

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I»**

На правах рукописи



КИРМАСОВ Владислав Юрьевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНА
КУКУРУЗЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Баскаков И.В.

Воронеж – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ ЗЕРНА И ПОИСК ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕРНОСУШИЛОК.....	12
1.1 Анализ способов и показателей сушки зерна и семян зерновых культур	12
1.2 Особенности конструкций зерносушилок и поиск перспективных направлений их совершенствования	18
1.3 Интенсификация процесса сушки зерна посредством применения озонозоооздушной смеси	35
1.4 Комплексный анализ и систематизация теоретических исследований кинетики сушки зерна под воздействием озонозоооздушной смеси	51
1.5 Выводы по разделу.....	58
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	59
2.1 Моделирование влагосодержания зерна при конвективной сушке в условиях предварительной озонозоооздушной обработки влажного зернового вороха	59
2.2 Зависимость параметров модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с предварительной озонозоооздушной обработкой влажного зернового вороха для периода постоянной скорости сушки.....	68
2.3 Зависимость параметров модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с предварительной озонозоооздушной обработкой влажного зернового вороха для периода падающей скорости сушки.....	71
2.4 Определение ключевых параметров влагопереноса при конвективной сушке с предварительной озонозоооздушной обработкой влажного зернового вороха для периода постоянной скорости сушки	73
2.5 Определение ключевых параметров влагопереноса при конвективной сушке с предварительной озонозоооздушной обработкой влажного зернового вороха для периода падающей скорости сушки	81
2.6 Выводы по разделу.....	84
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	86
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	86
3.2 Лабораторные установки, приборы и оборудование.....	87

3.2.1 Лабораторная установка по обработке зернового материала озоновоздушной смесью	87
3.2.2 Лабораторная шахтная зерносушилка	89
3.2.3 Лабораторная жалюзийная зерносушилка	91
3.2.4 Оборудование, используемое при проведении исследований	93
3.3 Методика проведения экспериментальных исследований	94
3.3.1 Методика экспериментальных исследований по обоснованию рациональных режимов озоновоздушной обработки влажного зерна кукурузы перед последующей сушкой	94
3.3.2 Методика экспериментальных исследований по определению эффективности шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при предварительной озоновоздушной обработке зерна кукурузы.....	97
3.3.3 Методика экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса последующей сушки	98
3.3.4 Методика экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой на их посевные качества.....	100
3.4 Методика обработки экспериментальных данных	100
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОЗОНИРОВАНИЯ ВЛАЖНОГО ЗЕРНА КУКУРУЗЫ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ПРОЦЕССА СУШКИ.....	102
4.1 Обоснование разработки конструкции применения предварительной озоновоздушной обработки влажного зернового вороха перед сушкой зерна.....	102
4.2 Проектирование конструктивно-технологической схемы зерносушилки с применением предварительной озоновоздушной обработки влажного зерна кукурузы.....	105
4.3 Результаты экспериментальных исследований по обоснованию рациональных режимов озонирования влажного зерна кукурузы перед его сушкой	108
4.4 Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при предварительной озоновоздушной обработке влажного зерна кукурузы	113
4.5 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса последующей сушки	116

4.6 Влияние предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой на их посевные качества	123
4.7 Проверка адекватности математической модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с применением предварительного озонирования	127
4.8 Оценка влияния ключевых технологических параметров конвективной сушки зерна с предварительной озоновооздушной обработкой на интенсификацию процесса.....	130
4.9 Выводы по разделу.....	134
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКИ ВЛАЖНОГО ЗЕРНА КУКУРУЗЫ ПЕРЕД ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКОЙ.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ А	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	171

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Кукуруза является одной из ключевых сельскохозяйственных культур, которая в мировом земледелии занимает третье место по площади возделывания после пшеницы и риса. Уникальность растения состоит в широком спектре его применения. Зерно кукурузы используют в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, а также в технических целях. Из него производят муку, крахмал, крупу, сироп, хлопья, спирт, глюкозу и многие другие продукты. Кукуруза является пропашной культурой, что позволяет её эффективно использовать в севообороте, очищая поля от сорняков. Это растение отличается устойчивостью к болезням и вредителям.

В большинстве регионов Российской Федерации уборка кукурузы происходит в позднеосенний период. При этом влажность зерна составляет 20...26%, что не позволяет закладывать его на длительное хранение. Согласно требованиям ГОСТ Р 52325-2005 содержание влаги в зерновом ворохе кукурузы не должно превышать 14...16%. Эти нормы обуславливают необходимость и неотвратимость проведения операции сушки зерна.

Отсутствие избыточной влаги в зерне предотвращает развитие негативных процессов, приводящих к его порче. Правильно организованный процесс сушки обеспечивает сохранность качества сырья. В настоящее время учёные и производственники всячески стараются улучшить конструкцию зерносушилок, сократив потери тепла, интенсифицировав процесс влагоотделения, усовершенствовав технологический процесс работы оборудования. Решение обозначенных вопросов позволит устранить ряд современных, важных и злободневных проблем.

Одним из наиболее перспективных способов дестабилизации связей молекул воды с органическими компонентами зерна является процесс озонирования. Озон способствует расширению межклеточных мембран и облегчает выход влаги на поверхность зерновки из внутренних слоёв. При этом озоновоздушная обработка обладает рядом экологических преимуществ, исключая образование токсинов и загрязнение окружающей среды [38, 64, 80]. Помимо этого, озонирование

эффективно обеззараживает семена и стимулирует их развитие, что повышает продуктивность зерновых культур [5, 67, 81, 132, 135]. Использование озонвоздушной обработки позволит обеспечить сохранность качества зерна экологически безопасным способом, интенсифицировать процесс сушки зерна и продлить срок безопасного хранения [10, 42, 53, 58, 110, 114]. Современные технические решения позволяют реализовать озонные технологии без вреда для здоровья человека и экологии [67, 69, 134].

Следовательно, исследования, направленные на интенсификацию процесса сушки зерна кукурузы посредством предварительной озонвоздушной обработки, являются актуальными и позволят разработать инновационные подходы и технические решения, обеспечивающие экологическую чистоту продукции, сокращение энергозатрат, повышение эффективности производственного процесса и сохранение качественных показателей сырья.

Диссертационная работа выполнена в ходе реализации программы НИР агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», п. 2.1 «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции растениеводства», которая утверждена учёным советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Проведённый анализ литературных источников показывает, что проблема интенсификации сушки зерна кукурузы может быть решена различными способами. Теоретические основы конвективной сушки капиллярно-пористых тел заложены в трудах А.В. Лыкова и А.С. Гинзбурга. Значительный вклад в развитие теории и практики сушки зерна внесли В.И. Жидко, Н.В. Демский, С.К. Манасян, С.П. Рудобашта, Ю.В. Саенко, А.И. Купреенко, Н.А. Прохоренко, А.А. Шевцов, Е.Ю. Желтоухова, Д.С. Сайко и др. Исследованиями применения озона при сушке зерна занимались Н.В. Ксенз, Т.П. Троцкая, А.В. Голубкович, Р.И. Штанько, И.В. Баскаков, Д.А. Нормов, а также ряд зарубежных учёных. В известных работах показана эффективность использо-

вания озонородушной смеси как компонента сушилного агента, позволяющая ускорить процесс сушки. Однако в них отсутствуют единые теоретические подходы к описанию влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы, предварительно обработанного озонородушной смесью. Недостаточно изучены закономерности изменения влагосодержания зерна от параметров обработки, не разработаны математические модели, учитывающие совокупное влияние озона и температуры на кинетику сушки. Открытым остается вопрос о рациональных режимах предварительного озонирования. Следовательно, существует необходимость в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях в этом направлении.

Объект исследования: технологический процесс конвективной сушки зерна кукурузы, предварительно обработанного озонородушной смесью.

Предмет исследования: закономерности изменения влагосодержания предварительно обработанного озонородушной смесью зерна кукурузы при конвективной сушке в шахтных зерносушилках.

Цель исследования: сокращение продолжительности конвективной сушки зерна кукурузы в шахтных зерносушилках за счет применения предварительной озонородушной обработки.

Задачи исследования:

- установить закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы, предварительно обработанного озонородушной смесью, от основных параметров конвективной сушки;

- выявить зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы, предварительно обработанного озонородушной смесью, от температуры сушки и параметров озонирования;

- разработать техническое решение устройства для сушки зерна с предварительной озонородушной обработкой;

- экспериментально определить режимы предварительной озонородушной обработки зерна кукурузы перед подачей в шахтную зерносушилку.

Научная новизна:

- установлена закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы во времени при конвективной сушке от коэффициентов влагопроводности, термо-влагопроводности, теплопроводности, критерия фазовых превращений, эквивалентного радиуса зерна и его плотности, отличающаяся учетом влияния предварительной озонородушной обработки в виде коэффициента интенсификации влагопереноса;

- выявлена зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы от параметров процесса термического воздействия и предварительной озонородушной обработки, отличающаяся учетом концентрации озона и времени озонирования;

- предложено техническое решение устройства для сушки зерна, отличающееся наличием предварительной озонородушной обработки с постоянным мониторингом режимов озонирования;

- определены режимы предварительной озонородушной обработки зерна кукурузы перед подачей в шахтную зерносушилку, отличающиеся рациональной дозой озонирования.

Теоретическую значимость имеют закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы во времени, учитывающая влияние предварительной озонородушной обработки на интенсификацию процесса сушки; зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке предварительно проозонированного зерна кукурузы, учитывающая температуру сушильного агента, концентрацию озона и время озонородушной обработки, дополняющие теорию сушки зерна.

Практическую значимость представляют программы для ЭВМ (свидетельства № 2023614948 и № 2026619507 РФ, приложение А), реализующие математическую модель конвективной сушки зерна кукурузы, предварительно обработанного озонородушной смесью; устройство для сушки зерна (патент № 226053 РФ, приложение А) с применением предварительного озонирования; режимы предварительной озонородушной обработки зерна кукурузы перед подачей в шахтную зерносушилку.

Методология и методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы использовали методы системного анализа, математического моделирования, статистики, реализованные в пакете прикладных программ Matlab. Экспериментальные исследования выполняли в лаборатории кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в соответствии с требованиями действующих стандартов и разработанными частными методиками. Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программ Microsoft Excel и Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы во времени при конвективной сушке, позволяющая определить степень интенсификации процесса за счет предварительной озоновооздушной обработки;
- зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке предварительно проозонированных зёрен кукурузы, позволяющая определить влияние температуры сушильного агента, концентрации озона и времени озоновооздушной обработки на динамику снижения влагосодержания;
- техническое решение устройства для сушки зерна, позволяющее выполнять сушку зерна с предварительным озонированием;
- режимы озонирования зерна кукурузы перед подачей в шахтную зерносушилку, обеспечивающие интенсификацию процесса конвективной сушки зерна.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты получены с применением современных теоретических подходов, методов математического анализа и моделирования, теории сушки зерна, апробированных методик выполнения экспериментальных исследований. Достоверность полученных данных подтверждается актуальной методологической базой, использованием современных средств вычислительной техники, поверенных измерительных приборов, актами внедрения в производство.

Результаты исследований используются учебно-научно-технологическим центром «Агротехнология» ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, ООО «Новоусманская земля» Новоусманского района Воронежской области при сушке зерна, консор-

циумом «KOBLiK GROUP» при разработке инновационных зерносушильных комплексов, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке магистров по направлению «Агроинженерия» (Приложение Б).

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в 2023–2025 годах, а также на международных и национальных научных конференциях:

- «Инновационные технологии и технические средства для АПК» (Россия, Воронеж, 12–13 ноября 2020 года);

- «Теория и практика инновационных технологий в АПК» (Россия, Воронеж, 29–30 апреля 2021 года, 01 марта–28 апреля 2023 года);

- «Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса» (Россия, Воронеж, 25 сентября 2024 года, 26 сентября 2025 года);

- «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Россия, Воронеж, 25 ноября 2021 года, 30 ноября 2023 года);

- «Прикладные вопросы физики, посвященной 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова» (Россия, Воронеж, 20 октября 2022 года);

- «Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК» (Россия, Воронеж, 17 марта 2023 года);

- «Современные научно-практические решения в АПК» (Россия, Воронеж, 23 октября 2023 года);

- «Тенденции развития технических средств и технологий в АПК» (Россия, Воронеж, 12 февраля 2024 года, 31 января 2025 года);

- «Молодежный вектор развития аграрной науки» (Россия, Воронеж, 15 февраля–31 марта 2024 года).

Личный вклад соискателя заключается в обосновании актуальности выбранной темы, формулировке цели и задач исследований, выборе методов и разработке частных методик исследований, проведении лабораторных эксперимен-

тов, выполненных лично автором, разработке технического решения устройства для сушки зерна, получении аналитических зависимостей, анализе полученных данных, написании программ для ЭВМ, подготовке научных публикаций по теме диссертации, выполненных при участии автора.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе три статьи – в изданиях, включенных в перечень ВАК, один патент РФ на полезную модель, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, приложений. Работа изложена на 174 страницах, содержит 37 рисунков, 31 таблицу и два приложения. Список литературы включает 137 наименований.

1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ ЗЕРНА И ПОИСК ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕРНОСУШИЛОК

1.1 Анализ способов и показателей сушки зерна и семян зерновых культур

Существует несколько способов снижения влажности зерна: естественная сушка на открытой площадке, вентилирование атмосферным воздухом, а также искусственная сушка в зерносушилках. При этом известны два базовых метода удаления избыточной влаги. Первый не предусматривает испарения воды, а второй, напротив, основан на её переходе из жидкой фазы в парообразную.

В первой технологии снижение влажности зерна происходит за счёт фильтрации, прессования, центрифугирования влажного зернового материала, а также использования сорбентов – веществ, способных поглощать жидкость. Этот метод называется механическим, или сорбционным. Его главный недостаток – низкая эффективность. Поэтому метод без испарения влаги применяют в тех случаях, когда по каким-либо причинам нагрев зерна недопустим. Например, семена бобовых культур уже при температуре 27 °С начинают трескаться. В связи с этим в данном случае разумнее выбрать именно этот щадящий метод снижения влажности без испарения влаги.

Второй метод снижения влажности зерна предполагает использование процесса испарения лишней влаги. Речь идёт о тепловой сушке, которая включает различные способы: конвективный, кондуктивный (контактный), электрический, радиационный, молекулярный, комбинированный и другие.

Наиболее распространенный способ сушки зерна – конвективный, подразумевающий использование нагретого воздуха или других газов [14, 79, 87, 91]. При этом сушильный агент, проходящий сквозь зерновой слой, насыщается влагой и выводит ее из просушиваемого материала. Воздух в таком случае выступает и как теплоноситель, и как влагопоглотитель. Причём отработанный сушильный агент можно очи-

стить, обезводить и повторно задействовать в технологическом процессе, что особенно ценно в случае использования специфического состава газов.

Следующим по распространённости является кондуктивный, или контактный, способ сушки зерна. В данном случае тепло передается зёрнам непосредственно от нагретой поверхности за счет теплопроводности. Под воздействием высокой температуры из зерновок испаряется влага. Однако у данного способа есть существенные недостатки. Во-первых, он отличается большим расходом топлива, поскольку приходится нагревать огромные площади, обычно изготовленные из металла. Во-вторых, сушка получается неравномерной: ближайший к горячей поверхности слой пересушивается, а удаленный слой остаётся сырым. В результате получается значительная разница во влажности зерна по мере удаления от места нагревания.

Радиационную сушку зерна, при которой тепло передается в виде лучистой энергии (солнечных или инфракрасных лучей), целесообразно применять при небольших объёмах работ и с незначительным избытком влаги [30, 47, 136]. Типичным примером такого способа является нахождение органического продукта под открытым небом. При этом требуется хорошая ясная погода с постоянным ветром. Обычно подобную сушку организывают возле амбаров, рассыпая тонкий слой зерна (толщиной 10...15 см) на твердых покрытиях и прорезая бороздки по направлению движения воздушных потоков. Существенный недостаток такого способа – продолжительность операции, зависящая от погодных условий. Также требуется перевалка зерна, что повышает его повреждение и подразумевает применение ручного труда. Альтернативный вариант – использование искусственных инфракрасных лучей. Однако такой способ обходится чрезвычайно дорого (энергозатраты в 30...70 раз выше, чем при обычной воздушной сушке) и отличается малой производительностью [90].

Электрический способ сушки зерна основан на использовании токов высокой частоты. Его суть заключается в том, что молекулы под воздействием электрического поля поляризуются и начинают совершать колебательные движения. Это приводит к трению между частицами и быстрому нагреву материала. При этом

влаги испаряется и выводится из зоны сушки. Главным достоинством такого способа является быстрое и равномерное нагревание зерна, а также высокая интенсивность влагоотделения. Основным недостатком является огромное потребление электроэнергии, где на каждый килограмм удаленной влаги тратится около 10...12 МДж, и низкая производительность [11, 107].

Молекулярный способ сушки зерна, известный также как сублимация, осуществляется в вакуумных условиях. При этом воздух из камеры откачивается, а зерновая масса охлаждается. Влага, содержащаяся в зерновке, превращается в мелкие ледяные кристаллики, которые выводятся на её поверхность. При последующем нагревании зерна замороженные частицы воды переходят в газообразное состояние. Этот метод идеально сохраняет первоначальный размер, цвет, вкус и аромат продукта, позволяя долго хранить готовый материал. Однако у него есть и недостатки: низкая производительность и высокая стоимость оборудования.

