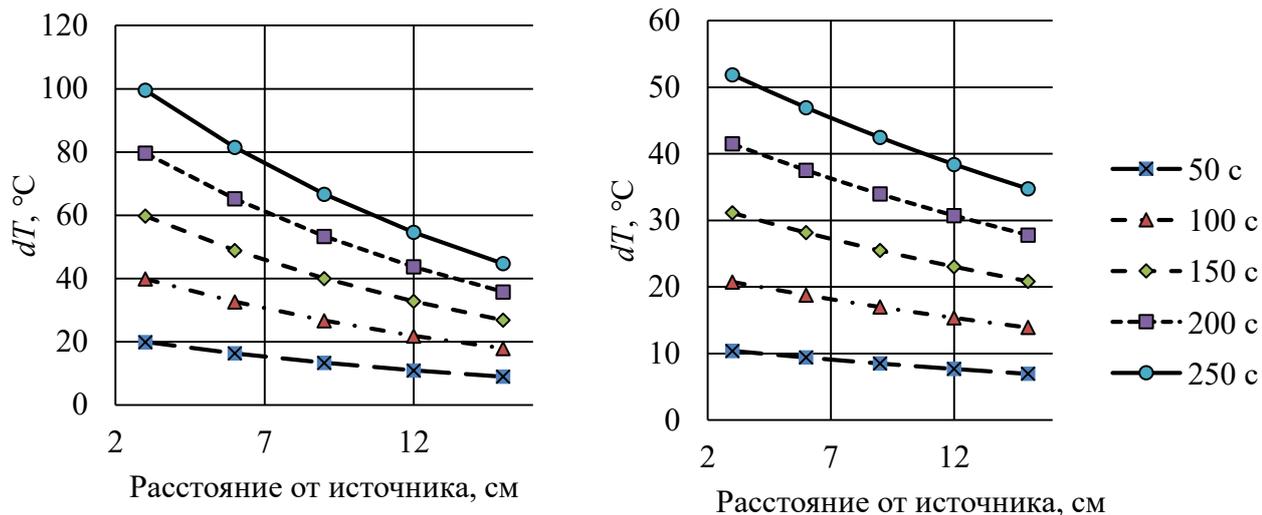


Рисунок 3 – Зависимость температуры нагрева от глубины слоя:

а – $f=2,45$ ГГц; б – $f=433$ МГц

Таким образом при СВЧ-конвективной сушке влажосъем необходимо осуществлять непосредственно в процессе микроволнового воздействия за счет агента сушки, продувающего слой обрабатываемого материала, что необходимо учитывать при разработке оборудования и режимов его работы.

В третьей главе «НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНА» определены параметры оборудования СВЧ-конвективной сушки зерна; исследована равномерность распространения СВЧ-поля в зерновом слое; разработана методика определения напряженности электрического поля СВЧ в зоне СВЧ-конвективной обработки; предложен метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя и исследована его зависимость от свойств материала.

К параметрам СВЧ-конвективных установок сушки зерна можно отнести конструкционные: применяемые источники СВЧ мощности (частота поля, мощность источника); применяемые волноводы; количество источников СВЧ мощности; размеры продуктопровода (сечение, толщина слоя); количество модулей; характеристики вентиляторов; установленная мощность и оперативно-контролируемые и управляемые: начальная и текущая влажность зерна; количество периодов сушки и их продолжительность; температура агента сушки; продолжительность сушки.

Для обеспечения равномерности поля источники предлагается располагать

встречно друг другу. Так как напряженность поля ослабевает по мере распространения в материале, то проектирование необходимо выполнять с учетом глубины проникновения микроволнового поля в материал, d_p , м, которая определяется свойствами материала на частоте воздействующего поля. На рисунке 4 схематически показано распределение потока мощности от двух встречных источников, к воздействующих на диэлектрический материал с высоким коэффициентом потерь.

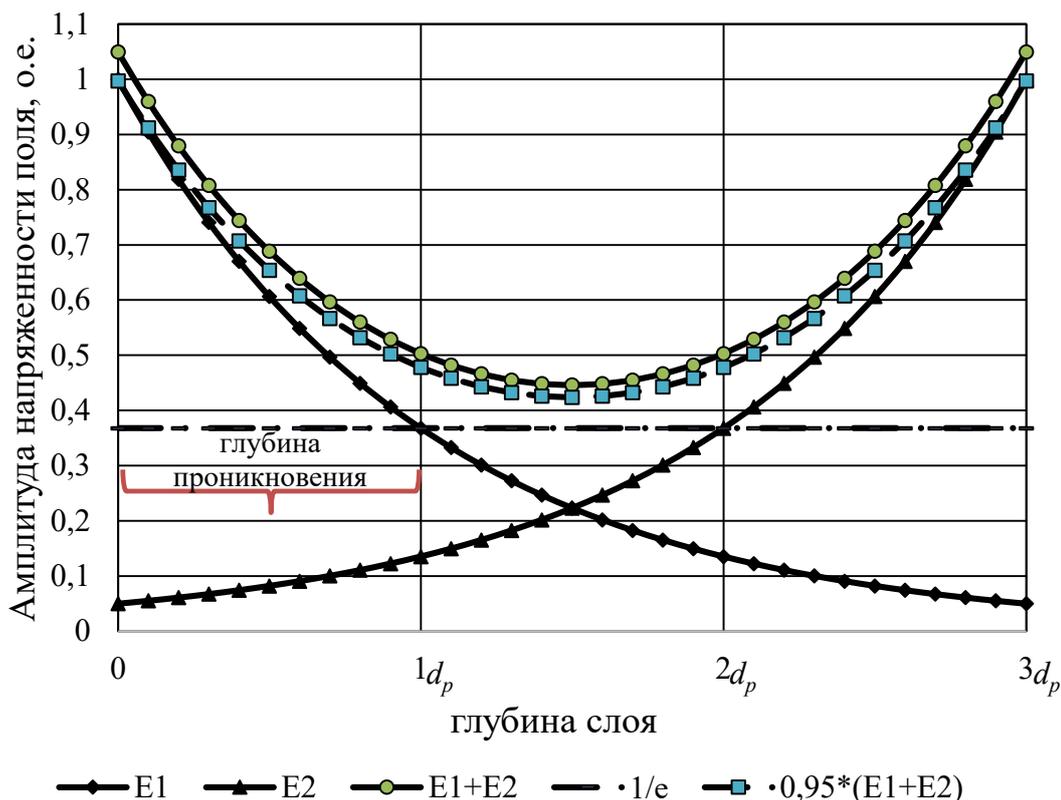


Рисунок 4 – Поток энергии от двух встречных источников

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 введен 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:

$$K_{\text{равн}} = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{max}}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{max}}}} = \sqrt{\frac{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E_{\text{ср}}^2 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E_{\text{max}}^2 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}}, \quad (4)$$

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/м³; ε' – диэлектрическая постоянная материала на данной частоте; $\text{tg} \delta$ – 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:

$$K_{\text{равн.min}} = 1/e = 0,368. \quad (5)$$

Масштабируемая модель установки СВЧ-сушки обеспечивается последовательным и параллельным объединением уровней магнетронов, включающих в себя два источника микроволновой мощности и участок зоны СВЧ-конвективного воздействия (продуктопровода). Результаты моделирования распространения микроволнового поля для продуктопровода сечением 200×200 мм (рисунок 5 а, б, в) и 200×200 мм (рисунок 5 г, д, е) для указанных форм волноводов, выполненное в программном комплексе электродинамического моделирования позволило получить значения коэффициента равномерности и его зависимость от влажности обрабатываемого материала для используемой конструкции. Для этого матрица численных значений результатов моделирования с шагом, задаваемым для каждой из осей выгружается в Matlab и обрабатывается для получения значений $E_{\text{ср}}$, E_{max} , $Q_{\text{ср}}$, Q_{max} и рассчитывается коэффициент равномерности $K_{\text{равн}}$.

