

22-3582

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Будников Д.А., Васильев А.Н., Васильев А.А.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ЗОН УСТАНОВОК
СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА ПУТЕМ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

МОНОГРАФИЯ

22-03582

Будников Д.А., Васильев А.Н., Васильев А.А.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ЗОН УСТАНОВОК
СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА ПУТЕМ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

МОНОГРАФИЯ

Орёл — 2022

Орёлский государственный университет

УДК 620:631.365.22

ББК 65.325.151

П 79

Авторы:

Будников Дмитрий Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Васильев Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Васильев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Рецензенты:

Беляков Михаил Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптико-электронных систем филиала ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ» в г. Смоленске

Тихомиров Дмитрий Анатольевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор РАН, заведующий отделом энергообеспечения и электротехнологий ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

П 79 **Проектирование рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна путём электродинамического моделирования / Будников Д.А., Васильев А.Н., Васильев А.А. – Орёл: Издательство «Картуш», 2022. – 348 с.**

ISBN 978-5-9708-0996-9

В монографии изложены варианты проектирования рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна в среде электродинамического моделирования CST Microwave studio на основе существующих данных о диэлектрических свойствах сельскохозяйственных культур. Указаны критерии эффективности работы данных установок и возможности реализации оптимального управления ими. Приведён пример производственных испытаний и расчёта экономической эффективности внедрения установки СВЧ-конвективной обработки зерна.

УДК 620:631.365.22

ББК 65.325.151

*Рекомендовано к изданию секцией
Учёного совета ФГБНУ ФНАЦ ВИМ «Электроснабжение АПК»*

ISBN 978-5-9708-0996-9

© Коллектив авторов, 2022
© ООО ПФ «Картуш», 2022

Оглавление

Оглавление	3
Введение	8
1 ОБЗОР ОБЪЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ ЗЕРНОВЫХ	11
1.1 Аналитический обзор объемов перерабатываемого материала	11
1.1.1 Необходимость сушки зерна	11
1.1.2 Потенциал снижения потерь при производстве зерновых	14
1.1.3 Виды и причины потерь зерна при хранении	16
1.2 Способы сушки зерна	20
1.2.1 Основы сушки	20
1.2.2 Классификация способов сушки	24
1.2.3 Выбор сушильного оборудования	26
1.2.4 Интенсифицирующие факторы	28
1.2.5 Критерий эффективности процесса сушки зерна	30
1.3 Энергетические затраты на сушку зерна	31
1.4 Оборудование для сушки с применением электрофизических воздействий	34
1.4.1 Ультразвук	35
1.4.2 Озон	37
1.4.3 Аэроионы	43
1.4.4 Инфракрасный нагрев	45
1.4.5 Радиочастотная сушка	49
1.4.6 СВЧ	53
1.5 Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов	62
1.5.1 Частотная зависимость диэлектрических свойств воды	63
1.5.2 Температурная зависимость диэлектрических свойств воды	64
1.5.3 Зависимость от плотности материала	65
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- ВЛАГОПЕРЕНОСА	69

2.1	Механизм удаления влаги из зерна.....	69
2.2	Общие положения СВЧ нагрева.....	74
2.3	Интенсификация тепло-влажнопереноса СВЧ-воздействием.....	77
2.4	Выводы по разделу.....	89
3	ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ СВЧ-КОНВЕКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНОВОЙ СЛОЙ.....	90
3.1	Параметры разрабатываемого оборудования.....	90
3.2	Существующие сведения о диэлектрических свойствах зерна.....	91
3.2.1	Общие сведения о диэлектриках.....	91
3.2.2	Диэлектрические свойства зерна.....	94
3.2.3	Глубина проникновения.....	97
3.3	Равномерность распределения электромагнитной волны в зерновом слое.....	100
3.4	Численный эксперимент по определению коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля в зоне СВЧ-конвективного воздействия.....	102
3.4.1	Постановка задачи для численного моделирования.....	102
3.4.2	Обоснование выбора программной среды для разработки компьютерной модели.....	104
3.5	Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с одним источником.....	106
3.5.1	Моделирование волновода.....	106
3.5.2	Моделирование зоны СВЧ-конвективной обработки зерна с одним источником.....	111
3.6	Разработка методики определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки.....	118
3.6.1	Общие сведения об измерении параметров ЭМП.....	119
3.6.2	Обоснование калориметрического датчика.....	125
3.6.3	Экспериментальная установка.....	135