Комбинированный метод сушки зерна сочетает несколько способов, что позволяет достичь максимальной эффективности процесса и нивелировать слабые стороны каждой отдельно взятой технологии. Тем не менее сложное устройство оборудования не всегда оправдывает целесообразность его применения.

Анализ способов сушки зерна показывает, что на современном этапе развития техники конвективный способ является одним из наиболее перспективных, так как имеет равномерный прогрев зерна, высокий КПД, низкое потребление энергии и возможность использования смеси газов.

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение среднего влагосодержания и средней температуры материала при постоянных режимах. Оценка эффективности удаления влаги из зернового материала базируется на трех ключевых показателях: динамике изменения влажности, температуры материала и скорости сушки. Каждый параметр имеет важное значение. Скорость сушки зерна рассчитывается исходя из объема жидкости, испаряющейся за фиксированный временной интервал (например, граммы или килограммы в минуту или час), либо процентного снижения уровня влажности за аналогичный промежуток времени. Про-

процесс изменения влагосодержания зерна при сушке (рис. 1.1) можно представить в виде четырех периодов [23, 24, 55, 85, 95].

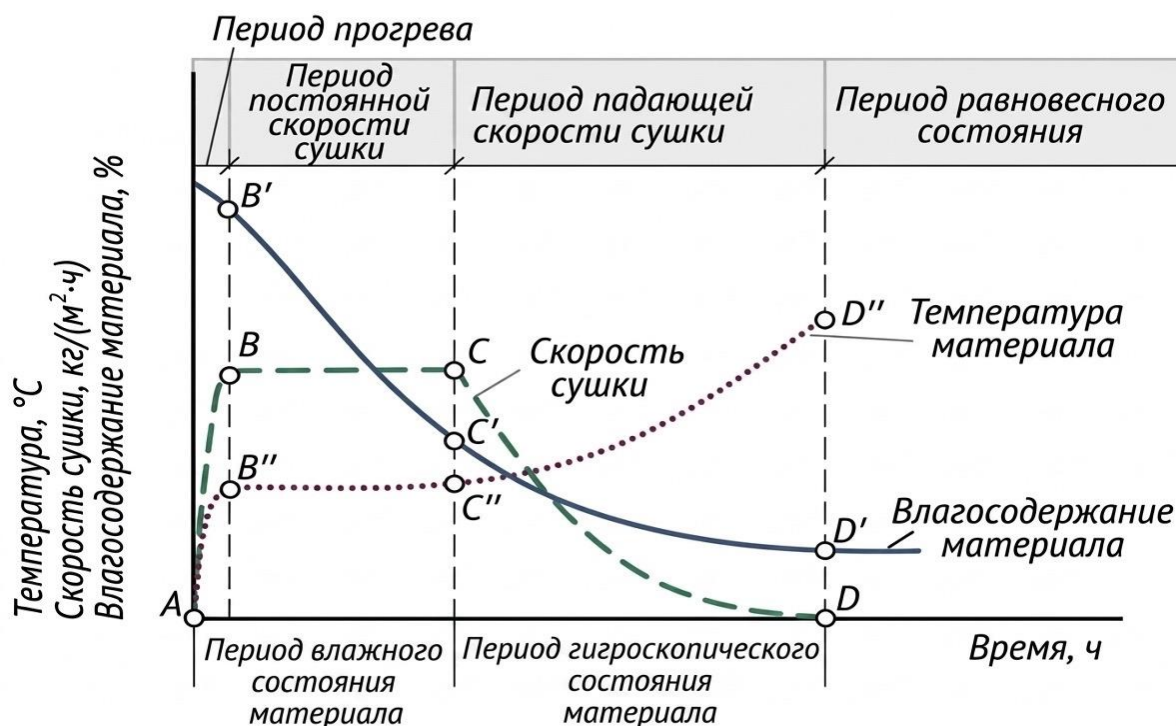


Рисунок 1.1 – Кинетика процесса сушки зерна

Первый период, обозначаемый на графике точками А и В (рис. 1.1), характеризуется быстрым повышением температуры материала (участок А В'). При этом влагосодержание самого материала изменяется слабо, так как основное количество тепла в этот период расходуется на образование пара. Испарение с поверхности зерна компенсируется притоком влаги из внутренних частей по капиллярам, при этом сушильный агент интенсивно насыщается ей и охлаждается. Этот период прогрева длится недолго.

Второй период сушки, отмеченный на графике точками В и С (рис. 1.1), отличается постоянной скоростью удаления влаги. В это время продолжается испарение с поверхности материала, а внутренняя его часть постепенно прогревается. В дальнейшем скорость испарения влаги снижается. Воздух, выходящий из сушилки, становится менее влажным по сравнению с первым периодом сушки. На поверхности зерновки образуются небольшие сухие участки вследствие того, что

в этих местах влага испаряется быстрее, чем поступает из внутренних частей. Скорость сушки теперь зависит от скорости диффузии молекул воды из центра зерна к периферии.

Третий период, обозначенный на графике точками С и D (рис. 1.1), характеризуется убывающей скоростью удаления влаги. В этом случае поверхность семени становится сухой. Из него удалена вся капиллярная влага. При этом температура зерна увеличивается (участок С" D"). Интенсивность испарения влаги резко снижается (участок С' D'), постепенно приближаясь к нулю. Воздух, выходящий из сушилки, содержит минимальное количество молекул воды. На практике сушку редко продолжают до конца этого периода, так как нецелесообразно снижать влажность зерна ниже равновесного состояния. Высушенный материал постепенно охлаждают. При этом влажность зерна немного повышается за счет поглощения влаги из воздуха до равновесного состояния.

При искусственной сушке зерна наиболее распространенными повреждениями являются внутренние или поверхностные трещины, возникающие главным образом вследствие чрезмерно быстрого удаления влаги. Это снижает качество производимой продукции. Предупредить возникновение дефектов можно путем тщательного регулирования температуры теплоносителя и степени уменьшения влажности зерна за каждый цикл сушки. Чрезмерно быстрая дегидратация способна привести к появлению микротрещин в структуре эндосперма. Риск появления таких дефектов повышается при увеличении температуры агента сушки и интенсивности воздушного потока. Дополнительным фактором, провоцирующим появление трещин, служит резкое охлаждение просушенного зерна. Тем не менее вероятность возникновения таких дефектов можно существенно сократить, проводя сушку медленнее и осуществляя постепенное охлаждение нагретого зерна.

Выбор рационального режима сушки зависит от разницы между показателями температуры агента сушки и фактической температурой обрабатываемых зерен. Операторы чаще ориентируются на состояние агента сушки. Хотя именно температура самих зерен оказывает ключевое влияние на их качественные характеристики [40, 56], зависящие от последующего назначения продукта. Температурный режим

различается в зависимости от целевого предназначения зерна: один устанавливается для семенного фонда, другой – для продовольственного зерна.

Под действием горячего воздуха зерно стремительно прогревается, особенно при интенсивном воздушном потоке. Если просушиваемый материал неподвижен, отдельные участки зерновой массы почти мгновенногреваются до уровня окружающей среды. Одновременно воздух, контактирующий с влажным зерном, резко остывает из-за активного испарения влаги. В системах, использующих поперечное движение сушильных потоков, возникают значительные перепады температуры. Поэтому конечный уровень прогрева зерна формируется как средние значения после перемешивания зерновых слоёв при выходе из сушилки.

Уровень влажности зерна играет решающую роль в оценке его качества. Содержание воды критически важно на каждом этапе производственного цикла. Повышенная влажность зерна негативно сказывается на его сохранности, вызывая существенные потери. Содержание влаги также определяет уровень энергозатрат при переработке [1, 16, 59, 77, 92, 120, 121].

Подбор рационального режима сушки, включающий выбор начальных условий нагрева, рабочих температур и интенсивности воздушных потоков, напрямую зависит от исходной влажности зерна [19, 39]. Во многих российских регионах в период уборки наблюдается повышенная влажность зерна. Как следствие, зерносушильные установки не могут гарантированно удалить необходимый объём влаги за один рабочий цикл [9, 29, 54].

Повышение температуры сушильного агента выше установленных норм, которые для семенного и продовольственного зерна различаются, незначительно ускоряет процесс сушки. Это происходит из-за того, что горячий воздух интенсивно удаляет лишь наружную влагу, оставляя внутреннюю неизменной. Медленное перемещение молекул воды из внутренних слоев наружу и последующее ее испарение определяет длительность процесса сушки. Улучшить эффективность и ускорить обмен влаги между сушильным агентом и зерном помогает дополнительное механическое воздействие, такое как регулярное перемешивание зерно-

вой массы в сушильной камере. Это позволяет снять больший процент влажности за один цикл прохождения через сушилку [103].

Таким образом, из представленных методов сушки зерна наиболее перспективным является конвективный способ, поскольку он конструктивно легко осуществим, имеет хорошую равномерность нагрева всех слоев материала и высокий КПД с относительно низким потреблением энергии. Кроме того, можно использовать смесь различных газов, что расширяет возможности операции и улучшает эффективность процесса. Высокая начальная влажность зерна оказывает негативное влияние на интенсивность процесса сушки, увеличивая его продолжительность и расходы на операцию. Для обеспечения сохранности просушиваемых продуктов необходимо постепенное снижение влажности до кондиционных показателей. Минимальные потери зерна обеспечиваются комбинацией умеренной температуры, регулярного перемешивания и точного контроля за уровнем остаточной влаги.

1.2 Особенности конструкций зерносушилок и поиск перспективных направлений их совершенствования

Разнообразие современных зерносушилок обусловлено широким спектром конструктивных решений, вариативностью рабочих режимов, отличиями в организации технологического процесса и другими характеристиками. Классификация устройств для сушки зерна и семян представлена на рисунке 1.2.

По способу нагрева сушильного агента различают установки с паровым обогревом, с топочным блоком, с электронагревателем и комбинированные. В первых воздух нагревается в поверхностных подогревателях с помощью водяного пара под давлением от 3 до 10 атмосфер, достигая температуры 60...145 °С. Если технология требует подачи абсолютно чистого нагретого воздуха в диапазоне 300...350 °С, применяются газовые рекуперативные подогреватели. В них в качестве первичного теплоносителя выступают топочные газы, вырабатываемые спе-

циальной топкой. Если же допустимо незначительное загрязнение высушиваемого материала, то применяют сушку смесью топочных газов с воздухом. Установки с электрическим нагревом сушильного агента в настоящее время применяются только в лабораторных условиях. В случае необходимости применяют зерносушилки с комбинированным нагревом воздушного потока.



Рисунок 1.2 – Классификация устройств для сушки зерна и семян

В зависимости от давления в рабочей камере зерносушильное оборудование делится на две категории: атмосферные и вакуумные сушилки. Первые функционируют в условиях, близких к нормальным. Вторые работают при глубоком разрежении. Преимущество вакуумных сушилок заключается в повышенной интенсивности сушки при низких температурах. Однако такое оборудование сложнее в устройстве и дороже в изготовлении. Атмосферные зерносушилки способны обеспечить сушку с любым уровнем влажности, они не требуют больших финансовых вложений и проще по конструкции. Однако в них наблюдаются неравномерное высушивание и высокие теплотери через ограждающие стенки.

По направлению движения зерносушилки подразделяют на четыре основных вида: проточные, противоточные (рециркуляционные), перекрестные и ре-

версивные. В прямоточных сушилках зерно проходит через сушильную камеру один раз. Данные зерносушилки имеют высокую производительность, снижение потери энергии, полную автоматизацию и систему контроля, но у них возможен неравномерный прогрев материала. Рециркуляционные сушилки отличаются от прямоточных тем, что часть высушиваемого зерна смешивается с сырым материалом и снова направляется на сушку [17, 100]. Это позволяет эффективно снижать влажность зерна даже при высоких исходных значениях [115]. Однако такие сушилки имеют ограниченную максимальную производительность и требуют постоянного контроля за процессом. В перекрестных сушилках движение зерна и воздуха происходит в перпендикулярных направлениях. По мере продвижения через зерновой слой воздушный поток охлаждается, что приводит к различным условиям сушки. Зерно, расположенное ближе к зоне входа воздуха, быстро нагревается до температуры сушильного агента, в то время как удаленные слои остаются ненагретыми. Это приводит к неравномерности сушки. Поэтому зерно необходимо тщательно перемешивать для выравнивания влажности. Сушилки с перекрестным способом сушки являются простыми и экономически эффективными решениями, но отмечается повышенный расход энергии из-за неравномерности нагрева. Работа сушильных аппаратов с реверсивным потоком основана на изменении направления движения сушильного агента относительно высушиваемого сырья. Реверсивные зерносушилки обеспечивают значительную экономию энергии (до 30%) и равномерное высушивание всех слоев зерна. Однако их недостаток заключается в том, что конструкция таких сушилок может быть изменена только путем добавления или уменьшения количества тепловых секций в зависимости от требуемой производительности и уровня влажности сырья.

В зависимости от режима работы зерносушилки подразделяются на два типа: функционирующие непрерывно и действующие периодически. В первом варианте зерно перемещается через сушильную камеру от точки загрузки до места выгрузки, постепенно теряя влагу. При этом параметры сушки остаются неизменными, что обеспечивает стабильный режим работы. Движение зерна может обеспечиваться силой тяжести, механическим воздействием или специальными аэро-

динамическими устройствами. Среди преимуществ непрерывных сушилок выделяют оптимальное использование рабочего объема сушильной камеры, удобство автоматического управления процессом и интеграцию в поточные линии. Вместе с тем некоторые модели характеризуются неравномерным нагревом зерна. В периодически действующих зерносушилках весь объем зерна загружается в рабочую камеру, высушивается до требуемой влажности без перемещения, а затем полностью выгружается. Такие сушилки обычно используются для небольших объемов работ. Периодически действующие зерносушилки подходят для сушки кукурузы в початках и отдельных партий семенного зерна. Они имеют простую конструкцию. Однако у периодических зерносушилок наблюдается простой оборудования в периоды загрузки и выгрузки зерна, потери тепла при прогреве перед каждым новым циклом.

В зависимости от состояния зернового слоя зерносушилки подразделяются на устройства с плотным, гравитационным движущимся (падающий), псевдооживленным и взвешенным слоем. Состояние зерна определяет активную поверхность его контакта с сушильным агентом. Это влияет на интенсивность процесса сушки. Плотный неподвижный слой отличается постоянным взаимодействием между отдельными частицами зерна. Вследствие этого происходит неравномерное распределение влажности по высоте просушиваемого продукта. Формирование гравитационно-движущегося плотного слоя происходит при постоянном поступлении зерна сверху и одновременном отборе снизу сушильной камеры. Это обеспечивает постоянное обновление просушиваемого продукта. Несмотря на относительное перемещение зерен, контакты между ними сохраняются, что допускает применение повышенных температур сушильного агента. Чаще всего подобная схема реализуется в шахтных зерносушилках, оборудованных распределителями воздуха в виде специальных коробов [76, 97]. Во время сушки в псевдооживленном слое сначала происходит разрыхление потока зерна, которое затем переходит в псевдооживленное состояние, а при усилении внешнего воздействия – во взвешенное состояние. При этом уменьшается сопротивление теплообмену и диффузии на границе фаз, что стимулирует процессы теплообмена и влагообмена

[96]. Наряду с высокой эффективностью процесса наблюдаются повышенный износ оборудования из-за активного движения твёрдых частиц. Стоит также учесть возможное неравномерное распределение сушильного агента и зерна из-за интенсивного перемешивания. Для достижения взвешенного состояния зерна в сушилке с восходящим газовым потоком увеличивают скорость подачи газа. В результате весь объем просушиваемого продукта активно взаимодействует с газовой средой, участвуя в обмене теплом и влагой. Подача зернового вороха регулируется загрузочным устройством. Продолжительность пребывания зерна в пневмотрубе весьма короткая – всего несколько секунд. Даже несмотря на высокую температуру сушильного агента (350...400 °С), фактическое снижение влажности зерновой массы оказывается незначительным – порядка долей процента. По этой причине аппараты с использованием взвешенного слоя находят основное применение в составе комплексных многокамерных установок для сушки зерна.

По характеру циркуляции теплоносителя различают сушилки с естественной и искусственной циркуляцией. В первых установках движение сушильного агента внутри рабочей зоны обеспечивается за счёт разницы в плотности газа в разных частях рабочей камеры. В сушилках с искусственной циркуляцией агент сушки движется с помощью струйных насосов-эжекторов, центробежных или осевых вентиляторов, что требует дополнительных энергозатрат для создания необходимого напора воздуха.

По способу удаления влаги зерносушилки подразделяют на конденсационные, с воздухообменом и с химическим поглощением влаги. Сушильные аппараты, где влажный отработанный воздух полностью или частично замещается свежим сухим, принято относить к установкам с воздухообменом. Наряду с этим существуют конденсационные сушилки, функционирующие без воздухообмена, то есть с замкнутой циркуляцией сушильного агента. В таких устройствах поддержание постоянной влажности достигается путем непрерывного осушения циркулирующего воздуха с помощью теплообменников – конденсаторов. Зерносушилки, в которых влага удаляется с помощью химических веществ, таких как хлори-

стый кальций, серная кислота или других гигроскопических веществ, называют зерносушилками с химическим поглощением влаги.