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

$$K_{\text{равн}} = b_0 + b_1 \cdot W + b_2 \cdot W^2 + b_3 \cdot W^3, \quad (6)$$

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

Коэффициент детерминации аппроксимации для рассмотренных конструктивных решений находится в диапазоне 0,98-1.

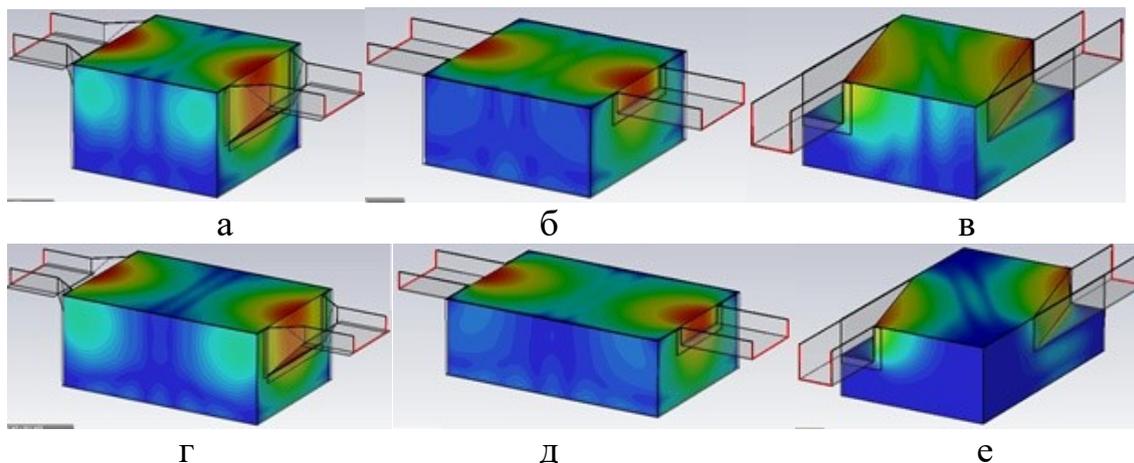


Рисунок 5 – Результаты моделирования поглощения электромагнитной мощности пшеницей $W=16\%$ в процессе СВЧ нагрева $f=2,45$ ГГц

Для экспериментальной проверки результатов моделирования была разработана методика определения напряженности электрического поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия на зерновой слой.

На основе ГОСТ Р МЭК 60705-2011 и существующих способов измерения была разработана калориметрическая система измерения напряженности электрического поля СВЧ в зоне СВЧ-конвективного воздействия, заполненной зерновым слоем и SCADA система для реализации измерений. В качестве воспринимающей части принята сфера диаметром $\frac{1}{4}$ длины волны, заполненная водой, изменение температуры которой воспринимается термодатчиком. Вода принята в связи с тем, что это материал, наиболее полно изученный с точки зрения диэлектрических свойств и их зависимости от температуры и частоты воздействующего поля.

Сущность методики:

- Для измерений используют материал с относительной диэлектрической проницаемостью от 2 до 100, заполняющий зону СВЧ-конвективного воздействия.
- 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.

Подготовка к выполнению измерений.

При подготовке к выполнению измерений проводят следующие работы:

- собирают измерительную установку;
- 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.

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 измерения 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 термомпарами, размещенными в объеме калориметрического датчика.

Обработка результатов измерений.

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

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

$$P_{СВЧ} = \frac{c \cdot \rho \cdot \Delta T}{\tau} + k_{расс} \cdot (T_{нагр} - T_{окр}), \quad (7)$$

где $T_{нагр}$ и $T_{окр}$ – температура нагрузки и окружающей среды соответственно, °С;
 $k_{расс}$ – коэффициент теплового рассеяния, Дж/с·°С.

– Определить напряженность СВЧ-поля в контролируемой точке (выполняется автоматически) По зависимости:

$$E = \sqrt{\frac{P_{\text{СВЧ}}}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon'' \cdot f}} \quad (8)$$

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

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.

На рисунке 6 приведены экспериментальная зависимость коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля от влажности обрабатываемой пшеницы. При этом линия 1 соответствует зависимости, полученной на основе моделирования; 2 – прямая, соответствующая 0,368; 3 – зависимость, полученная на основе экспериментальных исследований.

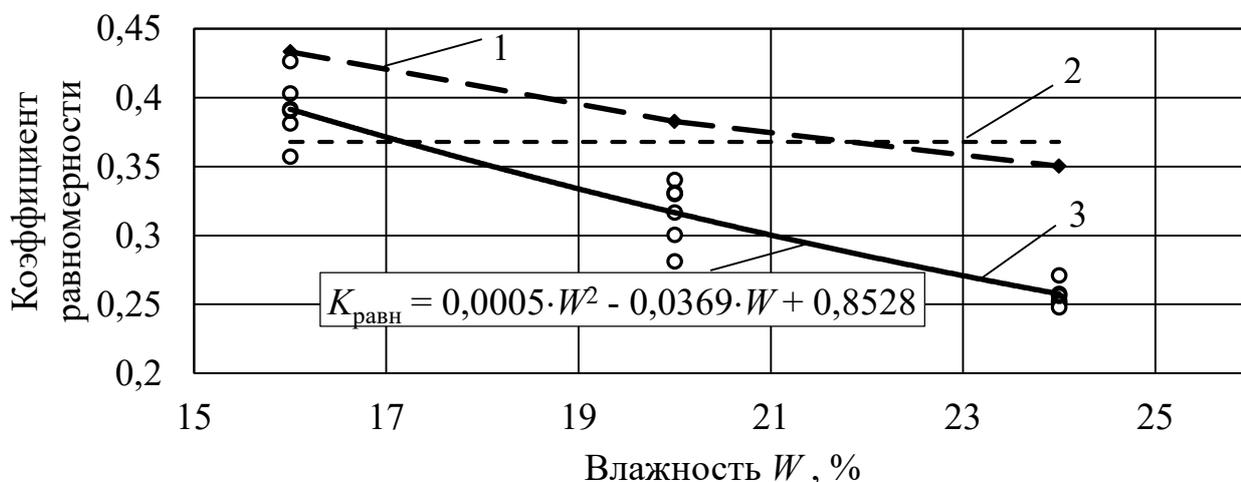


Рисунок 6 – Сравнительные значения коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля

Как видно из результатов, 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.