3.6.4 Методика определения напряженности микроволнового поля в зоне СВЧ-конвективной обработки.....	139
3.6.5 Экспериментальные исследования коэффициента равномерности распространения электромагнитного поля.....	142
3.7 Исследование изменение коэффициента диэлектрических потерь зерна.....	147
3.7.1 Разработка метода косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя.....	148
3.7.2 Метод косвенного определения коэффициента диэлектрических потерь зернового слоя.....	158
3.7.3 Результаты измерений.....	161
3.8 Исследование распределения СВЧ поля в продуктопроводе установки СВЧ-конвективной обработки зернового слоя.....	165
3.8.1 Модель СВЧ-конвективного воздействия на зерновой слой.....	165
3.8.2 Моделирование зернового слоя.....	169
3.8.3 Разработка модели зоны СВЧ-конвективного воздействия с несколькими источниками СВЧ мощности, работающими одновременно.....	174
3.8.4 Экспериментальное исследование распространения электромагнитного поля в зерновом слое.....	193
3.9 Выводы по разделу.....	196
4 РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНА.....	199
4.1 Разработка математической модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки зерна по критериям эффективности: минимум энергозатрат и максимум производительности.....	199
4.2 Исследование динамических свойств зернового слоя.....	201
4.3 Моделирование процессов управления.....	207
4.3.1 Моделирование управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке.....	207
4.3.2 Моделирование управления работой магнетронов и подачей теплоносителя при СВЧ – конвективной сушке зерна.....	209

4.4	Разработка алгоритмов функционирования	210
4.4.1	Разработка алгоритмов управления подачей теплоносителя в плотный слой зерна при конвективной сушке	210
4.4.2	Разработка алгоритма управления подачей теплоносителя и регулирования его температурой при сушке зерна в универсальном электротехнологическом модуле для сушки и обработки зерна с учетом изменения движущих сил тепло- и влагопереноса при СВЧ воздействии.....	211
4.4.3	Разработка алгоритма функционирования систем подачи и выгрузки зерна универсального электротехнологического модуля.....	212
4.4.4	Разработка алгоритма управления работой магнетронов на основе полученных математических моделей процесса нагрева зерна в СВЧ поле универсального электротехнологического модуля.....	213
4.4.5	Разработка объединенного алгоритма функционирования универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна.....	213
4.5	Разработка компьютерной модели оптимального управления универсальным электротехнологическим модулем для сушки и обработки зерна	215
4.6	Разработка управляющих программ	230
4.7	Лабораторные исследования эффективности работы универсального электротехнологического модуля для сушки и обработки зерна.....	231
4.7.1	Организация испытаний	231
4.7.2	Испытательный стенд	232
4.7.3	Разработка исходных требований на лабораторную установку.....	232
4.7.4	Разработка исходных требований на экспериментальную установку исследования автоматизированной системы управления СВЧ - конвективной сушкой зерна.....	234
4.7.5	Изготовление и пуско-наладка лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно (сыпучие материалы) с различной плотностью слоя	235

4.7.6 Система контроля показаний датчиков, выработки и вывода управляющих воздействий для лабораторной установки электрофизического воздействия на зерно.....	237
4.7.7 Определение энергоэффективных режимов сушки зерна при СВЧ – конвективном воздействии.....	241
4.8 Выводы по разделу	248
5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЧ МОДУЛЯ	250
5.1 Производственные испытания.....	251
5.2 Оценка экономической эффективности внедрения разработки.....	257
5.2.1 Краткое описание проекта.....	257
5.2.2 Расчет экономической эффективности универсальных модульных конструкций для тепловой обработки зерна с использованием поля СВЧ.....	260
5.2.3 Формирование прогнозных денежных потоков и оценка показателей эффективности проекта.....	267
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	279
Список сокращений.....	281
Список литературы.....	282
Приложения.....	325
Приложение А – Сводные сведения об энергоемкости сушильного оборудования.....	326
Приложение Б – Экспериментальные данные по определению напряженности в зерновом слое.....	335
Приложение В – Проект технических условий.....	337
Приложение Г – Результаты испытаний на МИС	345