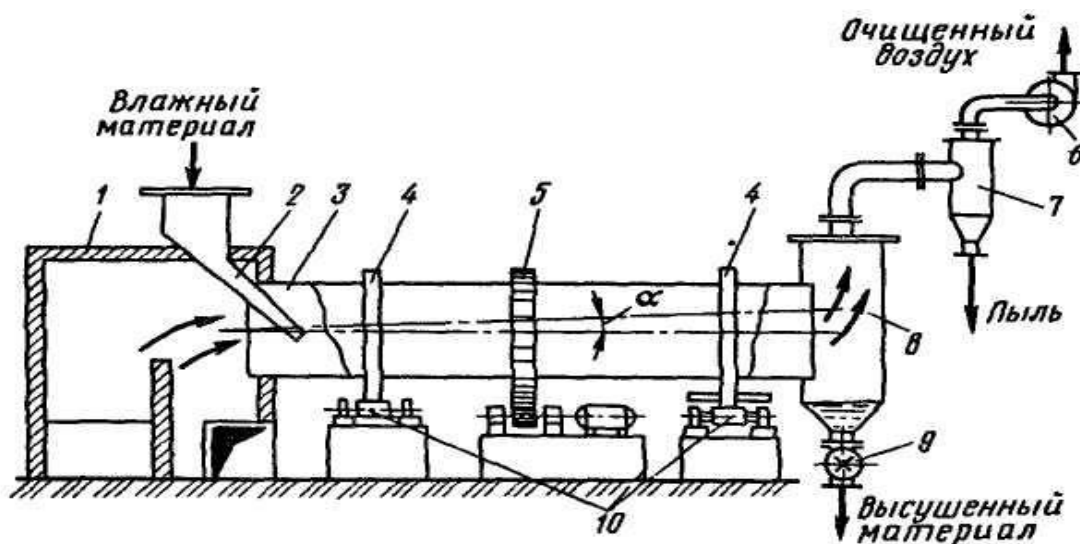
По мобильности зерносушилки делятся на стационарные и передвижные. Стационарные устройства имеют высокую производительность, стабильность работы, широкий набор функций и опций, а также хорошую экономичность расхода топлива и энергии. Вместе с тем они требуют значительных вложений в инфраструктуру и привязаны к одному месту. Мобильные зерносушилки требуют меньших затрат, их можно перевозить, но они менее производительны. В зависимости от специфики хозяйства, задач и условий эксплуатации возможно применение обоих типов. В случае необходимости обработки материала на удаленных или временных участках используют передвижные комплексы. Стационарное оборудование лучше подходит для постоянных производств.

По виду сушильного агента зерносушилки делятся на три типа: воздушные, где агентом сушки является воздух, газовые, работающие на топочных газах, и сушилки, использующие перегретый пар атмосферного давления. Наиболее экономичными считаются сушилки, работающие на перегретом паре, затем идут воздушные и газовые зерносушилки.

По конструктивному типу различают барабанные, ленточные, колонковые, карусельные, башенные, СВЧ, шахтные и жалюзийные зерносушилки.

Барабанные зерносушилки (рис. 1.3) оснащены сушильной камерой, которая представляет собой полый цилиндр, опирающийся с помощью бандажей 4 на ролики 10. Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатую передачу 5 и редуктор. Камера установлена с незначительным уклоном, позволяющим сыпучему материалу перемещаться под действием силы тяжести. Сушилка оснащена теплоизоляцией, а также внутри цилиндра установлены специальные лопасти, предназначенные для перемешивания и разрыхления зерна, что существенно ускоряет процесс сушки. Наиболее распространенным способом перемещения газов и материала является прямоточная схема, поскольку такая организация потоков позволяет минимизировать перегрев сырья благодаря контактированию наиболее разогретого газа с материалом, обладающим высокой влажностью.

Прежде чем попасть в атмосферу, отработавшие газы проходят процедуру очистки от пыли в циклоне 7. Затем эти газы выводятся в атмосферу вентилятором 6, создающим тягу со средней скоростью 2...3 м/с. Часто для снижения потерь теплоносителя концевые участки барабана оснащаются уплотнителями, например лабиринтного типа.



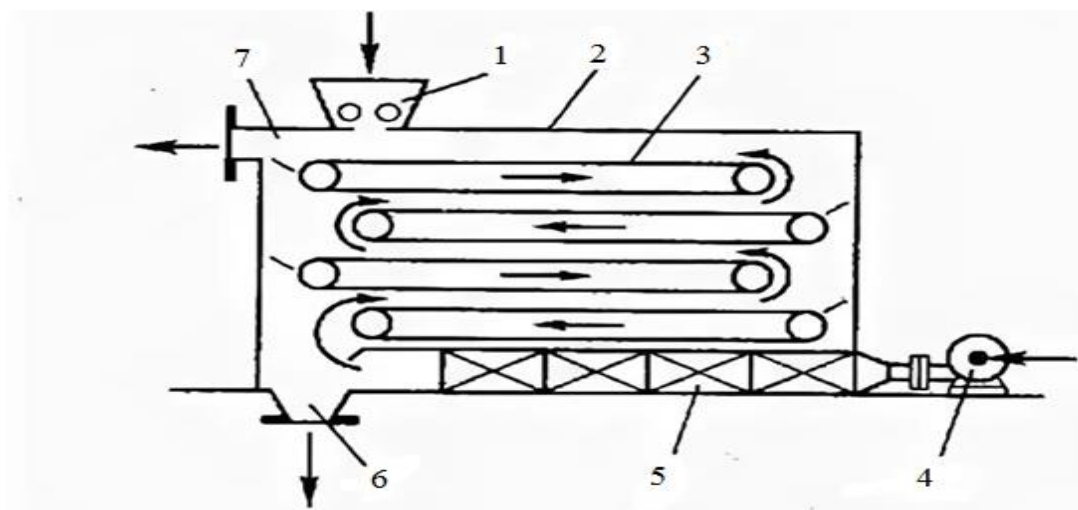
- 1 – топка; 2 – бункер; 3 – барабан; 4 – бандаж; 5 – зубчатое колесо; 6 – вентилятор;
7 – циклон; 8 – приемный бункер; 9 – шлюзовой питатель; 10 – опорные ролики

Рисунок 1.3 – Схема барабанной зерносушилки

К преимуществам барабанных зерносушилок можно отнести то, что они отлично подходят для сушки засоренного зерна, имеющего плохую сыпучесть. Постоянное вращение барабана разрушает сводообразование и делает материал однородным, что способствует равномерной и качественной сушке. Данные зерносушилки высокопроизводительны, компактны и просты в обслуживании. Однако барабанные сушилки не рекомендуются для сушки кукурузы и бобовых, поскольку существует высокий риск повреждения зерна. Среди недостатков также можно выделить высокие инвестиционные затраты и большую продолжительность процесса. При этом скорость передвижения зерна в барабане практически не регулируется.

Ленточные сушилки (рис. 1.4) – это устройства, в которых для транспортировки материала используется лента или конвейер, которые перемещаются вместе

с зерном. Сырой материал загружается на одном конце, а высушенный продукт удаляется с другого конца. Процесс сушки осуществляется путем воздействия горячего воздуха или топочных газов, которые движутся противотоком или поперечно направлению перемещения материала. Благодаря непрерывной работе такие сушилки часто интегрируются в производственные линии, обеспечивая последовательную обработку материала.

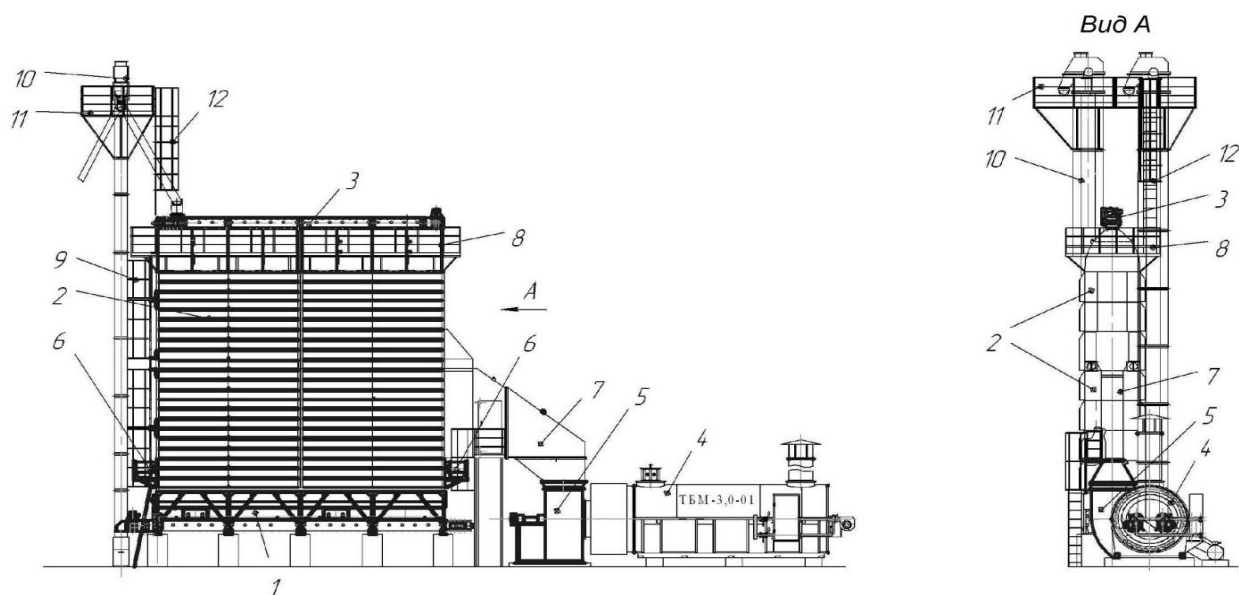


1 – загрузочная воронка; 2 – корпус сушилки; 3 – транспортерная лента; 4 – вентилятор;
5 – калорифер; 6 – выгрузная воронка; 7 – газоход

Рисунок 1.4 – Схема ленточной зерносушилки

Преимуществом ленточных сушилок является хорошая равномерность сушки за счет перемешивания продукта при переходе с одной ленты на другую и прохождения сушильного агента через слой материала. Однако такие зерносушилки имеют ряд недостатков: они громоздки, сложны в обслуживании, у них низкая производительность, высокие удельные потери тепла [48, 84].

Конструкция колонковых зерносушилок (рис. 1.5) представляет собой спаренные прямоугольные колонки с перфорированными стенками. Конструкции различных производителей имеют схожее строение. Колонковые зерносушилки состоят из загрузочного устройства 3, сушильной секции 2, топочного блока 4 с теплообменником, вентиляторов 5 и 6, выгрузной механизм с транспортёром 1, патрубков, системы управления с комплектом датчиков, лестниц с площадками обслуживания и т.д.



1 – выгрузной механизм; 2 – сушильная камера; 3 – загрузочное устройство;
4 – топочный блок; 5 – вентилятор сушки; 6 – вентилятор охлаждения; 7 – патрубок подвода
теплоносителя; 8 и 11 – площадки обслуживания; 9 и 12 – лестницы; 10 – нория

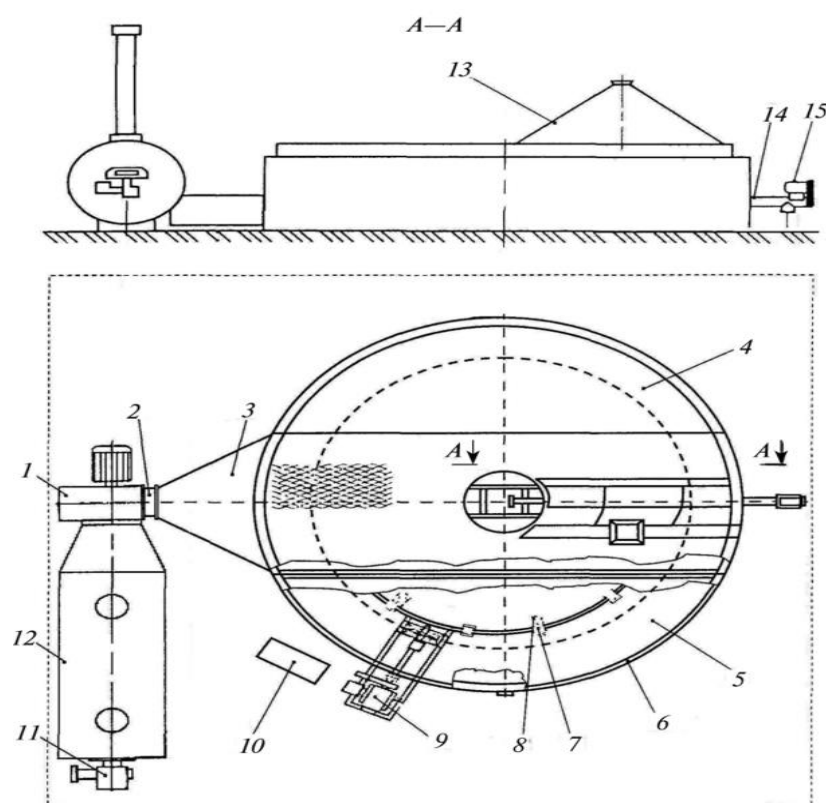
Рисунок 1.5 – Схема колонковой зерносушилки

Принцип действия зерносушилок данного типа состоит в том, что пространства между перфорированными колонками, которые заполнены зерном, служат распределительными воздуховодами, через которые поступает подогретый в топочном блоке воздух. Сушильный агент, проходя через зерновой слой, увлекает за собой влагу. Отработанный влажный воздух выдувается через противоположную перфорированную стенку, либо уходя на рекуперацию, либо выбрасывается в атмосферу.

К недостаткам колонковых зерносушилок можно отнести: сложность обслуживания, ремонта и очистки за счет того, что загрузка зерна осуществляется на значительной высоте. Производительность таких установок зависит от количества секций и максимальной температуры сушильного агента, что может приводить к перегревам и пожарам. Помимо этого, агент сушки подается поперечно, что приводит к неравномерной сушке без перемешивания зерна. Засыпать в такие зерносушилки сырье с влажностью выше 25% категорически запрещено, так как это неизбежно приведет к спеканию и образованию заторов, увеличивая риск возго-

рания. Однако они имеют некоторые преимущества, такие как низкая металлоёмкость и быстрый срок монтажа.

Карусельная зерносушилка (рис. 1.6) получила своё название благодаря принципу работы: зерно просушивается на карусельной вращающейся платформе 4, которая движется по кругу. По своему устройству такие зерносушилки схожи с барабанными, но с упрощенной конструкцией, где перемещение сырья происходит горизонтально, а не вертикально. Отказ от наклонного вращающегося барабана позволил исключить из конструкции сложные опорно-приводные узлы и систему многократного подъема зерна, существенно снизив металлоёмкость и энергозатраты на привод. Данное техническое решение обеспечивает снижение травмируемости зерновки и повышает равномерность влагосъёма, что особенно значимо при подготовке семенного материала.

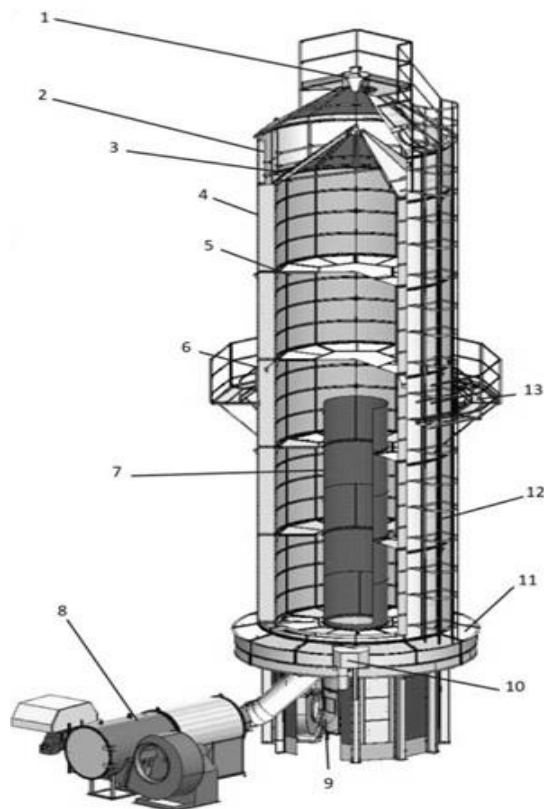


- 1 – вентилятор; 2 – шибер; 3 – воздуховод; 4 – сушильная камера; 5 – поворотная платформа;
 6 – рама; 7 – упорные ролики; 8 – опорные ролики; 9 – привод поворотной платформы;
 10 – пульт управления сушилкой; 11 – горелка; 12 – топочный блок; 13 – питатель;
 14 – разгрузочное устройство; 15 – привод выгрузного устройства

Рисунок 1.6 – Схема карусельной зерносушилки

Технологический процесс работы начинается с подачи влажного зернового вороха любым наклонным транспортёром в загрузочную горловину сушильной камеры. При этом зерно равномерно распределяется по всему объёму благодаря вращающейся платформе. Далее зерновой слой через решетчатые стенки камеры продувается воздушным потоком, подогретым в теплогенераторе. Нагрев зерна происходит по мере его опускания вниз, так как одновременно происходит и разгрузка зерносушилки. Воздушный поток, пронизывающий зерновой слой, увлекает за собой избыточную влагу и поднимается вверх, остывая. За счёт этого новая партия загружаемого влажного зерна подогревается постепенно, не испытывая температурного стресса. По мере движения вниз температура теплоагента увеличивается. К моменту достижения дна камеры зерно должно достигнуть требуемых кондиций по влажности, которая определяется поточным влагомером. В конечном итоге зерно, достигшее требуемой влажности, выгружается из зерносушилки, а такой же объём сырого зернового вороха автоматически поступает на загрузку. Процесс сушки в карусельной зерносушилке считается одним из самых неравномерных, что негативно сказывается на качестве зернового материала. Особенно заметно это при сушке сложных культур, таких как рапс, бобовые, подсолнечник, клевер, семена кормовых и лекарственных трав, где сушилка не способна обеспечить необходимые параметры готового продукта. Посевные свойства семян после такой сушки значительно ухудшаются. Хотя агрегат способен функционировать в непрерывном поточном режиме, обеспечивая одновременную загрузку, сушку и выгрузку сырья, эта устаревшая технология нивелирует многие преимущества. Карусельную сушилку необходимо устанавливать под навесом, так как у неё отсутствует собственная крыша, что влечет за собой дополнительные расходы. Ещё одним серьезным недостатком является низкая производительность из-за тонкой укладки сырья, что делает эту установку неэффективной для средних и крупных хозяйств. Карусельные сушилки имеют и некоторые преимущества, к которым можно отнести низкую стоимость оборудования, простоту монтажа и низкую пожароопасность.