Предлагаемый косвенный метод измерения коэффициента диэлектрических потерь предполагает знание напряженности электрического поля в конкретной точке, и измерив изменение температуры за время контроля, коэффициент диэлектрических потерь может быть определен аналитически по зависимости:

$$\varepsilon'' = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta T}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \tau} \quad (9)$$

где c_m – теплоемкость материала, Дж/кг·°С; ρ_m – плотность вещества образца, кг/м³; ΔT – нагрев материала в процессе измерения, °С; E – напряженность электрического поля, В/м; f – частота электромагнитного поля, Гц.

Сущность метода:

В предлагаемом методе для измерений используют образцы с относительной диэлектрической проницаемостью от 2 до 100, заполняющие зону СВЧ-конвективного воздействия.

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.

Подготовка к выполнению измерений.

При подготовке к выполнению измерений проводят следующие работы:

- собирают измерительную установку;
- 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.

Выполнение измерений.

При выполнении измерений коэффициента диэлектрических потерь предлагаемым методом проводят следующие операции:

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).

Для псевдооживленного, 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.

Обработка результатов измерений.

- Коэффициент диэлектрических потерь исследуемого материала в плотном

слое вычисляется по зависимости (8).

– Коэффициент диэлектрических потерь исследуемого материала в псевдооживленном и взвешенном слое (при наличии вентилирования) вычисляется по зависимости:

$$\varepsilon'' = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta T + k_{\text{расс}} \cdot (T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}})}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \tau}, \quad (10)$$

где $T_{\text{нагр}}$ и $T_{\text{окр}}$ – температура нагрузки и окружающей среды соответственно, °С; $k_{\text{расс}}$ – коэффициент теплового рассеяния, Дж/с·°С.

– 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.

– При определении коэффициента диэлектрических потерь образцов исследуемого материала в псевдооживленном и взвешенном слое (при наличии вентилирования) вычисления производят по среднему значению между температурой и поверхности и центра зерновки.

– 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.

Экспериментальные исследования проводились для пшеницы с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 26 % и уровнями плотности слоя 800, 500, 200 кг/м³; ячменя с уровнями влажности 14, 16, 20, 24, 28 % и уровнями плотности слоя 700, 450, 200 кг/м³; 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/м³.

На рисунке 7 представлен пример полученных графиков определения коэффициента диэлектрических потерь для пшеницы при влажности от 11 до 30% для трех уровней плотности материала.

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 $11 \div 30\%$ коэффициент диэлектрических потерь изменяется в диапазоне $0,18 \div 0,42$; для псевдооживленного слоя (500 кг/м^3) $0,06 \div 0,15$; для взвешенного (200 кг/м^3) $0,1 \div 0,3$. 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 псевдооживленного 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.

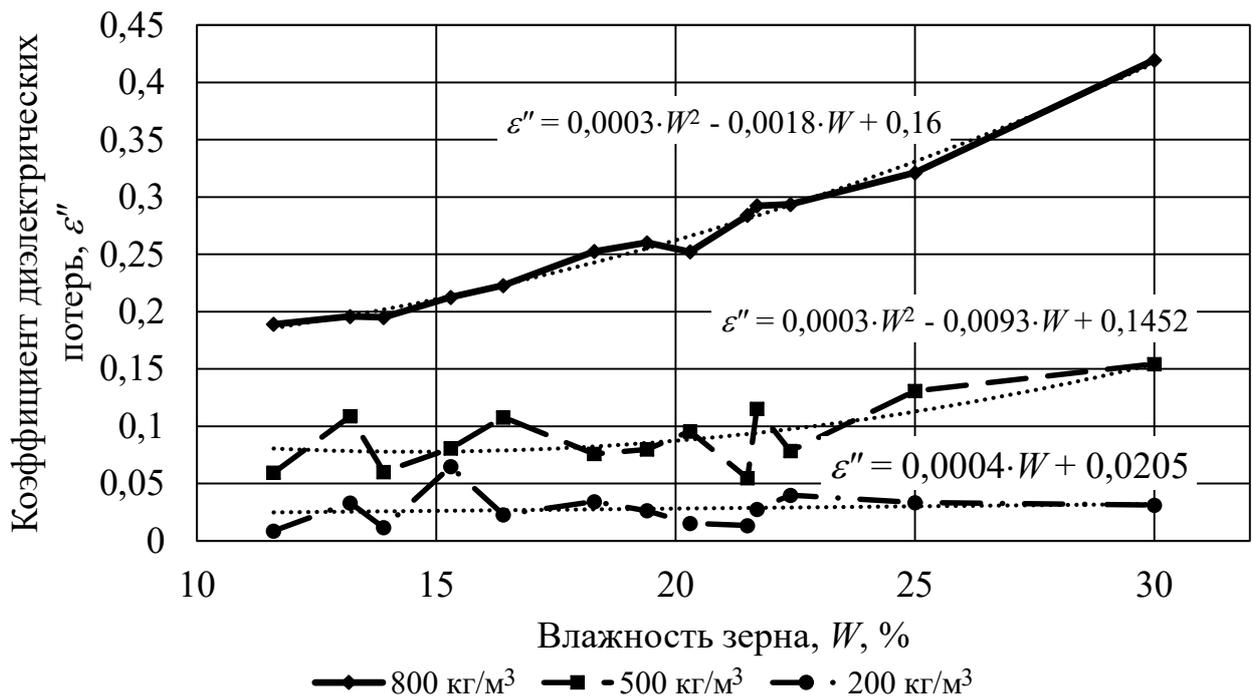


Рисунок 7 – Результаты определения коэффициента диэлектрических потерь

Полученные данные о зависимости коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя от влажности и плотности зернового слоя могут быть аппроксимированы полиномом второй степени вида:

$$\epsilon'' = b_0 + b_1 \cdot W + b_2 \cdot \rho_3 + b_3 \cdot W^2 + b_4 \cdot \rho_3^2 + b_5 \cdot W \cdot \rho_3, \quad (11)$$

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 2.

Пример графического представления исследуемой зависимости фактора диэлектрических потерь зернового слоя ячменя представлен на рисунке 8.

Таблица 2 – 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

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, что должно учитываться при проектировании оборудования.

Экспериментальные исследования для определения напряженности электрического поля и расчета равномерности его распределения в объеме зоны СВЧ-конвективной обработки 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 9). Шаг по осям координат составил 50 мм. Таким образом, по оси Ox и Oy значения принимали от -100 до +100; по оси Oz от -300 до =300.