Башенные зерносушилки (рис. 1.7) работают по принципу большинства поточных зерносушилок: влажный продукт загружается сверху, а после прохождения через установку снизу уже выходит сухим и охлажденным.



- 1 – направитель потока зерна; 2 – накопитель зерна; 3 – внутренняя крыша;
 4 – кольцевое зерновое пространство; 5 – внутренняя обслуживающая площадка;
 6 – пассивный перемешиватель зерна; 7 – воздуховод-смеситель; 8 – теплогенератор;
 9 – основной вентилятор; 10 – привод отборщика; 11 – отборщик зерна;
 12 – лестница; 13 – площадка обслуживания

Рисунок 1.7 – Схема башенной зерносушилки

Башенная зерносушилка работает следующим образом: увлажненное зерно подается через люк в верхней части аппарата на наклонные перфорированные пластины, равномерно распределяясь по объему сушильной камеры. Одновременно вентилятор засасывает атмосферный воздух и подаёт его в горелку для нагревания. Горячий воздух вместе с продуктами горения устремляется вверх, проникая сквозь отверстия сетки и пропуская через себя слой зернового материала, удаляя лишнюю влагу. Отработанный сушильный агент возвращается в техно-

логический процесс. Гравитация заставляет зерно двигаться вниз, где его перемешивание обеспечивается ворошителями. Специальные дозирующие механизмы разгрузочной системы управляют скоростью движения зернового потока. Высушенное зерно через отверстие в дне зерносушилки выгружается в транспортную линию.

Преимуществом башенной зерносушилки является низкая вероятность забивания высушиваемого продукта, так как в ней отсутствуют наклонные плоскости, на которых могла бы происходить задержка. Ещё одним достоинством является отсутствие открытого огня, что почти полностью исключает вероятность возгорания. Однако зерносушилкам башенного типа присуща неравномерность влагоудаления, что приводит к пересушиванию зерна в одних зонах и к недосушиванию в других. Этот эффект объясняется тем, что теплоноситель, изначально имеющий температуру выше, чем у зерна, при прохождении через влажный слой охлаждается и увлажняется. Этот процесс продолжается на протяжении всей высоты сушки. Чтобы минимизировать проблему, можно снизить температуру теплоносителя до критического уровня для зерна, но это увеличит время сушки.

СВЧ-зерносушилки появились сравнительно недавно и пока носят преимущественно экспериментальный характер. Тем не менее уже создано немало образцов подобных устройств (рис. 1.8), работающих на принципе воздействия микроволновых волн сверхвысокочастотных токов.



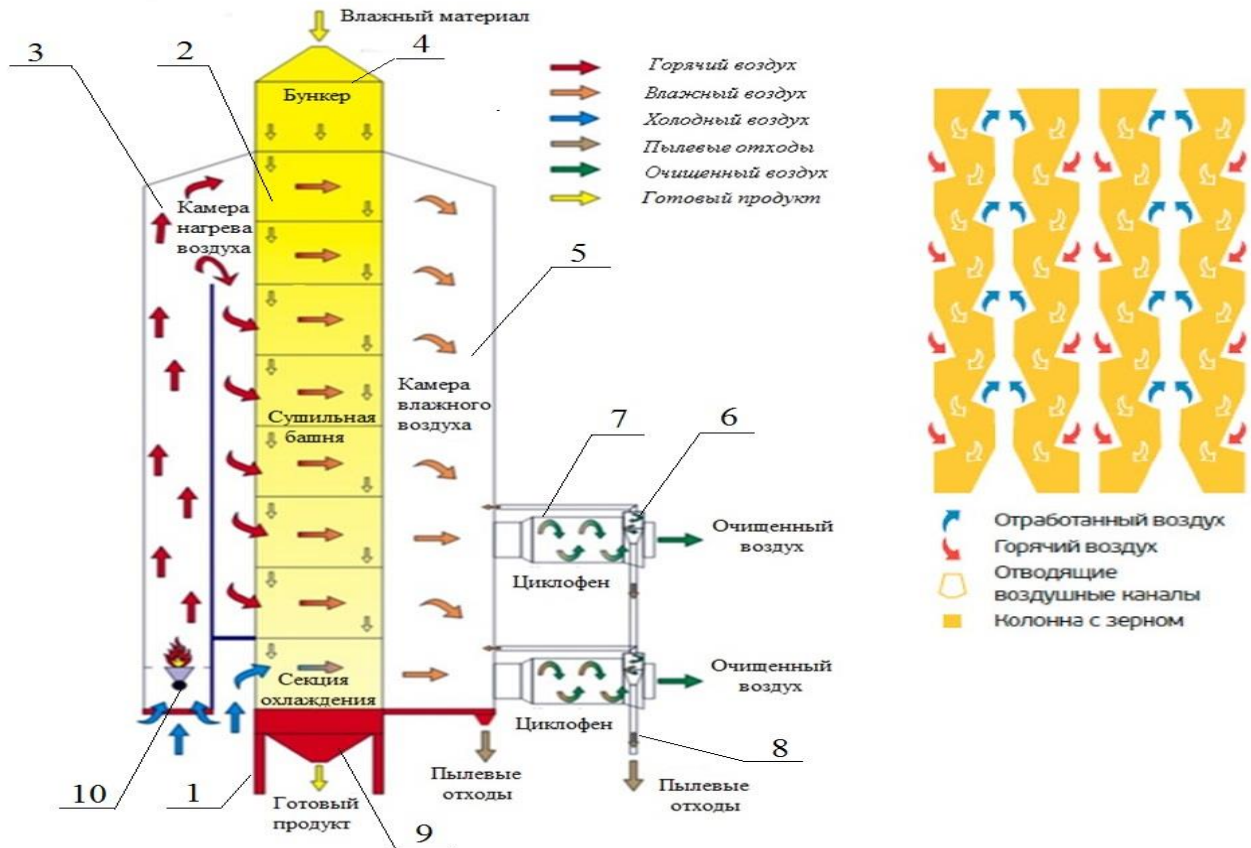
а – Микроволновая установка «Родник»; б – Универсальный СВЧ-модуль СМ-5

Рисунок 1.8 – СВЧ-зерносушилки

Конструктивно СВЧ-зерносушилка включает в себя загрузочный бункер, рабочую камеру, имеющую активную зону микроволнового излучения, магнетрон, блок управления, разгрузочное устройство, систему вентиляции. Важно отметить, что производительность подобного оборудования невысока. Технология работы СВЧ-зерносушилки построена следующим образом: изначально влажное зерно подаётся конвейером в загрузочный бункер, откуда оно самотёком поступает в рабочую камеру, где обрабатывается мощным электромагнитным полем сверхвысоких частот. Воздействие микроволн вызывает быстрый внутренний нагрев зерновок, инициирующий активный переход влаги из внутренних слоев на поверхность зерна. Дальнейшее движение зерна осуществляется естественным образом, под действием силы тяжести, при этом избыток влаги принудительно удаляется системой вентиляции, нормализуя температуру зернового материала до температуры внешней среды. В конечном итоге просушенное сырьё поступает на выгрузку. Автоматизированная система контролирует производительность установки и необходимый процент снятия влаги. Компактные размеры СВЧ-сушилок обеспечивают возможность монтажа даже в помещениях зерноочистительных агрегатов ЗАВ. Отличительной чертой СВЧ-технологии является то, что проникновение температуры внутрь зерна происходит не с его поверхности, а изнутри за счёт увеличения скорости движения молекул, которое вызвано воздействием электромагнитных волн СВЧ [32]. К недостаткам можно отнести большой расход электроэнергии, малый ресурс магнетронов, необходимость монтажа внутри зданий, вредное влияние на обслуживающий персонал, невысокую производительность. Однако СВЧ-зерносушилки имеют некоторые преимущества. К ним можно отнести равномерный прогрев зерна, отсутствие продуктов сгорания, простоту монтажа и низкую пожароопасность.

Жалюзийные зерносушилки (рис. 1.9) относятся к категории шахтных сушилок и выделяются уникальной конструкцией сушильной камеры, оснащённой несколькими параллельно расположенными колоннами прямоугольного сечения, продольные стенки которых представляют собой жалюзи. Такая конфигурация обеспечивает особое расположение зернового слоя, гарантирующее достаточное

давление для беспрепятственного продвижения зерна без образования заторов. Технологический процесс сопровождается зигзагообразным перемещением зерен внутри колонны, что обеспечивает активное перемешивание и максимальный контакт с циркулирующим горячим воздухом. За счёт этого достигается равномерное прогревание зерновой массы и существенно сокращается риск возгорания в зерносушилке.



- 1 – рама; 2 – сушильная башня; 3 – камера горячего воздуха; 4 – загрузочный бункер;
 5 – камера влажного воздуха; 6 – вентилятор; 7 – циклофен; 8 – система сбора пыли;
 9 – система разгрузки, 10 – горелка

Рисунок 1.9 – Технологический процесс жалюзийной зерносушилки

Основными недостатками жалюзийных зерносушилок являются их высокая стоимость, дороговизна монтажа, вынос потоком отработанного воздуха части легковесного зерна. Однако такие установки имеют значительные преимущества: универсальность зерносушилки, которая позволяет проводить сушку различных культур, высокую экономичность процесса на тонну просушиваемого продукта,

хорошую равномерность нагрева зерна, которая обеспечивает сохранность качества, высокую производительность и низкую пожароопасность.

Наибольшее распространение получили шахтные прямоточные зерносушилки непрерывного действия (рис. 1.10). Они состоят из вертикальных шахт прямоугольного сечения, загрузочного и выгрузного бункеров, транспортирующего оборудования, тепловентиляционной системы, пылеочистительных устройств, приборов для дистанционного контроля и автоматического регулирования процесса сушки. Шахтные зерносушилки могут включать одну или несколько сушильных камер, работающих параллельно или последовательно.

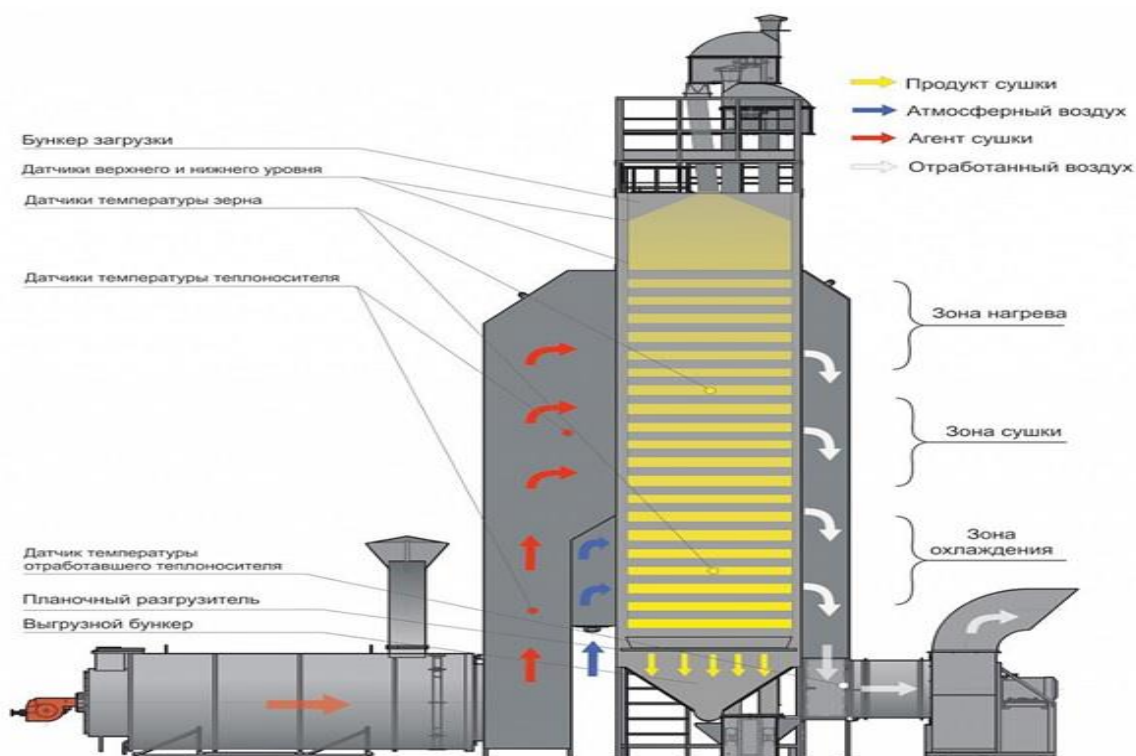
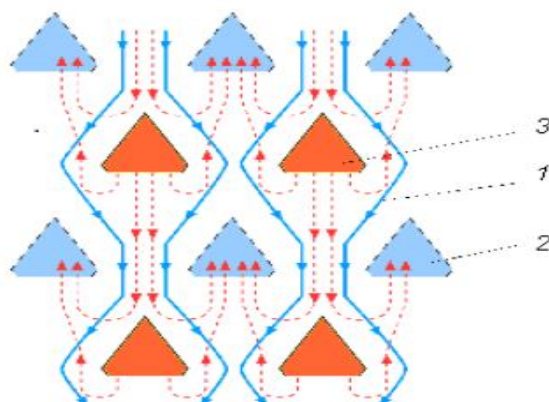


Рисунок 1.10 – Технологический процесс работы шахтной зерносушилки

Принцип работы шахтной зерносушилки следующий: предварительно очищенный зерновой материал посредством норрии направляется в загрузочный бункер, откуда попадает непосредственно в шахту 1 (рис. 1.11). Через подводящие коробка 3 в зерновой ворох равномерно поступает подогретый воздушный поток, создаваемый вентилятором. Во время движения зерна внутри шахты оно взаимодействует с нагретым воздухом, вначале подвергаясь предварительному нагреву. Такой подход позволяет минимизировать риск термического удара и предотвратить

формирование сухой корки на поверхности вороха. Затем интенсивность нагрева возрастает до значения, необходимого для эффективного выделения молекул воды, которые перемещаются от центра зерновки к её поверхности. Поток нагретого воздуха, пронизывая слой зерна, эффективно выводит избыточную влагу. Над каждым рядом подводящих воздух коробов 3 находится ряд отводящих коробов 2, в которые засасывается отработанный влажный воздух и далее выносится в циклоны или в атмосферу. Двигаясь сверху вниз, зерновой материал достигает нижней области сушилки, где он дополнительно продувается холодным воздухом, остывая до температуры окружающей среды. После охлаждения высушенное сырье направляется в зону выгрузки, откуда поступает на дальнейшую обработку или временно размещается в накопительном бункере. Длительность нахождения зерновой массы в шахтной сушилке регулируется разгрузочным устройством.



1 – шахта с зерном; 2 – отводящие короба; 3 – подводящие короба

Рисунок 1.11 – Технологический процесс сушки зерна в шахте зерносушилки

Исследование конструктивных особенностей и технологического процесса шахтных зерносушилок свидетельствует о том, что их достоинствами являются низкий уровень шума, равномерное распределение горячих воздушных потоков по всей шахте, теплоизоляция шахты для минимизации расхода тепловой энергии, универсальность оборудования, хорошая равномерность нагрева зерна и высокая производительность. Благодаря наличию специальных коробов возможна сушка большого объема материала, причем процесс испарения влаги идет непрерывно. Таким образом, температура зерна в сушилке всегда ниже, чем у сушильного

агента, что позволяет нагревать его сильнее, не опасаясь ухудшения его свойств. Однако у шахтных зерносушилок есть свои недостатки: ограниченная степень удаления влаги за один цикл (4...6%) и, как следствие, значительное падение производительности при работе с высоковлажным зерновым ворохом, значительные расходы на строительство, которые обусловлены необходимостью возведения капитальных сооружений и большими затратами на монтажные работы.

Таким образом, анализ преимуществ и недостатков различных конструкций зерносушилок показал, что наиболее перспективными для сушки зерна и семян зерновых культур являются шахтные типы сушилок, поскольку они имеют высокую производительность, простоту конструкции, равномерный прогрев зерна, обеспечивают достаточным количеством тепла для достижения нужного уровня влажности зерна без его перегрева, относительно невысокие энергетические затраты, самотечность технологического процесса и возможность дальнейшего совершенствования.

1.3 Интенсификация процесса сушки зерна посредством применения озонозвоздушной смеси

Развитие агропромышленного сектора диктует необходимость постоянного совершенствования применяемых технологий. Одним из перспективных методов современной обработки зерна является озонирование, которое, несмотря на свое широкое распространение в западных странах, пока еще недостаточно востребовано среди российских аграриев [125]. Примечательно, что озон сертифицирован и признан Министерством здравоохранения и социальных служб США эффективным средством дезинфекции, разрешенным к применению без каких-либо ограничений [22, 124].

Аллотропная модификация кислорода, известная как озон, представлена молекулой, содержащей три атома, и обозначается химической формулой O_3 . При обычных условиях озон представляет собой газ с характерным специфическим

запахом, послужившим причиной его названия. Корень слова происходит от древнегреческого термина «ὄζον», означающего «пахнуть». Впервые термин «озон» ввел немецкий учёный Христиан Фридрих Шейнбейн в 18 веке [80]. К достоинствам газа относят сильную окислительную активность, способность устранять загрязнения воздуха, безопасность для обработанных материалов ввиду отсутствия образования токсинов в обрабатываемом продукте, а также мощное антисептическое, противовирусное, антимикробное и антигрибковое действие, уничтожающее широкий спектр патогенных микроорганизмов, включая бактерии, вирусы и грибки [3, 33, 34, 45, 46, 126]. Современные достижения науки и техники привели к созданию недорогих, надёжных и компактных озонаторов, открыв новую эру в развитии озонных технологий и расширив перспективы их использования [15, 50, 61, 82, 102, 105, 106, 112, 119, 122, 123, 127, 128, 129, 130, 131, 137].

Озоновоздушная обработка интенсифицирует процесс сушки зернового вороха [4, 5, 12, 35, 38, 52, 71, 104, 111, 117]. При этом воздействие газа на зерно можно разбить на три этапа. Первоначально озон вступает в реакцию с органическими компонентами на поверхности зерновки, способствуя выведению избыточной влаги путем ориентации молекул воды вокруг атомарного кислорода. Это активирует массоперенос воздушным потоком. На следующем этапе озон повышает проницаемость клеточных мембран, инициируя структурные изменения в тканях. Это усиливает перемещение влаги из внутренних слоёв к поверхности зерна. На заключительном этапе происходит дестабилизация сорбционно-связных молекул воды вследствие ослабления дипольных связей [44, 66]. Благодаря этому длительность сушки сокращается, расход энергии уменьшается на 15...20%, а объем влаги, отводимой за один проход зерновой массы через зерносушилку, существенно увеличивается [58]. Так, в опытах с зерном ячменя сорта «Скорород» использование озоновоздушной смеси с концентрацией озона 2,4 мг/м³ и 8,2 мг/м³ позволило сократить время сушки на 1...1,5 часа по сравнению с нагревом обычного атмосферного воздуха [117]. На всём протяжении пятичасового исследования скорость потери влаги при обработке озоном была выше, чем при классическом методе. При этом повышение концентрации озона существенно не оказало влияния на ин-

тенсивность процесса. Кроме того, подача озонозоооздушной смеси в бункеры активного вентилирования типа БВ-40 ускорила достижение нормативной влажности зерна в 1,2 раза [117].

В одном из исследований сушильный агент нагревали до 20...24 °С, поддерживая его относительную влажность на уровне 53...60%. В ходе исследования использовалась озонозоооздушная смесь с концентрацией озона от 1 до 11 мг/м³ и постоянным напором 50 Па [68]. Для сравнения был организован контрольный эксперимент в тех же условиях, но с подачей обычного атмосферного воздуха без озона. Сушку осуществляли в перфорированных лотках, где толщина слоя исследуемого зерна достигала 10 см, а общая масса – 1,5 кг. Испытание проводили на четырех культурах – пшеница, рожь, ячмень и овёс, причём исходная влажность каждого образца была одинаковой и составляла 30%. Полученные данные эксперимента представлены на рисунке 1.12 [68].

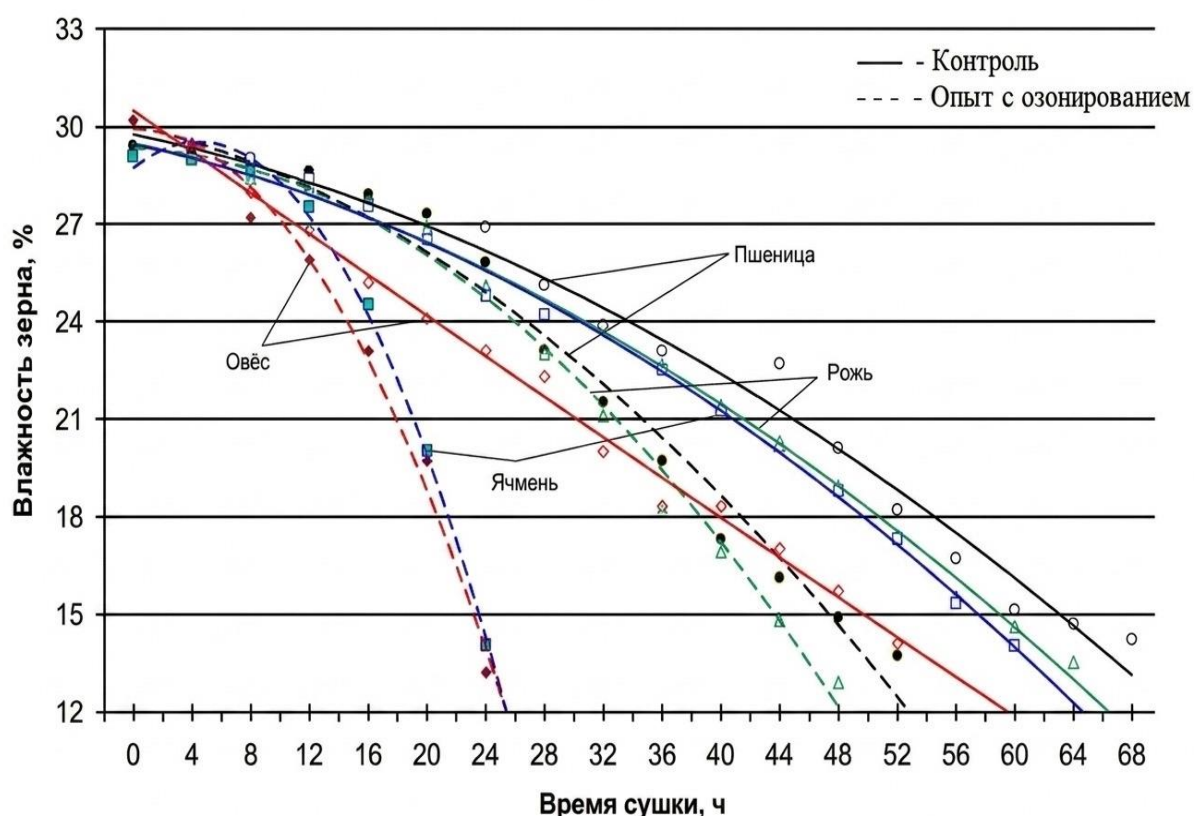


Рисунок 1.12 – Снижение влажности зерна во времени при вентилировании озонозоооздушной смесью и воздухом

Анализ рисунка 1.12 показал, что применение озонозооозушной смеси для вентилярования исследуемых культур существенно сократило время достижения ими кондиционной влажности. Следует подчеркнуть, что интенсивность воздействия газа зависела от конкретной культуры: быстрее всего достиг заданных параметров овёс, тогда как пшенице потребовалось большее время при равных концентрациях озона в пределах 2...11 мг/м³. Эти различия могут объясняться индивидуальными структурными особенностями зерна различных видов, а также неодинаковой степени озона проникать внутрь зерновок. Стоит также отметить, что в первые часы эксперимента разница в скорости сушки между зерном, обработанным озоном, и обычным была незначительной и находилась в пределах погрешности измерений. Заметное изменение влажности начиналось после того, как зерновая масса насыщалась озоном. У овса этот эффект наступал через 8 часов вентилярования, у ячменя – спустя 12 часов, у пшеницы – после 24 часов, а у ржи – через 28 часов. Такая задержка связана с внутренним строением каждой зерновки, которое влияет на скорость диффузии озона и общую результативность озонирования. В результате применение озонозооозушной смеси позволило существенно сократить время достижения кондиционной влажности. Наибольший эффект зафиксирован для ячменя (сокращение на 36 часов, или на 58%) и овса (на 28 часов, или на 52%). Для пшеницы и ржи время обработки сократилось на 14 часов, что соответствует ускорению процесса на 20%.

Полученные данные по снижению влажности зерна $W_{з.к.}$ в зависимости от длительности вентилярования t можно описать с помощью квадратичной полиномиальной функции:

$$W = k_1 \cdot t^2 + k_2 \cdot t + k_3, \quad (1.1)$$

где W – влажность зерна, %;

t – время вентилярования, ч;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты уравнения регрессии.

На основании исследований, проведенных Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко и Т.П. Троцкой [109], были получены соответствующие зависимости, которые приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Зависимости изменения влажности зерна W от времени вентилирования t

Культура	Вид опыта	Зависимость	R^2
Пшеница	Контроль	$W_{\text{пш. конт}} = -0,0346t^2 - 0,3217t + 30,107$	0,9864
	Озонирование	$W_{\text{пш. озон}} = -0,0714t^2 - 0,2802t + 30,366$	0,981
Рожь	Контроль	$W_{\text{рожь конт}} = -0,0381t^2 - 0,3465t + 29,879$	0,9961
	Озонирование	$W_{\text{рожь озон}} = -0,111t^2 - 0,1209t + 29,308$	0,9912
Ячмень	Контроль	$W_{\text{ячм. конт}} = -0,0422t^2 - 0,3139t + 29,81$	0,9962
	Озонирование	$W_{\text{ячм. озон}} = -0,6405t^2 + 2,7167t + 26,614$	0,9959
Овес	Контроль	$W_{\text{овес конт}} = -0,0019t^2 - 1,2744t + 31,752$	0,9946
	Озонирование	$W_{\text{овес озон}} = -0,4464t^2 + 0,9036t + 29,429$	0,9892

$W_{\text{культура конт}}$ – влажность зерна данной культуры в контрольном опыте, %;

$W_{\text{культура озон}}$ – влажность зерна данной культуры при вентилировании озоновоздушной смесью, %;

R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации.

Наблюдается определенная закономерность в изменении численных значений коэффициентов при замене традиционного способа вентилирования зерна подогретым воздухом на сушку с использованием озоновоздушной смеси. Так, коэффициент k_1 в контрольных условиях без озонирования варьируется в пределах $-0,0422 \dots -0,0019$. Применение озоновоздушной смеси в качестве сушильного агента уменьшает этот коэффициент в $0,004 \dots 0,48$ раз. Коэффициент k_2 , напротив, возрастает при сушке зерна с применением озона по сравнению с контрольными образцами. Постоянная составляющая уравнения k_3 при озонировании обычно уменьшается либо остается практически неизменной [9].

Эксперименты с зерном тритикале показали, что сушка в зерносушилках протекает значительно быстрее (рис. 1.13), благодаря значительно более высокой температуре теплоносителя по сравнению с обычным вентилированием. Исходное зерно с влажностью 29% было доведено до кондиционного состояния в зерносу-

шилке за шесть часов. Использование озонозвоздушной смеси позволило сократить продолжительность процесса на 2 часа [109].

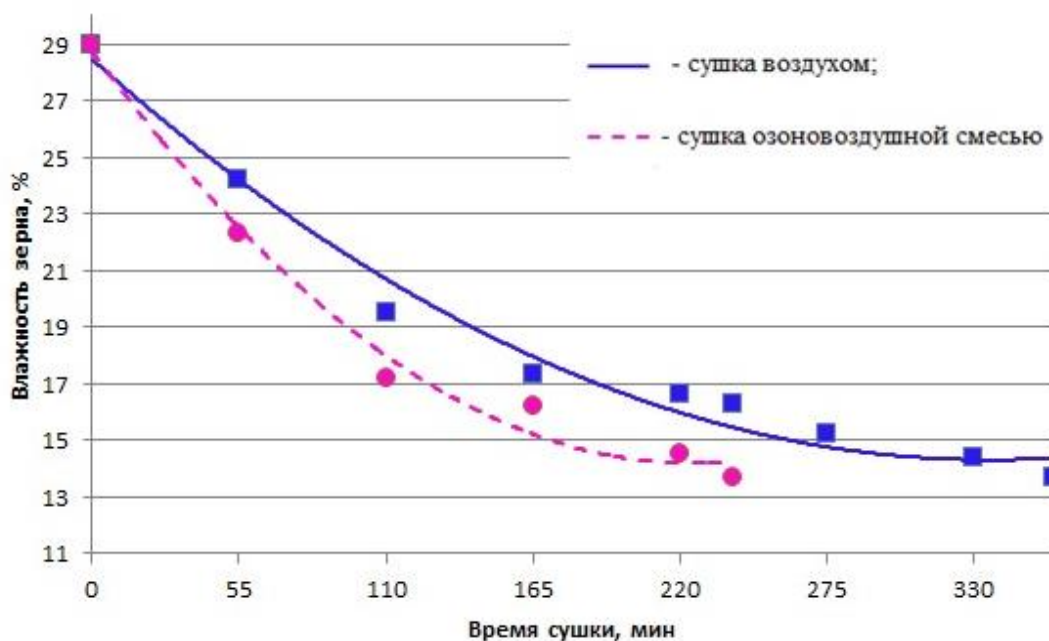


Рисунок 1.13 – Снижение влажности зерна тритикале во времени при сушке озонозвоздушной смесью и воздухом

Хотя динамика сушки в зерносушилках тоже описывается полиномиальной зависимостью (1.1) второй степени, значения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 приобретают другие значения (табл. 1.2). Для повышения достоверности расчетов требуются дополнительные исследования, направленные на детальное изучение влияния озонозвоздушного агента на эффективность процесса сушки, а также расширение круга рассматриваемых факторов.

Таблица 1.2 – Зависимости изменения влажности зерна тритикале от времени сушки t

Культура	Вид опыта	Зависимость	R^2
Тритикале	Контроль	$W_{\text{трит}}^{\text{конт}} = 0,3106t^2 - 4,6594t + 32,05$	0,94
	Озонирование	$W_{\text{трит}}^{\text{озон}} = 0,8732t^2 - 8,8639t + 36,43$	0,98

Зависимость скорости сушки зерна от содержания озона в сушильном агенте представлена на рисунке 1.14.

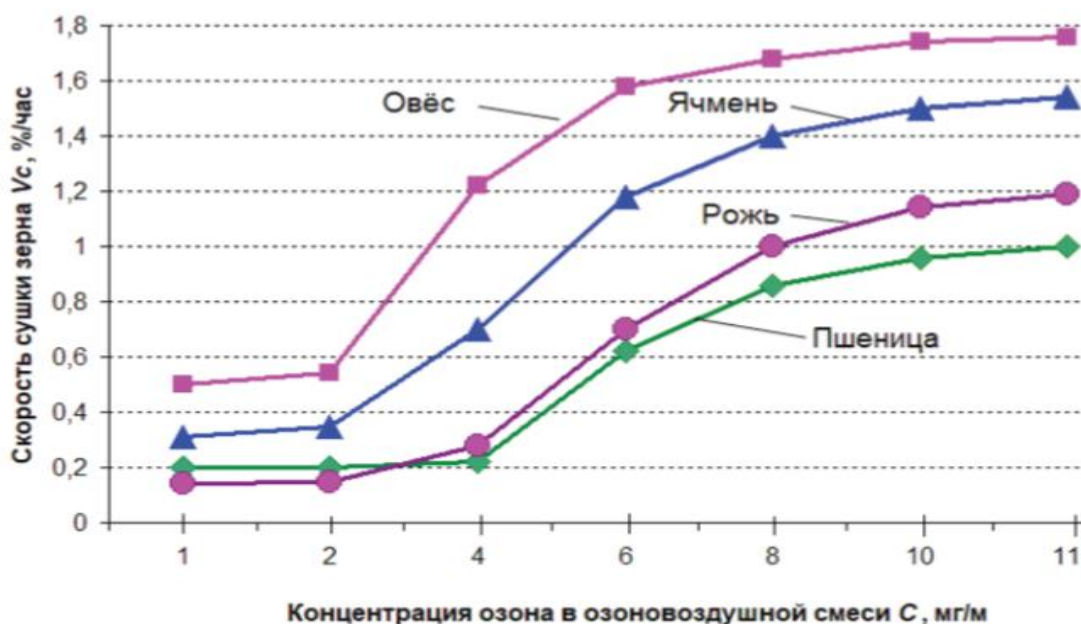


Рисунок 1.14 – Влияние концентрации озона в сушильном агенте на скорость сушки зерновых культур

Представленные на рисунке. 1.14 [109] кривые, отражающие изменение скорости сушки зерновых культур в зависимости от концентрации озона в смеси, аппроксимируются полиномами третьей степени. В таблице 1.3 [109] приведены результаты математической обработки опытных данных, полученных Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко и Т.П. Троцкой.

Таблица 1.3 – Зависимости изменения скорости сушки v_c от концентрации озона C в озоновоздушной смеси

Культура	Зависимость	R^2
Пшеница	$v_c^{\text{пш}} = -0,0167 C_{O_3}^3 + 0,2033 C_{O_3}^2 - 0,5471 C_{O_3} + 0,5686$	0,9809
Рожь	$v_c^{\text{рожь}} = -0,0183 C_{O_3}^3 + 0,2201 C_{O_3}^2 - 0,5437 C_{O_3} + 0,4829$	0,9935
Овес	$v_c^{\text{овес}} = -0,0111 C_{O_3}^3 + 0,089 C_{O_3}^2 + 0,1359 C_{O_3} + 0,2086$	0,9541
Ячмень	$v_c^{\text{ячм}} = -0,017 C_{O_3}^3 + 0,1856 C_{O_3}^2 - 0,2986 C_{O_3} + 0,4086$	0,9868

$v_c^{\text{культура}}$ – скорость сушки зерна данной культуры, % / ч.