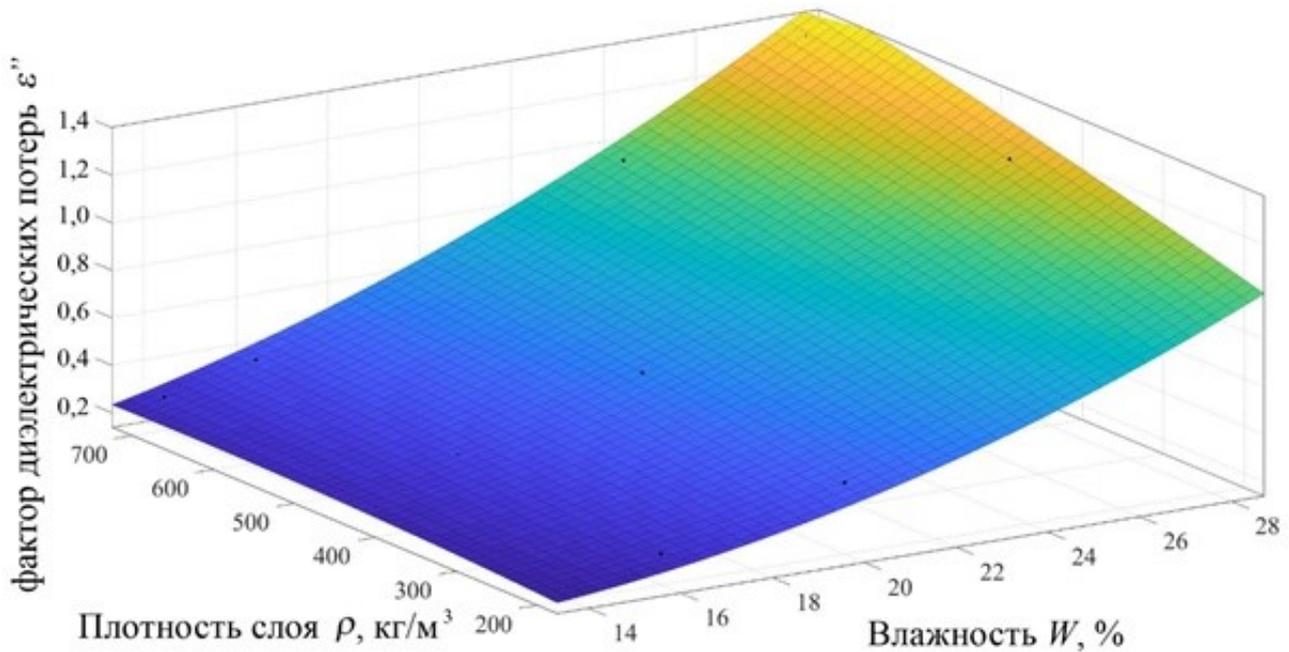


Рисунок 8 – Зависимость фактора диэлектрических потерь зернового слоя ячменя

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. В качестве примера реализации на рисунке 10 представлен объемный график на уровне $Z=0$ мм, который с 84% вероятностью описывает распределения напряженности электрического поля в слое пшеницы влажностью $W=14\%$.

Данная модель может быть использована для разработки управляющих алгоритмов в качестве источника данных о поведении зернового слоя в процессе обработки. По результатам проведенной работы получены параметры уровня зоны СВЧ обработки зерна: пшеница, тритикале, овес, ячмень (таблица 3) 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.

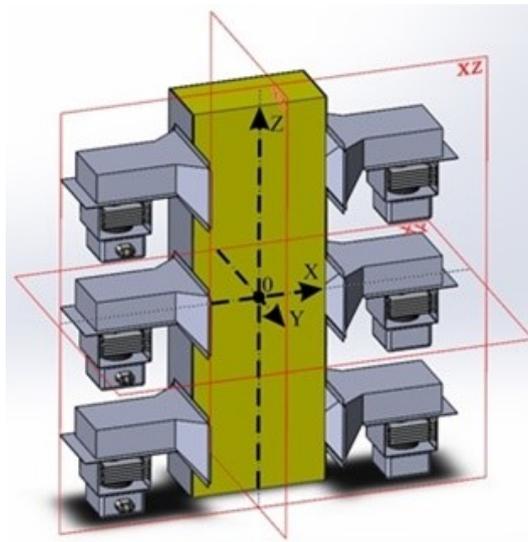


Рисунок 9 – Продуктопровод 200×200×600 в разрезе

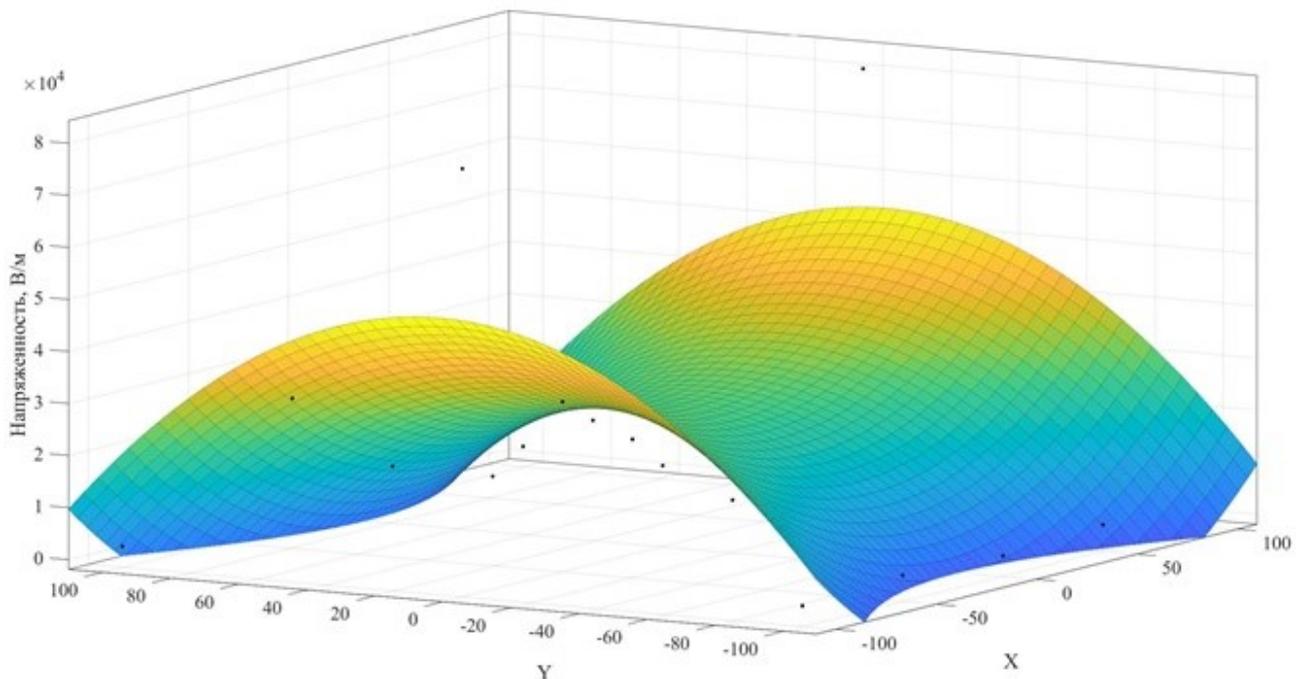
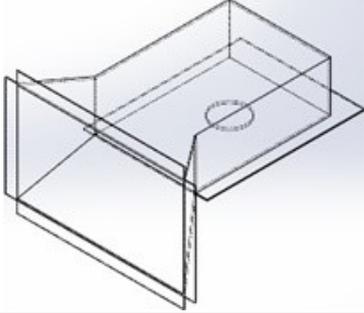
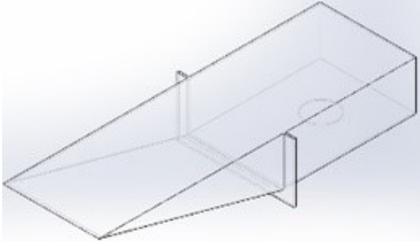