C_{O_3} – концентрация озона, мг/м³.

Сравнение полученных математических зависимостей показывает, что диапазоны изменения переменных близки между собой. Это позволяет предположить, что при дальнейшем накоплении экспериментальных данных может проявиться общая для всех случаев закономерность. Тем не менее, для построения точной модели, отражающей специфику каждой отдельной культуры, потребуется введение индивидуального поправочного коэффициента. Его численное значение можно определить только эмпирическим путем, по результатам многочисленных исследований.

Согласно исследованиям А.В. Голубковича и А.Г. Чижикова [26, 71], энергоэффективность сушки можно повысить за счет изменения режима озонирования. Они рекомендуют увеличить температуру сушильного агента до 35...40 °С и применять озонирование исключительно на этапе, когда влажность зерна находится в пределах 16...22%. Расчетная экономия энергии при таком подходе оценивается в 23%. Апробация метода на пшенице с начальной влажностью 26% при температуре сушильного агента 32 °С, его подаче 14000 т·м³/ч и концентрации озона 10 мг/м³ показала следующие результаты: традиционная сушка до кондиционной влажности 14% заняла 86 часов, при постоянной подаче озонозудушной смеси – 67 часов, а согласно новому методу – 68 часов. Несмотря на почти одинаковую продолжительность сушки с разницей в 1 час, новый способ обеспечил дополнительную экономию удельных энергозатрат на 4%. Эксперименты показали, что после обработки зерна озоном и приближения его влажности к кондиционному уровню подачу озонозудушной смеси можно прекратить, перейдя на обычное вентилирование, что позволяет экономить ресурсы и продлевать ресурс озонаторных установок. Визуальных различий между разными вариантами эксперимента не наблюдается. Ученые полагают, что зерно могло не успевать насытиться озоном, отчего его влияние становилось менее заметным. Однако не следует забывать о дезинфицирующих, стерилизующих, дезодорирующих свойствах озона, которые будут оказывать положительное влияние на качественные показатели просушиваемого сырья.

Н.В. Ксенз в своих исследованиях изучал влияние озонозудушной смеси на длительность процесса сушки зерна ячменя, влажность которого до обработки составляла 29%. Эксперимент проводили при температуре сушильного агента 23 °С и

относительной влажности воздуха в диапазоне 60,8...87%. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что использование озонозодушной смеси повысило производительность сушильной установки в 1,7 раза, сократив общую продолжительность сушки со 150 до 90 часов [51]. Как установлено, столь значительный эффект связан с изменениями физико-химических и теплофизических свойств воды под воздействием озона, который способствует изменению её вязкости, плотности, поверхностного натяжения, рН-фактора, теплопроводности, теплоёмкости и других свойств.

Исследования по активному вентилированию зерна проводили в производственных условиях на базе двух специализированных зернохранилищ с применением установки УДЗ-1200 [35]. В первом обрабатывалась партия зерна массой 650 тонн с использованием озонозодушной смеси, во втором масса зерна составляла 600 тонн, которая подвергалась обработке подогретым воздухом с относительной влажностью 60...70%. Удельный расход сушильного агента составил соответственно 40 и 42 т·м³/ч. В обоих случаях высота зернового слоя находилась в пределах 2...2,1 метра, а температура агента сушки варьировалась в диапазоне от 18,2 до 22,7 °С. Влажность зерна в верхней части насыпи была снижена с 18,4 до 14,4%. Полученные в ходе опыта данные показали, что контрольный образец достиг кондиционной влажности за 315 часов, тогда как партия зерна, обработанная озонозодушной смесью прошла процесс за 242 часа, сократив время сушки на 3 дня, или на 23%. Важно учесть, что повышение температуры сушильного агента свыше 38 °С ведет к распаду озона и потере эффективности вентилирования.

В большинстве современных зерносушилок за один цикл обработки зерновой массы возможно снизить её влажность не более чем на 6%. Продолжительное пребывание зернового материала в сушильной камере приводит к ухудшению его качественных характеристик из-за перегрева. Применение озонозодушной смеси в качестве сушильного агента позволит увеличить процент удаляемой влаги за один проход через зерносушилку без снижения качества просушиваемого зерна.

Подобные исследования были проведены в РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию». Зерно с начальной влажностью

24...25% сушили на колонковой зерносушилке типа СЗК-15. В качестве сушильного агента использовали как обычный воздух, так и озоновоздушную смесь. Чтобы довести зерно до кондиционной влажности в зерносушилке, потребовалось два цикла. После первого прохода влажность варьировалась в пределах 19...22%, а после второго – 11...13%. Время одного цикла составляло 2,0...2,8 часа. Применение озоновоздушной смеси в качестве сушильного агента позволило высушить зерно до влажности 12...13% за один проход через зерносушилку, что увеличило производительность оборудования на 35,7...50% и снизило удельные затраты топлива [68]. Таким образом, за один цикл сушки с использованием озоновоздушной смеси удалось удалить до 12% влажности зерна и исключить из технологического процесса дополнительную транспортировку зерна норией, что помогло минимизировать повреждение зерна.

Рост производительности был отмечен и на других типах зерносушилок. Так, например, ученые из Зернограда высушивали зерно ячменя с начальной влажностью 26,2% на бункерной сушилке СБВС-5. Использование нагретой до температуры 48 °С озоновоздушной смеси в качестве сушильного агента увеличило производительность оборудования в 1,9 раза по сравнению со стандартной зерносушилкой. Длительность процесса сушки сократилась на 53% [52].

Эффективность применения озоновоздушной смеси в качестве сушильного агента доказана многочисленными примерами, однако остаются актуальные вопросы подбора рациональных режимов осуществления этой операции. Анализ литературы показал, что непрерывная обработка зерна озоном на протяжении всего процесса сушки необязательна. Предпочтительнее проводить предварительную обработку зерновой массы озоном непосредственно перед началом сушки. Это облегчит доступ молекул воды к поверхности зерновки, расширяя межклеточные мембраны и снижая связь молекул воды с органическими компонентами зерновки. Если исходная влажность материала низкая (около 16...17%), обычного вентилирования озоновоздушной смесью вполне достаточно для достижения кондиционного состояния без применения зерносушилки. При повышенной начальной влажности предварительно озонированный материал лучше подвергается даль-

нейшей сушке, потребляя меньше энергии и обеспечивая лучшие показатели эффективности сушки. Способ сушки зерновых материалов, состоящий из двух этапов – предварительное озонирование влажного зернового вороха и последующая сушка озонированного зерна в шахтных сушилках, был запатентован В ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (патент РФ на изобретение № 2709712) [75].

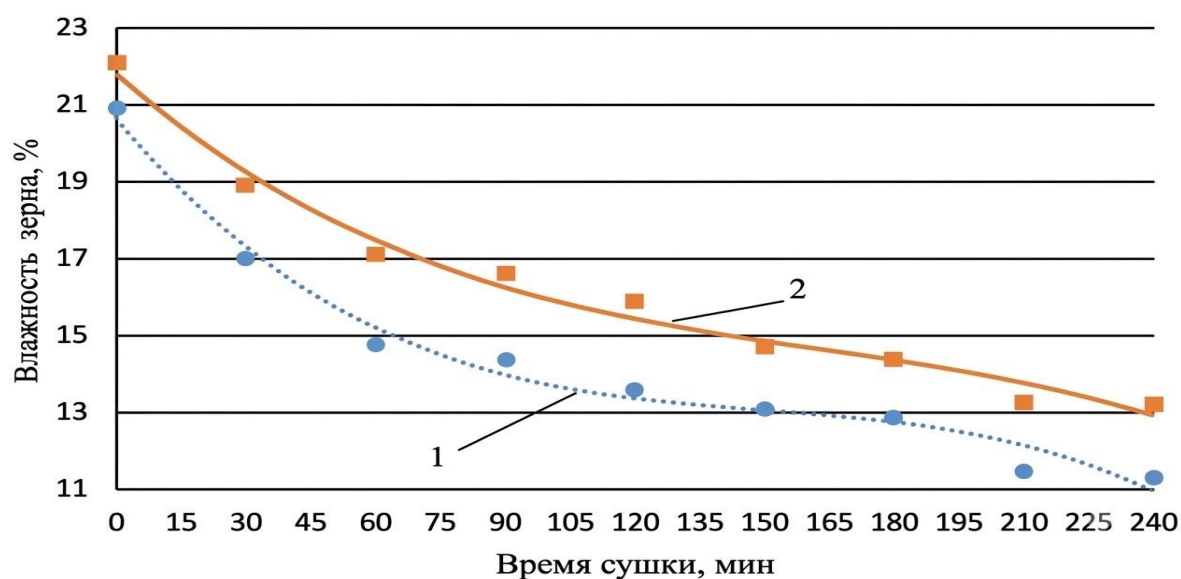
В Воронежском ГАУ были проведены исследования с целью выяснить, насколько целесообразна предварительное озонирование влажного зернового вороха перед его последующей сушкой [6, 80]. Анализ результатов показал, что действие озона благотворно сказывается на качественных параметрах зерна и существенно сокращает время сушки. Помимо этого, доказано положительное влияние озон-воздушной смеси на всхожесть семян и урожайность зерновых культур. Всего было проведено 2 эксперимента. В первом продолжительность озонирования составила 40 минут, при расходе агента $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ с концентрацией озона $5 \text{ мг}/\text{м}^3$. Начальная влажность зерна пшеницы составляла 22,1%. Во втором эксперименте продолжительность составила 60 минут, расход агента – $1 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация озона – $8 \text{ мг}/\text{м}^3$, исходная влажность зерна – 27,3%. В обоих случаях проводился отбор контрольного и обработанного озоном образцов каждые 30 минут с одновременным измерением содержания влаги. Результаты исследований для первого случая представлены в таблице 1.4 [6].

Таблица 1.4 – Результаты исследований влияния предварительной озон-воздушной обработки зерна озимой пшеницы на процесс его сушки при 40-минутном озонировании

Исходный ворох			Ворох после вентиляции озоном 40 мин. с расходом агента $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ с концентрацией озона $5 \text{ мг}/\text{м}^3$		Температура агента сушки, °С	
Время сушки	Влажность, %	Температура зерна, °С	Время сушки	Влажность, %	Температура зерна, °С	Время сушки
0 мин	20,9	27,3	22,1	28,4	–	–
30 мин	17,0	31,6	18,9	30,6	69,3	28,4
60 мин	14,8	31,5	17,1	32,9	70,2	29,0

Исходный ворох			Ворох после вентиляции озоном 40 мин. с расходом агента 1 м ³ /ч с концентрацией озона 5 мг/м ³		Температура агента сушки, °С	
Время сушки	Влажность, %	Температура зерна, °С	Влажность, %	Температура зерна, °С	в камере горячего воздуха	в камере влажного воздуха
90 мин	14,4	30,0	16,6	30,7	71,6	29,0
120 мин	13,6	28,9	15,9	30,1	69,1	29,3
150 мин	13,1	31,2	14,7	33,2	69,5	30,4
180 мин	12,9	28,9	14,4	32,0	68,5	30,3
210 мин	11,5	30,2	13,3	30,2	71,6	30,8
240 мин	11,3	31,2	13,2	31,8	68,6	30,3

Графически результаты эксперимента представлены на рисунке 1.15 [6]. Анализ результатов исследований показал, что с увеличением времени сушки содержание влаги в зерне снижается. Однако в контрольном образце процесс удаления влаги происходил более интенсивно по сравнению с обработанным озоновоздушной смесью образцом. Так, за первые 30 минут сушки влагоотдача составила 3,2% в озонированном ворохе, а в контрольном – 3,9%. Это связано с недостаточной продолжительностью обработки зерна озоном.



1 – необработанные зерна озимой пшеницы; 2 – озонированные зерна озимой пшеницы

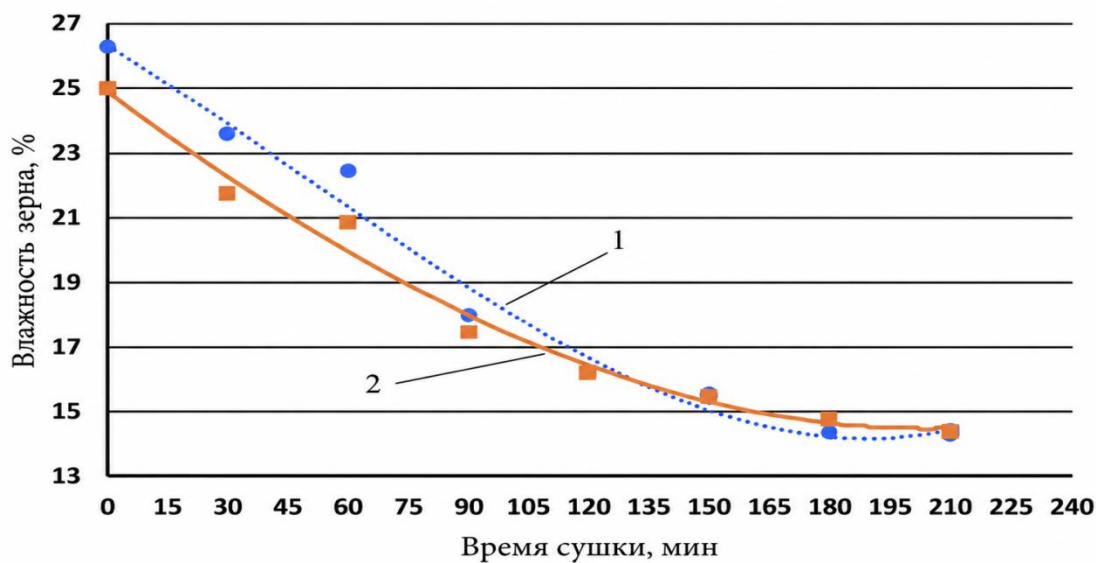
Рисунок 1.15 – Зависимости изменения влажности зерна озимой пшеницы при применении предварительного озонирования влажного вороха перед сушкой

Поскольку 40-минутная обработка зернового вороха озоном оказалась неэффективной, время озонирования увеличили до 60 минут, а концентрацию озона – до 8 мг/м^3 . Результаты этого опыта приведены в таблице 1.5 [6].

Таблица 1.5 – Результаты исследований определения влияния предварительной озоновоздушной обработки зерна озимой пшеницы на процесс его сушки при 60-минутном озонировании

Исходный ворох			Ворох после вентиляции озоном 60 мин. с расходом агента $1 \text{ м}^3/\text{час}$ с концентрацией озона 8 мг/м^3		Температура агента сушки, °С	
					в камере горячего воздуха	в камере влажного воздуха
Время сушки	Влажность, %	Температура зерна, °С	Влажность, %	Температура зерна, °С		
0 мин	26,3	25,4	25,0	26,0	-	-
30 мин	23,6	26,7	21,8	26,8	55,7	23,6
60 мин	22,5	24,0	20,9	23,7	55,9	23,3
90 мин	18,0	23,8	17,5	23,8	55,95	23,1
120 мин	16,2	24,5	16,2	23,9	55,05	23,1
150 мин	15,6	23,8	15,5	24,5	55,2	23,1
180 мин	14,4	21,1	14,8	24,3	54,45	22,6
210 мин	14,3	24,4	14,4	25,1	56,1	23,1

Графически результаты эксперимента представлены на рисунке 1.16 [6].



1 – необработанные зерна озимой пшеницы; 2 – озонированные зерна озимой пшеницы

Рисунок 1.16 – Зависимость изменения влажности зерна озимой пшеницы при применении предварительной озоновоздушной обработки перед сушкой

Анализируя результаты исследований, можно отметить, что после предварительной озонозвоздушной обработки зерна их влажность при сушке относительно контрольного образца снизилась на 1,3%. Таким образом, через 1 час обработанное зерно достигло содержания влаги 20,9%. При этом исходный ворох смог достичь этого значения только через 80 минут, что на 20 минут дольше. По истечении двух часов сушки динамика изменения влажности у обоих образцов стала одинаковой. Это объясняется разложением озона. Положительное влияние предварительной обработки зернового вороха озонозвоздушной смесью на эффективность сушки прослеживается в течение первых двух часов. В целом зависимость изменения влажности зерна пшеницы при её сушке подчиняется полиномиальной зависимости третьей степени. Результаты аппроксимации приведены в таблице 1.6 [6]. Положительное влияние предварительной обработки зернового вороха озонном на эффективность его сушки подтверждается. Анализ исследований позволяет предположить, что эффект от озонирования связан с особенностями структуры зерновки.

Таблица 1.6 – Зависимости изменения влажности зерна озимой пшеницы при сушке от времени сушки

№ опыта	Вид опыта	Зависимость	R^2
1	Контроль	$W_{\text{пш.конт}} = -0,051 \cdot t^3 + 0,8267 \cdot t^2 - 4,9651 \cdot t + 26,15$	0,9913
	Озонирование	$W_{\text{пш.озон}} = -0,0783 \cdot t^3 + 1,2532 \cdot t^2 - 6,897 \cdot t + 26,536$	0,9949
2	Контроль	$W_{\text{пш.конт}} = 0,0396 \cdot t^3 - 0,3156 \cdot t^2 - 1,7505 \cdot t + 28,364$	0,9818
	Озонирование	$W_{\text{пш.озон}} = 0,0063 \cdot t^3 + 0,1213 \cdot t^2 - 3,0421 \cdot t + 27,836$	0,9857

Впоследствии был проведен аналогичный опыт с соевыми бобами. Условия проведения были следующими: расход агента составлял $2 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация озона – $6 \text{ мг}/\text{м}^3$, исходная влажность зерна – 24%. Озонирование материала длилось в течение 90 мин. В процессе сушки в камере горячего воздуха поддерживалась постоянная температура агента $57 \text{ }^\circ\text{C}$. Каждые 30 минут производили выгрузку ча-

сти бобов с замером влажности материала обоих образцов. Полученные результаты приведены в таблице 1.7 и на рисунке 1.17 [6].

Таблица 1.7 – Результаты исследований определения влияния предварительной озонной обработки зерна соевых бобов на процесс их сушки при 90-минутном озонировании

Исходный ворох			После вентиляции озоном 90 мин. с расходом агента 2 м ³ /час с производительностью озона 6 г/ч		Температура агента сушки, °С	
					в камере горячего воздуха	в камере влажного воздуха
Время сушки	Влажность, %	Температура зерна, °С	Влажность, %	Температура зерна, °С		
0 мин.	24,3	26,6	23,4	27,2	–	–
30 мин.	23,8	25,7	23,0	25,8	55	27,8
60 мин.	22,4	29,9	20,5	30,0	59	27,6
90 мин.	18,5	30,5	17,2	29,9	57,2	27,5
120 мин.	17,9	29,5	16,3	28,5	57,4	29,7
150 мин.	16,4	28,9	16,1	29,9	58,8	29,9
180 мин.	16,3	31,4	15,9	30,2	55,2	29,1
210 мин.	16,0	31,3	15,8	31,7	50,1	30,3

Проанализировав результаты исследований, можно утверждать, что влажность обработанного озоном зернового вороха на начало сушки была на 0,9% ниже, чем у контрольного образца. С увеличением времени сушки влажность зерна снижалась, причём на обработанном зерне этот процесс шел быстрее. Так, через 60 минут сушки озонированный ворох достиг влажности 20,5%, в то время как контрольный образец достиг тех же значений через 80 мин. Общее изменение влажности соевых бобов в процессе сушки описывается полиномиальной зависимостью третьей степени. Для контрольного образца эта зависимость выглядит следующим образом:

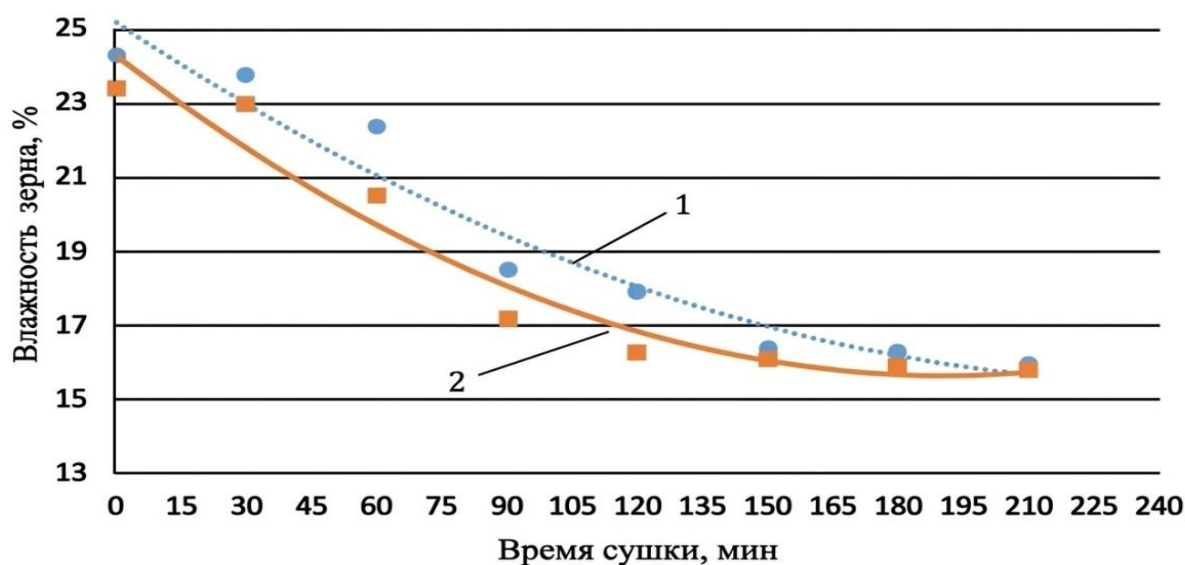
$$W_{\text{соя}}^{\text{КОНТ}} = 0,0586 \cdot t^3 - 0,6492 \cdot t^2 + 0,3826 \cdot t + 24,793. \quad (1.2)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации для данной зависимости равен $R^2 = 0,9703$, что подтверждает адекватность модели для описания процесса.

При сушке предварительно озонированного материала зависимость изменения влажности соевых бобов при их сушке принимала следующий вид:

$$W_{\text{соя}}^{\text{озон}} = 0,0525 \cdot t^3 - 0,4889 \cdot t^2 - 0,5604 \cdot t + 25,129. \quad (1.3)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации для данной зависимости составляет $R^2=0,9353$ [101].



1 – необработанные зерна соевых бобов; 2 – озонированные зерна соевых бобов

Рисунок 1.17 – Зависимости изменения влажности зерна соевых бобов при их сушке в зависимости от способа подготовки влажного материала

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что заметное воздействие озона прослеживается в первые 60 минут, а в целом, как и в случае с пшеницей – в течение двух часов. Впоследствии процесс сушки протекал идентично для обоих образцов.

Таким образом, применение предварительного озонирования влажного зернового материала открывает широкие перспективы для развития в агропромышленности. Озон способствует улучшению таких показателей, как энергия прорастания и всхожесть семян, сила роста и урожайность, угнетает болезни и вредите-

лей, снижает заболеваемость растений и предотвращает заражение плесневыми грибами. Озонирование не требует накопления газа заранее, так как озон генерируется непосредственно в рабочем процессе. Проникновение озона внутрь зерна происходит по закону газовой диффузии, а взаимодействие озона с зерном запускает цепочку химических реакций, сопровождающихся выделением тепла. Это приводит к ускорению процесса нагрева зерна и, соответственно, к снижению энергозатрат на сушку. Озон ускоряет внутреннее прогревание зерновки, повышая коэффициент диффузии влаги и ускоряя парообразование. В результате количество теплоты, которое необходимо для отделения молекулы воды в процессе сушки, сокращается на 20...60%. Учёные утверждают, что вентиляция зернового вороха озоновоздушной смесью с концентрацией озона в пределах от 1 до 11 мг/м³ позволяет сократить время сушки зерна до кондиционного состояния на 20...50%. Расхождение в цифрах объясняется отличием в исходных параметрах обработки культур. Наиболее перспективной является предварительная озоновоздушная обработка влажного вороха, что повышает эффективность последующей сушки в 1,3...2,5 раза.

1.4 Комплексный анализ и систематизация теоретических исследований кинетики сушки зерна под воздействием озоновоздушной смеси

Теоретические исследования, касающиеся использования озоновоздушной смеси при сушке зерна, начали появляться сравнительно недавно. Тем не менее уже имеется ряд научных трудов, посвящённых изучению взаимодействия озона с зерном и семенами различных культур [25, 31, 36, 111].

Зерно представляет собой биологически активную систему, в которой непрерывно протекают сложные биохимические реакции. Поэтому влага и озон не просто физически адсорбируются, а активно вовлекаются в метаболические процессы с участием ферментов. В процессе обработки озоновоздушной смесью атомарный кислород, выделяющийся при разложении озона, выполняет роль активного сорбента. Он вступает во взаимодействие как с тканями зерновки, так и с

влажностью, находящейся внутри неё. Экспериментально подтверждено, что подача озонородной смеси с концентрацией озона от 4,7 до 10,0 мг/м³ запускает биохимические процессы, которые ускоряют высушивание зерна [111]. Данное ускорение во многом обусловлено выделением тепла в ходе реакций, что приводит к изменению коэффициента диффузии. Данный тепловой баланс может быть описан следующим образом:

$$Q_T = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_g + Q_b, \quad (1.4)$$

где Q_T – общее количество теплоты, которое выделяется от воздействия озона, кДж;
 Q_{P1} – теплота, выделяемая от рекомбинации озона в сушильном агенте, кДж;
 Q_{P2} – теплота, выделяемая от рекомбинации озона на поверхности зерна, кДж;
 Q_g – теплота, выделяемая за счёт реакции дыхания, кДж;
 Q_b – теплота, образованная за счёт вторичных преобразований внутри зерна, кДж.

Количество теплоты Q_{P1} , выделяющейся при рекомбинации молекул озона, присутствующих в сушильном агенте, можно определить по формуле

$$Q_{P1} = n_{c.a.} \cdot k_{c.a.} \cdot m_{O_3}, \quad (1.5)$$

где $n_{c.a.}$ – коэффициент распада озона в сушильном агенте;
 $k_{c.a.}$ – удельная теплота, выделяемая от рекомбинации в сушильном агенте, кДж/(кг·°С);
 m_{O_3} – масса синтезированного озона, мг.

Тем не менее, не всё выделяемое тепло поглощается зерном – на нагрев материала используется только некоторая её часть. Величину этой доли можно определить по следующей формуле:

$$Q_{P1n} = n \cdot n_{c.a.} \cdot k_{c.a.} \cdot m_{O_3}, \quad (1.6)$$

где Q_{P1n} – часть теплоты, выделяемой от рекомбинации озона в сушильном агенте и используемой для нагрева зерна, кДж;
 n – коэффициент полезно используемой теплоты.

Для вычисления количества теплоты Q_{P2} , которое выделяется в процессе рекомбинации озона на поверхности зерна, используется следующая зависимость:

$$Q_{P2} = n_m \cdot k_m \cdot m_{O_3}, \quad (1.7)$$

где n_m – коэффициент распада озона на поверхности зерна;

k_m – удельная теплота, выделяемая от рекомбинации на поверхности зерна, кДж/(кг·°C).

Величину теплоты Q_g , которая выделяется в результате дыхательной реакции, активированной озоном, можно определить по формуле

$$Q_g = n_g \cdot k_g \cdot m_{O_3} \cdot m_3, \quad (1.8)$$

где n_g – часть озона, инициирующая биохимические реакции, мг;

k_g – удельная теплота, выделяемая при дыхании зерна, кДж/(кг·°C);

m_3 – масса зерна, обрабатываемая озоном, кг.

Для расчёта теплоты Q_b , возникающей в результате вторичных преобразований внутри зерна, используют следующую зависимость:

$$Q_b = n_b \cdot k_b \cdot m_{O_3} \cdot m_3, \quad (1.9)$$

где n_b – часть озона, участвующая во внутренних преобразованиях, мг;

k_b – удельная теплота, выделяемая при внутренних преобразованиях, кДж/(кг·°C);

В результате многочисленных преобразований Т.П. Троцкая вывела следующую зависимость:

$$Q_T = 142,5 \cdot C_{O_3} \cdot L \cdot (n \cdot n_{c.a.} + n_m) + C_{O_3} \cdot L \cdot m_3 \cdot (n_g \cdot k_g + n_b \cdot k_b), \quad (1.10)$$

где C_{O_3} – концентрация озона, мг/м³;

L – расход сушильного агента, м³/ч.

Общее количество теплоты, которое возникает при всех видах взаимодействий озона с зерновой массой, может быть определено эмпирически с помощью следующей формулы:

$$Q_T = m_M \cdot (T_0 - T_K) \cdot c_3, \quad (1.11)$$

где T_0 – температура зерна в опыте, °C;

T_K – температура зерна в контроле, °C;

c_3 – теплоёмкость зерна, кДж/(кг·°C).

Приравняв два предыдущих выражения, получили

$$m_M \cdot (T_0 - T_K) \cdot c_m = 142,5 \cdot C_{O_3} \cdot L \cdot (n \cdot n_{c.a.} + n_m) + C_{O_3} \cdot L \cdot m_3 \cdot (n_g \cdot k_g + n_b \cdot k_b) \quad (1.12)$$

Отсюда вычислен градиент температуры

$$\Delta T = \frac{Q}{m_3 \cdot C_m}, \quad (1.13)$$

где ΔT – градиент температуры, $\Delta T = T_0 - T_K$, °С.

Следовательно, озонирование способствует изменению градиента температуры, что влечёт за собой корректировку коэффициента диффузии:

$$\alpha_m = \alpha_{m0} \cdot \left(\frac{T + \Delta T}{273} \right)^{k_0} = \alpha_{m0} \cdot \left(\frac{T + \frac{Q}{m_3 \cdot C_m}}{273} \right)^{k_0} = \alpha_{m0} \cdot \left(\frac{T \cdot m_3 \cdot C_m + Q}{273 \cdot m_3 \cdot C_m} \right)^{k_0}, \quad (1.14)$$

где α_{m0} – коэффициент диффузии влаги при температуре 20 °С, м²/с;

T – температура зерна, °С;

k_0 – степенной коэффициент.

В конечном итоге изменится уравнение неизотермического переноса влаги

$$j = \alpha_m \cdot \rho_0 \cdot (\Delta U - \delta \Delta T) = \alpha_{m0} \cdot \left(\frac{T \cdot m_3 \cdot C_m + Q}{273 \cdot m_3 \cdot C_m} \right)^{k_0} \cdot \rho_0 \cdot (\Delta U - \delta \Delta T), \quad (1.15)$$

где j – плотность потока влаги при сушке зерна в озонозодушной смеси, кг/(м·с);

ρ_0 – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

ΔU – градиент влагосодержания, г/кг;

δ – термоградиентный коэффициент, %/°С.

Основываясь на приведенных зависимостях, сформулирована гипотеза [111]. Согласно ей, применение озона позволит сократить этап сушки, не доводя зерно до кондиционной влажности. Достигнутый уровень является достаточным для последующего безопасного досушивания материала естественным путем, поскольку озон подавляет дыхание зерна и исключает риск самосогревания. Данный принцип закладывает основу для создания энергоэффективных сушильных технологий.

В работах А.А. Смирнова исследовалось протекание озонозодушной смеси через зерновой слой насыпи [99]. Изменение концентрации озона C_i в зерне автор описал следующим выражением:

$$C_i = C_{O_3} - \frac{(g_{адс} + g_{разл} + g_{обм} + g_{хим.р}) \cdot t_0}{D_{O_3}}, \quad (1.16)$$

где $G_{\text{адс}}$ – количество адсорбированного озона, мг/м³;

$G_{\text{разл}}$ – количество разложившегося озона на поверхности, мг/м³;

$G_{\text{обм}}$ – количество разложившегося озона в обрабатываемом объеме, мг/м³;

$G_{\text{хим.р}}$ – количество озона, вступившего в химические реакции, мг/м³;

t_0 – время контакта с зерновым слоем, мин;

$D_{\text{оз}}$ – расход озоновоздушной смеси через слой зернового материала, мин·мг/м³.

По мнению автора, при прохождении озоновоздушной смеси через зерновой слой каждый последующий поглощает часть поступающего озона. С увеличением толщины насыпи концентрация озона снижается на величину dc , которая соответствует количеству поглощенного и разложившегося озона в этом слое за время t_0 . Исходя из этого, для приближённого описания снижения содержания озона можно использовать уравнение органического роста, которое подразумевает пропорциональную зависимость уменьшения концентрации озона от его начального содержания:

$$\frac{dc}{dt_0} = -K C_t, \quad (1.17)$$

где K – коэффициент пропорциональности расходования озона по высоте слоя;

C_t – концентрация озона в момент времени t_0 , мг/м³.

Полученная автором зависимость представляет собой обобщённое и упрощённое описание того, как меняется концентрация озона на различных этапах его прохождения через зерновые слои. При этом физический смысл коэффициента пропорциональности, используемого в формулах, автором не объясняется, что ставит под сомнение достоверность предложенных зависимостей.

Исследователи А. Гинзбург и В.А. Резчиков [25, 31] получили зависимость, позволяющую рассчитать время нагрева зерна t до определенной температуры при условии его сушки в толстом слое:

$$t = \frac{c_3(100+W_1^c)}{c_{\text{вл}} \cdot N^c} \left[1 - \left(\frac{A-B \cdot T_\tau}{A-B \cdot T_0} \right)^{\frac{N^c \cdot c_{\text{вл}}}{B \cdot (100+W_1^c)}} \right], \quad (1.18)$$

где c_3 – удельная теплоёмкость зерна, кДж/(кг·К);

$c_{\text{вл}}$ – удельная теплоёмкость влаги, кДж/(кг·К);

v_c – скорость сушки зерна, кг/ч;

W_1^c – начальная влажность зерна, %;

A и B – функции основных параметров процессов сушки, а также теплофизических свойств сушильного агента и зерна;

T_0 и T_t – температура зерна начальная и в момент времени t , К.

Функции A и B определяются по выражениям:

$$A = \left(\frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{h \cdot \gamma} - \frac{0,23 \cdot N^c}{100 + W_1^c} \right) \cdot T_{a.c.} - \frac{2628 \cdot N^c}{100 + W_1^c} - q_5, \quad (1.19)$$

$$B = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{h_{cl} \cdot \gamma} - \frac{2,58 \cdot N^c}{100 + W_1^c}, \quad (1.20)$$

где $v \cdot \rho$ – массовая скорость агента сушки, кг/(м²·с);

c_p – удельная теплоемкость воздуха кДж/(кг·К);

h_{cl} – толщина зернового слоя, м;

γ – насыпная плотность зерна, кг/м³;

$T_{a.c.}$ – температура агента сушки, °С;

q_5 – удельные потери теплоты в окружающую среду через стенки сушильной камеры, кДж/(кг·ч).