Рисунок 10 – Объемный график распределения напряженности в слое пшеницы для $Z=0$ мм, $W=14\%$

Таблица 3 – Параметры уровня зоны СВЧ воздействия

№	волновод	влажность	Высота, мм	Объем, $\times 10^{-3} \text{ м}^3$	Сечение, 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 конструкции уровня (размеры продуктопровода, применяемые волноводы) 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. Далее, для определения производительности модулей, разрабатываемых на основе выбранных уровней и установок, определялись режимы работы оборудования.

В четвертой главе «РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА» разработана математическая модель оптимального управления по критериям эффективности: минимум энергозатрат и максимум производительности; проведено моделирование процессов управления; разработаны алгоритмы функционирования оборудования; разработана компьютерная модель оптимального управления; разработаны режимы работы оборудования.

Представив систему дифференциальных уравнений, используемых для описания процесса СВЧ – конвективной сушки уравнения в операторном виде и решив дифференциальное уравнение относительно времени сушки получены математические модели оптимального управления. При управлении по критерию максимальной производительности:

$$\tau = -\ln((W - W_p)/(W_0 - W_p))/(7,4897 - 0,1022T - 0,6438W + 0,0134 Q_v + 0,0029V \cdot W - 0,0026T^2 + 0,0071W^2 + 0,0148Q_v^2) \rightarrow \min. \quad (12)$$

При этом граничные условия будут следующими:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{пр}}V \cdot (a \cdot 2,7434 \cdot 10^{-5}V + b \cdot 2,7434 \cdot 10^{-5}V^2)l + \\ \quad + c_{\text{в}}\gamma_{\text{в}}(T - T_0) + K_{\text{м}}P_{\text{м}} \leq Q_{\text{пр}}; \\ (\theta_0 - T(s)) \cdot \frac{1}{T_1s+1} + \theta_0 + A_5W(s)s + A_5W_0 + \frac{1}{s}A_6Q_v \leq \theta_{\text{пр}}. \end{array} \right. \quad (13)$$

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:

$$K_{\text{пр}}V \cdot (a \cdot 2,7434 \cdot 10^{-5}V + b \cdot 2,7434 \cdot 10^{-5}V^2)l + c_{\text{в}}\gamma_{\text{в}}(T - T_0) + K_{\text{м}}P_{\text{м}} \rightarrow \min, \quad (14)$$

при граничных условиях:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\theta_0 - T(s)) \cdot \frac{1}{T_1s+1} + \theta_0 + A_5W(s)s + A_5W_0 + \frac{1}{s}A_6Q_v \leq \theta_{\text{пр}}, \\ -\ln((W - W_p)/(W_0 - W_p))/(7,4897 - 0,1022T - \\ \quad - 0,6438W + 0,0134 Q_v, \\ +0,0029V \cdot W - 0,0026T^2 + 0,0071W^2 + 0,0148Q_v^2) \leq \tau_{\text{пр}}. \end{array} \right. \quad (15)$$

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.

Компьютерная Simulink – модель зернового слоя толщиной 15 см, разделённого на три слоя по 5 см, представлена на рисунке 11.

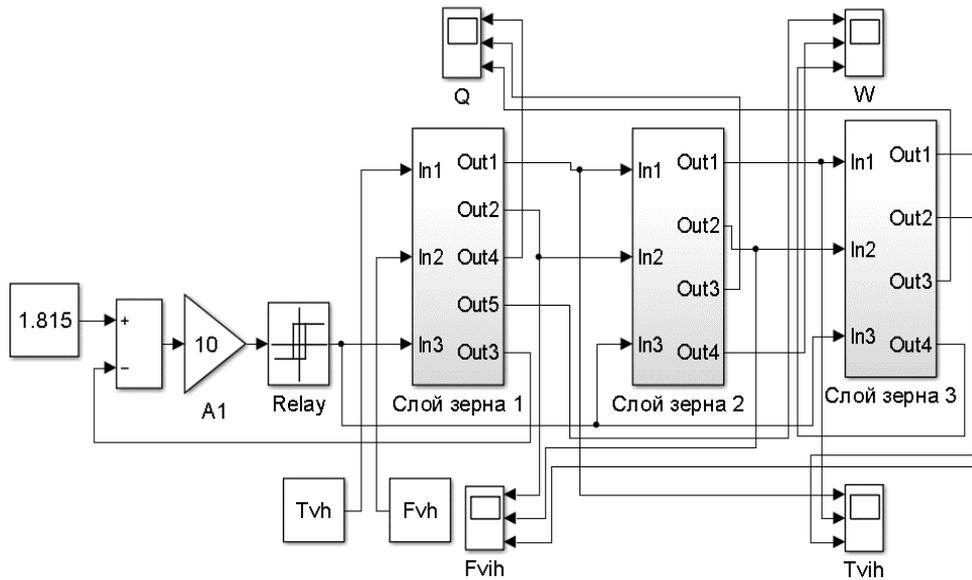


Рисунок 11 - Simulink – модель СВЧ – конвективной сушки зерна в плотном слое

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 T_{vh} и F_{vh} .

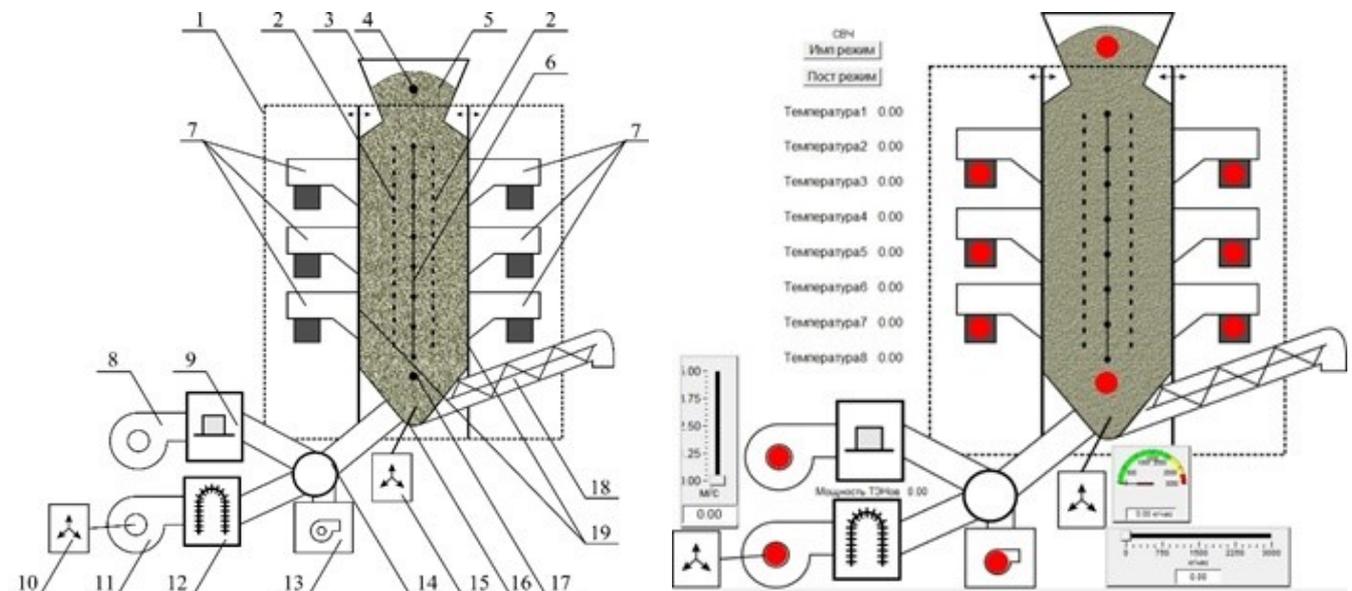
С помощью блока $Relay$ управляют включением/выключением магнетронов. Магнетроны отключают, когда температура зерна, в точке наибольшей мощности поля СВЧ, достигает 55°C . На осциллографы выводятся графики изменения температуры зерна в каждом слое (блок Q), влажности зерна в слое (блок W), относительной влажности воздуха на выходе из каждого слоя зерна (F_{vih}), температуры агента сушки на выходе из каждого зернового слоя (T_{vih}).

Для реализации управляющих программ и режимов работы оборудования была разработана лабораторная установка и SCADA-система для управления оборудованием и протоколирования параметров процесса сушки.

Упрощенно структурная схема системы контроля лабораторного оборудования и параметров процесса сушки зерна представлена на рисунке 12.

При проведении исследований работы СВЧ-конвективного модуля рассматривались режимы, представленные в таблице 4. Так изменялись режим работы источников СВЧ-мощности: 0 – без использования СВЧ; $\frac{1}{2}$ - в процессе обработки источники СВЧ-мощности работали с перерывами (при этом реализовывался режим 10 с

СВЧ – 10 с без использования СВЧ); $\frac{1}{4}$ - в процессе обработки источники СВЧ-мощности работали с перерывами (при этом реализовывался режим 5 с СВЧ – 15 с без использования СВЧ).



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 12– Лабораторная установка: а – схема установки; б – мнемосхема

В процессе экспериментальных исследований снимались кривые сушки пшеницы от исходной влажности 20% (рисунок 13). Далее по этим данным получали зависимость скорости влагоудаления в процессе сушки в зависимости от испытуемого режима работы установки. Также вычислялась текущая скорость влагоудаления от текущей влажности пшеницы от испытуемого режима работы установки. В результате были получены зависимости энергозатрат на сушку (испарение 1 кг

влаги) пшеницы в зависимости от реализуемого режима тепловой обработки (рисунок 14).

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 5 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.

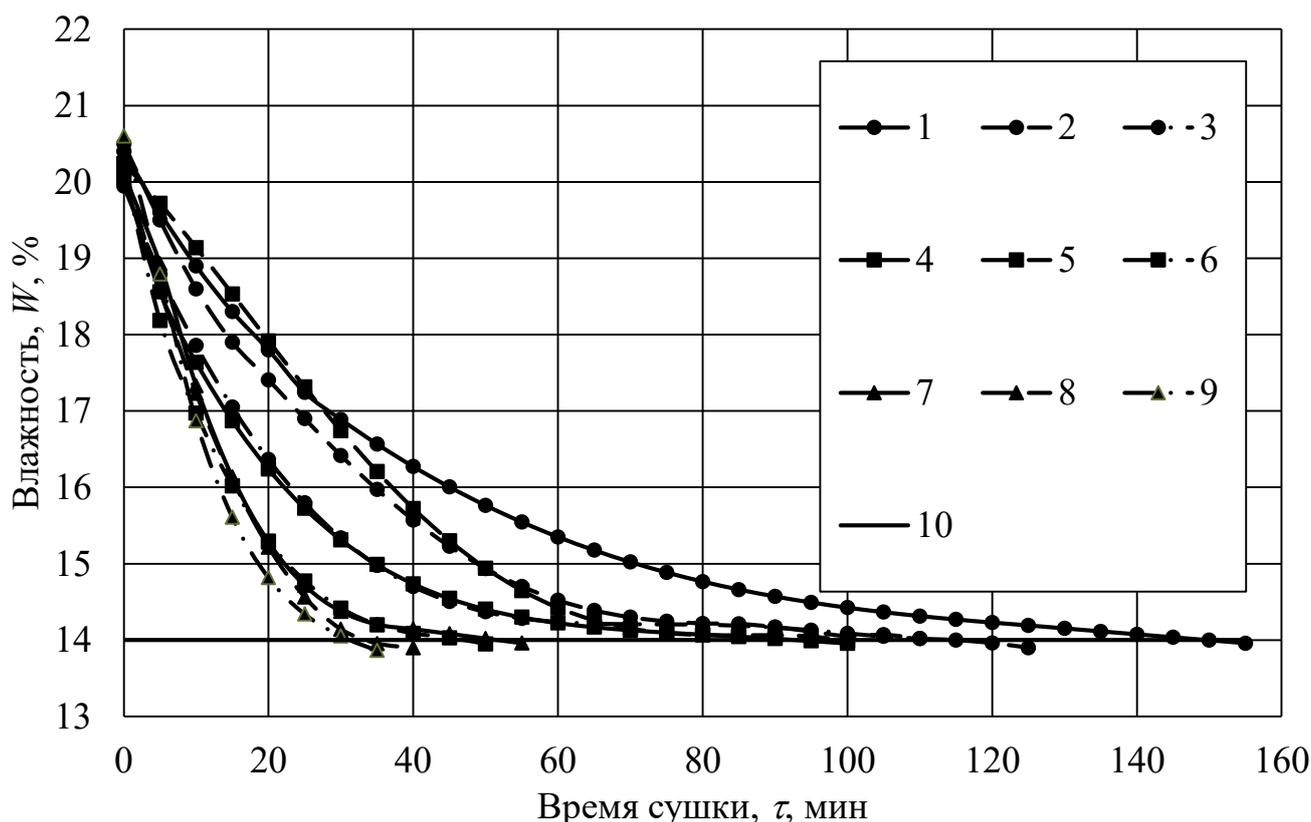


Рисунок 13 – Кривые сушки пшеницы при лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

Таблица 4 – Уровни факторов для получения кривых сушки

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВЧ	0	0	0	¼	¼	¼	½	½	½
$T_{\text{возд}}$, °C	20	30	470	20	30	40	20	30	40

Таблица 5 – 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

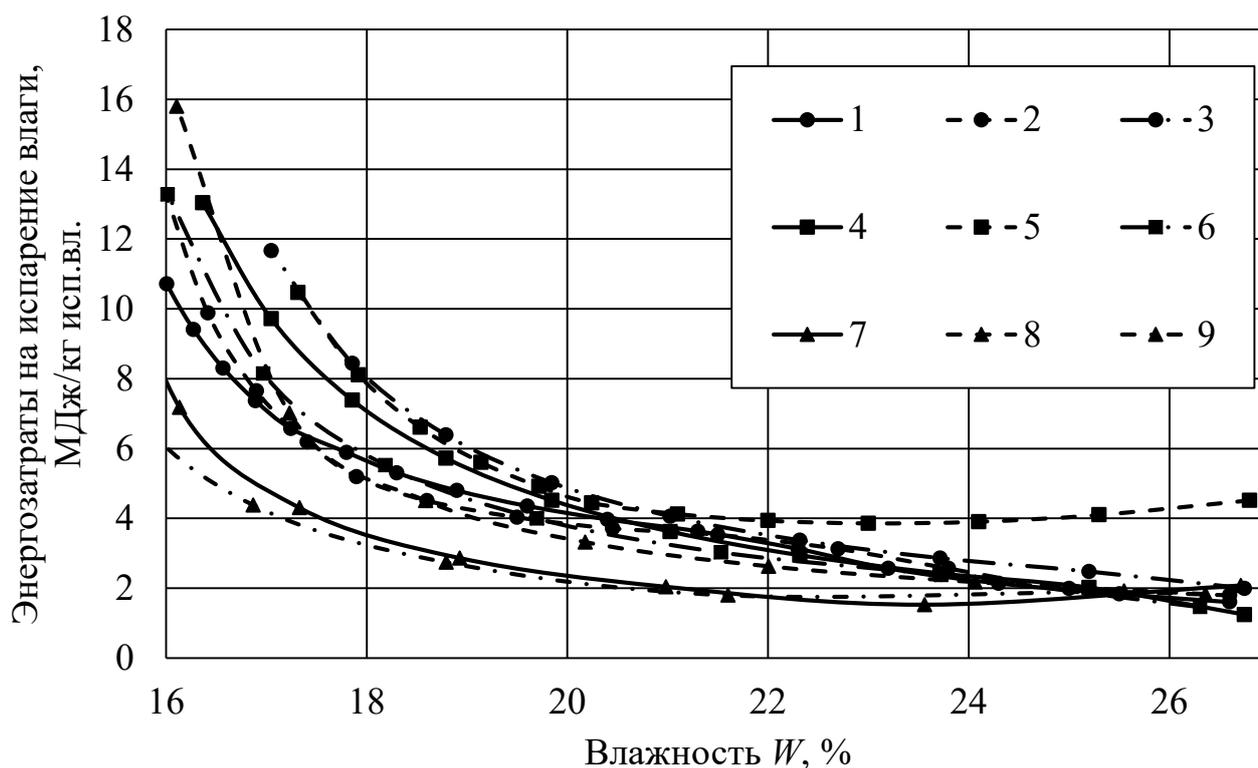


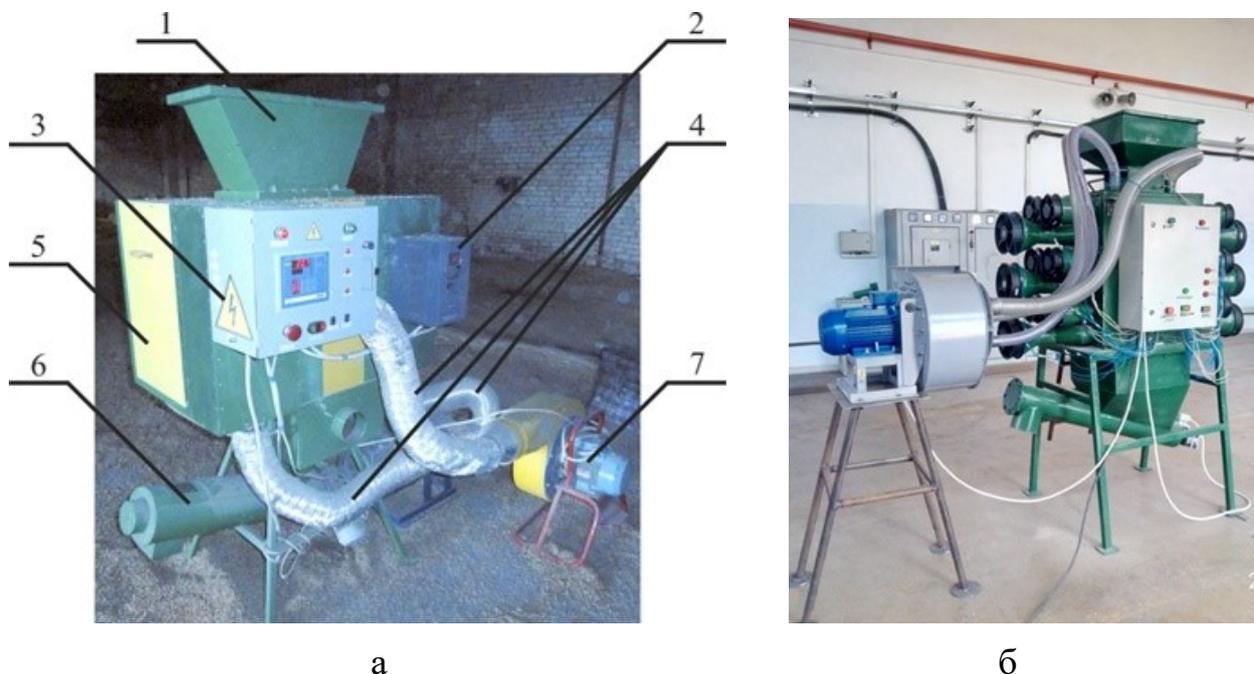
Рисунок 14 – Энергозатраты на сушку пшеницы при лабораторных испытаниях модуля СВЧ-конвективной обработки зерна

Эти результаты позволили доработать разработанные модели управления оборудованием и реализовывать процессом обработки по заданным критериям оптимальности. На основе результатов теоретических и лабораторных исследований было разработано оборудование, представленное на испытания.

В пятой главе «ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЧ МОДУЛЯ» представлены условия и результаты производственной проверки, сформулированы результаты анализа экономической эффективности работы и определены перспективы

развития применения микроволнового поля при разработке оборудования комбинированной СВЧ-конвективной сушки зерна.

На рисунке 15 приведено оборудование, представленное на испытания.



а
 б
 1 – загрузочный бункер; 2 – ПЧВ с панелью управления; 3 – щит управления;
 4 – воздуховоды охлаждения и сушки; 5 – СВЧ-модуль; 6 – выгрузной шнек с при-
 водом; 7 – вентилятор охлаждения и сушки зерна

Рисунок 15 – Оборудование, представленное на испытания

Испытания, проведенные на базе ФГБУ «Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция» (рисунок 15 а), а также в производственных условиях на базе аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «Казахский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (рисунок 15 б) для предлагаемых конструкций установки СВЧ-конвективной сушки зерна позволили получить данные для проведения технико-экономической оценки.

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%.

ОСНОВНЫЕ 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, достигающие 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 дисконтирования 1090,10 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 зерна 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.

Основные результаты исследования отражены в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования WoS, Scopus, Springer, Agris:

1. Vasiliev, Aleksey N. Research Methodology for Microwave-Convective Processing of Grain [Text] / Aleksey N. Vasiliev, V. P. Goryachkina, Dmitry Budnikov // International

Journal of Energy Optimization and Engineering (IJE OE). – April-June 2020. – # 9(2) – Article: 1. – Pages: 11. DOI: 10.4018/IJE OE.2020040101.

2. Vasiliev, A.N. Increasing Efficiency of Grain Drying With the Use of Electroactivated Air and Heater Control [Text] / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov, N.N. Gracheva, A.A. Smirnov // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — Pp. 255–282. — ISBN 9781522538677. — DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch011.

3. Budnikov, D.A. The Use of Microwave Energy at Thermal Treatment of Grain Crops [Text] / D.A. Budnikov, A.N. Vasiliev // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — Pp. 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>.

4. Budnikov, D.A. The Model of Optimization of Grain Drying with Use of Electroactivated Air [Text] / 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

5. Budnikov, D.A. Increasing Efficiency of Grain Drying With the Use of Electroactivated Air and Heater Control [Text] / D.A. Budnikov, A.N. Vasilyev ets. // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development / ed. by V. Kharchenko, P. Vasant. — USA, PA, Hershey: IGI Global, 2018. — Pp. 255–282. — ISBN 9781522538677. — DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch011.

6. Budnikov, D. The Mechanism of Intensification of Heat and Moisture Transfer During Microwave-Convective Processing Grain [Text] / D. Budnikov, A.N. Vasilyev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Volume 1072. – Pp. 231-239.

7. Budnikov, D. Development of a Laboratory Unit for Assessing the Energy Intensity of Grain Drying Using Microwave [Text] / D. Budnikov, A.N. Vasilyev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Volume 1072. – Pp. 93-100.

8. Budnikov, D.A. Propagation of Microwave Fields in Grain Material of Various Densities [Text] / 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>.

9. Vasiliev, A.N. Influence of the Direction of Air Movement in the Microwave-Convection Drier on the Energy Intensity of the Process [Text] / A.N. Vasiliev, D.A. Budnikov, N.B. Rudeko, N.N. Gracheva // Springer Innovations in Communication and Computing. – 2019. – 115 p. – 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>.

10. Vasiliev, A.N. The Functional Dependencies of the Drying Coefficient for the Use in Modeling of Heat and Moisture-Exchange Processes [Text] / 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. 239-245. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_24.

Публикации в ведущих изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

11. 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.

12. 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. – 2007. Выпуск 3/1. — С. 27-29.

13. Васильев, А.Н. Эффективность применения поля СВЧ для интенсификации сушки зерна активным вентилированием / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Б.Г. Смирнов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №7. – С. 29–30.

14. 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. – 2011. – №11. – С 26–29.

15. Грачева, Н.Н. Критериальное уравнение сушки зерна активным вентилированием электроактивированным воздухом [Электронный ресурс] // Н.Н. Грачева, Васильев А.Н., Будников Д.А. и др. // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – №73(09). – режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/35.pdf>, свободный.

16. Васильев, А.Н. Регулирование скорости асинхронного электропривода вентиляторов в бункерах активного вентилирования [Электронный ресурс] / А.Н. Васильев, Д.А. Тихомиров, Д.А. Будников // Международный научно-исследовательский журнал. – Август 2016. – № 8 (50). – Часть 3. DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.166. – режим доступа: <http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8-3-50.pdf>, свободный.
17. Васильев, А.Н. Моделирование рециркуляционной сушки зерна [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. – №5. – С 33–35.
18. 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). – С58–60.
19. Васильев, А.Н. Экспериментальное исследование сушки зерна электро-активированным воздухом [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, Н.Н. Грачева // Вестник ОрелГАУ. – 2012. – №5 (38). – С.160–162.
20. Васильев, А.Н. Конструкция бункера для сушки зерна активным вентилированием [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Будников // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – №9. – С. 57–58.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Васильев, А.Н. Модульная установка для обработки зерна [Текст] / А.Н. Ва-

сильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев, В.Г. Гусев, Ю.Ю. Ротачев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – №5. – С. 27–30.

25. 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).

26. 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.

27. 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.

28. 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. – режим доступа: http://xn--80aaak3h.xn--plai/files/vestnik/VD01_15.pdf, свободный.

29. Будников, Д.А. Результаты экспериментальных исследований фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси [Электронный ресурс] // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – №3(43). – С. 16-20. – режим доступа: http://ачгаа.рф/files/vestnik/VD3_2018_43.pdf, свободный.

30. Будников, Д.А. Моделирование электромагнитного поля в зерновом слое различной плотности [Электронный ресурс] // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – №1(41). – С. 40-45. – режим доступа: http://xn--80aaak3h.xn--plai/files/vestnik/VD01_15.pdf, свободный.

31. 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.

32. Будников, Д.А. Коэффициент равномерности распространения микроволнового поля в зерновом слое [Текст] // Электротехнологии и электрооборудование в

АПК. – 2020. – Том 67. – N 2(39). – С.87-92. DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-2-87-92.

В монографиях:

33. 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.

34. Васильев, А.Н. Совершенствование процессов сушки и обеззараживания зерна в СВЧ поле [Текст] / А.Н. Васильев, А.Б. Оспанов, Д.А. Будников и др. // – Алматы: Нур-Принт, 2017. – 163с. ISBN 978-601-7869-71-7.

35. Vasiliev, A.N. Improvement of grain drying and disinfection process in the microwave field [Text] / A.N. Vasiliev, A.B. Ospanov, D.A. Budnikov ets. // – Almaty: Nur-Print, 2017. – 155p. ISBN 978-601-7869-72-4.

Патенты РФ:

36. Патент № 159476 РФ МПК G01R 21/02. Устройство для измерения удельной мощности электромагнитного поля СВЧ в объеме, заполненном сыпучим либо жидким материалом [Текст] / Будников Д.А., Васильев А.Н. и др. заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВИЭСХ– №2015143411/28 заявл. 13.10.2015; опубл. 10.02.2016., Бюл. №4.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

А также 95 публикаций в других изданиях.