Тогда скорость сушки v_c равна

$$N^c = [0,46(T_{a.c.} - 60)^{0,7} + k(W_1^c - 25) + 8] \sqrt{v \cdot \rho} \cdot (h_{cl} \cdot \gamma)^{-0,6}, \quad (1.21)$$

где k_T – коэффициент, являющийся функцией температуры агента сушки $T_{a.c.}$.

Анализ рассмотренных уравнений показывает, что при выборе режимов сушки необходимо в первую очередь учитывать влажность зерна кукурузы, зависящую от степени зрелости и влияющую на их термоустойчивость.

Д.А. Нормов в своей работе предположил, что интенсивность поглощения озона зерном определяется двумя ключевыми факторами: сорбционной способностью материала и концентрацией озона в подаваемой смеси [36]. Эту взаимосвязь он выразил следующим уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = -K_C \cdot C_{O_3} \cdot S, \quad (1.22)$$

где $\frac{dC}{dt}$ – скорость поглощения озона зернами;

K_C – константа скорости поглощения озона единицей объема зерна, мг/м³·с;

S – площадь обрабатываемого зернового материала, м².

С другой стороны, скорость поглощения озона зернами может быть описана следующим выражением:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{S}{V} \cdot [v^{03} \cdot (C_{\text{ВХ}} - C_{\text{ВЫХ}}) - K_C \cdot C_{\text{ВЫХ}} \cdot V], \quad (1.23)$$

где V – объем обрабатываемого зернового материала, м³;

v^{03} – скорость движения озоновоздушной смеси, м/с;

$C_{\text{ВХ}}$ – концентрация озона на входе в зерновой материал, мг/м³;

$C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация озона на выходе из зернового материала, мг/м³.

Решение представленного уравнения выражено в следующем виде:

$$C_{\text{ВЫХ}} = \frac{C_{\text{ВХ}} \cdot v^{03}}{v^{03} + K_C S V} \left[1 - e^{-\frac{v^{03} + K_C S V}{V}} \right] \cdot t_{03}, \quad (1.24)$$

где t_{03} – время озоновоздушной обработки.

Как показали расчеты автора, константу скорости поглощения озона единицей объемом зерна невозможно определить прямыми аналитическими методами. Полученное уравнение относится к трансцендентному типу, что требует для его решения применения численных итерационных процедур, реализуемых с помощью специализированного программного обеспечения.

Таким образом, несмотря на значительное количество теоретических работ, посвящённых влиянию озона на зерновку, в настоящее время отсутствуют комплексные математические модели, позволяющие определить зависимость влагосодержания зерна, предварительно обработанного озоновоздушной смесью, от времени операции при конвективной сушке. Имеющиеся работы, как правило, ограничиваются констатацией факта ускорения процесса без вывода закономерностей, которые бы учитывали совокупное влияние температуры и дозы озона. В связи с этим требуется проведение дальнейших теоретических исследований, направленных на разработку математической зависимости, связывающей влагосодержание зерна с продолжительностью сушки, а также на определение коэффициента интенсификации влагопереноса, учитывающего влияние озона.

1.5 Выводы по разделу

На основе аналитического обзора установлено:

- конвективный способ сушки зерна является наиболее перспективным, поскольку он конструктивно прост в реализации, имеет хорошую равномерность нагрева всех слоев зернового материала, обладает высоким коэффициентом полезного действия при низких энергозатратах, а также позволяет использовать смесь различных газов, что расширяет возможности операции и улучшает эффективность процесса;

- наиболее перспективными моделями сушилок для зерна и семян зерновых культур считаются шахтные, поскольку они имеют высокую производительность (20...200 т/ч), простоту конструкции, равномерный прогрев зерна, относительно невысокие энергетические затраты, самотечность технологического процесса и возможность дальнейшего совершенствования;

- применение озонозооной смеси при сушке зерна расширяет межклеточные мембраны, ослабляет химические связи молекул воды с органическими элементами зерновки и способствует быстрому перемещению влаги к поверхности, что при использовании предварительной озонной обработки с концентрацией озона в пределах 1...11 мг/м³ интенсифицирует процесс влагоотделения, позволяя при исходной влажности зерна 21...30% сократить время доведения зерна до кондиционного состояния на 20...50%, а также уменьшить потребление необходимого количества тепла на 20...60%;

- требуется проведение теоретических исследований, направленных на разработку математической зависимости, связывающей влагосодержание зерна с продолжительностью сушки, а также на определение коэффициента интенсификации влагопереноса, учитывающего влияние озона.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЗОНовОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКОЙ

2.1 Моделирование влагосодержания зерна при конвективной сушке в условиях предварительной озонОВОЗДУШНОЙ обработки влажного зернового вороха

Для более глубокого понимания кинетики конвективной сушки зерна и для количественной оценки влияния предварительного озонирования на интенсификацию физико-химических процессов необходимо обратиться к фундаментальным основам теории тепло- и массопереноса во влажных материалах [88]. Значительный вклад в развитие теории изменения влагосодержания при нагреве органических продуктов внесли А.С. Гинзбург, О. Кришер, Ю.А. Максименко, С.К. Манасян, Н.Б. Рашковская, П.Г. Романков, С.П. Рудобашта, Р.Р. Сафин, В.Ф. Фролов, Н.А. Прохоренко [24, 49, 57, 60, 62, 63, 83, 85, 86, 87, 91, 108, 113]. Наиболее полное и систематизированное описание процессов переноса тепла и влаги при сушке капиллярно-пористых тел приведено в трудах А.В. Лыкова [55], которое до настоящего времени является фундаментальной основой для большинства исследований в данной области. Согласно этой теории, влагосодержание зерна описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dx} \cdot \left(a_{\text{вл}} \cdot \frac{dw}{dx} + a_{\text{т.вл}} \cdot \frac{dT}{dx} \right) \\ c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

где w – влагосодержание, кг влаги/кг абсолютно сухого вещества;

t – время сушки, с;

$a_{\text{вл}}$ – коэффициент влагопроводности, м²/с;

$a_{\text{т.вл}}$ – коэффициент термовлагопроводности, м²/(с·°С);

T – температура зерна, °С;

c – удельная теплоёмкость влажного материала, отнесенная к массе сухого вещества, Дж/(кг·°С);

ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности влажного материала, Вт/(м·°С);

ε – критерий фазовых превращений, показывающий долю влаги, испаряющейся внутри материала;

r – теплота парообразования, Дж/кг;

$\frac{d}{dx}$ – производная по координате x .

Движущей силой переноса влаги в пористой структуре является градиент парциального давления водяного пара. В случае, если есть разность в значениях между объектом исследований и окружающей средой, то происходит десорбция или сорбция. При этом материал либо подсыхает, либо увлажняется. Если парциальное давление водяного пара у поверхности зерна больше парциального давления пара в атмосферном воздухе, то оно сохнет. При этом, чем больше разность между значениями данных показателей, тем быстрее идет процесс сушки. Следовательно, интенсифицировать влагоперенос между зерном и атмосферой можно, изменив парциальное давление внутри зерна.

При озонозоооздушной обработке в порах зерновки образуется парциальное давление за счет разрыва связей молекул воды с органическими компонентами зерна, что увеличивает влагоперенос в пористой системе по сравнению с необработанным материалом, при прочих равных условиях. Возникающий при этом перепад давлений усиливает градиент, ускоряя испарение влаги. Кроме того, озонозооздушная обработка зерна способствует:

- микроперфорации оболочки, вызванной окислительной способностью озона, что ослабляет перикарпий (плодовую оболочку), расширяя каналы для диффузии водяного пара, уменьшающие сопротивление массопереносу;

- изменению структуры белка и крахмала за счёт денатурации белковых матриц и частичной деструкции крахмальных гранул, что увеличивает пористость

и снижает связь влаги с органикой, способствуя более лёгкому переходу влаги в парообразное состояние.

Согласно теории А.В. Лыкова, процесс влагопереноса в капиллярно-пористых телах описывается системой дифференциальных уравнений (2.1). Однако для определения реальной кинетики влагоудаления при сушке зерна данную систему необходимо решить с учетом структуры и свойств объекта исследования. Прямое решение исходной системы затруднительно, поскольку распределение влажности внутри зерновки неизвестно и не поддается прямому измерению. Кроме того, в уравнениях присутствуют взаимосвязанные переменные, значения которых требуют идентификации. В связи с этим необходимо упростить исходную систему, сведя её к более доступным формам, допускающим экспериментальную проверку. Так, для решения системы дифференциальных уравнений (2.1) первое уравнение преобразуем по правилу суммы дифференциалов:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d\left(a_{\text{вл}} \frac{dw}{dx}\right)}{dx} + \frac{d\left(a_{\text{т.вл}} \frac{dT}{dx}\right)}{dx}. \quad (2.2)$$

Если допустить, что структура зерна равномерная, то коэффициенты $a_{\text{вл}}$ и $a_{\text{т.вл}}$ не меняют своего значения от координаты, т.е. они константы, поэтому их можно вынести из-под знака дифференциала:

$$\frac{dw}{dt} = a_{\text{вл}} \frac{d\left(\frac{dw}{dx}\right)}{dx} + a_{\text{т.вл}} \frac{d\left(\frac{dT}{dx}\right)}{dx}. \quad (2.3)$$

Переходя к форме вторых производных, преобразуем уравнение к виду

$$\frac{dw}{dt} = a_{\text{вл}} \frac{d^2w}{dx^2} + a_{\text{т.вл}} \frac{d^2T}{dx^2}. \quad (2.4)$$

С учетом этого второе уравнение системы (2.1) также упростим, считая коэффициент теплопроводности λ постоянным. В результате получим

$$c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot \frac{d^2T}{dx^2} + \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt}. \quad (2.5)$$

Выразив вторую производную температуры, имеем

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} - \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt}}{\lambda}. \quad (2.6)$$

Подставив выражение (2.6) в уравнение (2.4), получаем

$$\frac{dw}{dt} = a_{\text{вл}} \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \left(c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} - \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt} \right). \quad (2.7)$$

После математических преобразований выражение для скорости изменения влагосодержания примет следующий вид:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{a_{\text{вл}} \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt}}{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}. \quad (2.8)$$

В полученном уравнении (2.8) изменение влагосодержания зависит от второй производной влажности по координате и от скорости изменения температуры по времени. При этом влажность является функцией как времени, так и координаты, тогда как температура – только от времени. В процессе сушки после кратковременного начального прогрева скорость изменения температуры становится малой величиной, а температурное поле выходит на режим, близкий к стационарному. Поскольку полное динамическое описание процесса затруднено, далее будем рассматривать квазистационарное приближение, принимая производную температуры по времени, стремящейся к нулю. Вследствие этого второе слагаемое в числителе выражения (2.8) становится пренебрежимо малым и не оказывает значимого влияния на кинетику влагопереноса. Таким образом, им можно пренебречь, что существенно упрощает уравнение. Тогда оно примет следующий вид:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{a_{\text{вл}} \frac{d^2w}{dx^2}}{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}. \quad (2.9)$$

Далее выразим из полученного выражения $\frac{d^2w}{dx^2}$:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{dw}{dt} \cdot \frac{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}{a_{\text{вл}}}. \quad (2.10)$$

Полная влажность зерна равна отношению массы влаги, содержащейся в зерне, к общей массе зерна:

$$w = \frac{m_{вл}}{m_3}, \quad (2.11)$$

где $m_{вл}$ – общая масса влаги в зерне, г.

Причем общая масса влаги в зерне равна

$$m_{вл} = m_{вл.об} + m_{вл.зар} + m_{вл.вн}, \quad (2.12)$$

где $m_{вл.об}$ – масса влаги в оболочке зерна, г;

$m_{вл.зар}$ – масса влаги в зародыше, г;

$m_{вл.вн}$ – масса влаги внутри зерна, г.

Общая масса зерна равна

$$m_3 = m_{об} + m_{вн} + m_{зар}, \quad (2.13)$$

где $m_{об}$ – масса оболочки зерна, г;

$m_{вн}$ – масса внутренней части зерна, г;

$m_{зар}$ – масса зародыша, г.

Исходя из полученных равенств (2.11–2.13), получаем

$$w = \frac{m_{вл}}{m_3} = \frac{m_{вл.об} + m_{вл.зар} + m_{вл.вн}}{m_3} = \frac{m_{вл.об} + m_{вл.зар}}{m_3} + \frac{m_{вл.вн}}{m_3}. \quad (2.14)$$

С некоторой погрешностью будем считать, что зерно можно разделить на две различные области по характеру связи влаги: внутренняя часть (ядро, эндосперм) и поверхностный слой (оболочка, зародыш). Отношение массы влаги в оболочке и зародыше к общей массе зерна обозначим как относительную поверхностную влажность зерна. Тогда она будет равна

$$w_n = \frac{m_{вл.об} + m_{вл.зар}}{m_3}. \quad (2.15)$$

Аналогично относительную внутреннюю влажность зерна определим как отношение массы влаги, сосредоточенной внутри зерновки, к общей массе зерна:

$$w_{вн} = \frac{m_{вл.вн}}{m_3}. \quad (2.16)$$

Из выражений (2.14–2.16) следует, что полная влажность зерна равна сумме относительной поверхностной и внутренней влажности:

$$w = w_n + w_{\text{вн}}. \quad (2.17)$$

Исходя из полученного равенства (2.17) получаем следующее выражение:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d(w_n + w_{\text{вн}})}{dt} = \frac{dw_n}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}. \quad (2.18)$$

С учетом подстановки (2.18) в уравнение (2.10) получаем

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{\left(1 + \frac{a_{\text{Т.ВЛ}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0\right) \cdot \left(\frac{dw_n}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{ВЛ}}}. \quad (2.19)$$

Поскольку точное распределение влажности по координате на небольшом участке неизвестно, то для упрощения модели перейдем к усредненным характеристикам. В начальный момент времени между поверхностным и внутренними слоями зерновки существует значительный градиент влажности, что приводит к интенсивному потоку влаги. По мере сушки этот градиент уменьшается, и в конечном счёте влажность выравнивается по всему объёму, после чего направленный перенос влаги прекращается. Мгновенное значение ускорения не может быть точно определено из-за отсутствия детальной информации о распределении влаги. Однако за достаточно большой промежуток времени, сопоставимый с длительностью всего процесса, влажность успеет выровняться. В первом приближении можно считать, что на этом интервале ускорение влагопереноса постоянно. Допущение о постоянстве ускорения позволяет заменить дифференциальное уравнение разностным выражением, связывающим значения влажности в двух точках. Эквивалентный радиус зерновки r_3 рассчитывается как кубический корень из произведения её линейных размеров:

$$r_3 = \sqrt[3]{a_3 \cdot b_3 \cdot c_3}, \quad (2.20)$$

где a_3 – длина зерновки, мм;

b_3 – ширина зерновки, мм;

c_3 – толщина зерновки, мм.

Принимая в качестве характерной координаты, представляющей все тело, половину эквивалентного радиуса зерновки $x = \frac{r_3}{2}$ и рассматривая относительную влажность, аппроксимируем градиент влажности разностью значений на поверхности и внутри зерновки:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{(w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{x} = \frac{(w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3/2} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right). \quad (2.21)$$

Тогда, выражая вторую производную, получим

$$\frac{d^2w}{dx^2} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right)^2. \quad (2.22)$$

Приравняв выражения (2.19) и (2.22), приходим к следующему:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \left(\frac{dw_{\text{п}}}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{вл}}} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right)^2. \quad (2.23)$$

Выполнив алгебраические преобразования, приведем уравнение к виду:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \left(\frac{dw_{\text{п}}}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{вл}}} = \frac{4 \cdot (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3^2}. \quad (2.24)$$

Так как процесс равновесный и в данный момент времени можно считать постоянным (квазистационарным), то скорость выхода влаги и изменения влажности на поверхности и внутри зерновки можно считать постоянной:

$$\frac{dw_{\text{п}}}{dt} = \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}.$$

Основываясь на этом, выражение (2.24) примет следующий вид:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}}{a_{\text{вл}}} = \frac{4 \cdot (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3^2}. \quad (2.25)$$

Выразив первую производную $\frac{dw_{\text{вн}}}{dt}$, получаем выражение в удобном для решения виде:

$$\frac{dw_{\text{вн}}}{dt} = \frac{4 \cdot a_{\text{вл}} \cdot (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3^2 \cdot \left(\frac{a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}{\lambda} + 1\right)}. \quad (2.26)$$

Используя введенное ранее соотношение $w_n = w - w_{вн}$ (2.17), исключим из уравнения (2.26) переменную w_n , характеризующую влагосодержание поверхностного слоя. После подстановки и алгебраических преобразований получаем

$$\frac{dw_{вн}}{dt} = \frac{4 \cdot a_{вл} \cdot (w - 2 \cdot w_{вн})}{r_3^2 \cdot \left(\frac{a_{т.вл} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}{\lambda} + 1 \right)}. \quad (2.27)$$

Полученное уравнение показывает, что скорость изменения внутреннего влагосодержания определяется разностью между полным и внутренним влагосодержанием, а также параметрами материала и процесса. В рамках построения данной математической модели необходимо учитывать, что коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности зависят не только от температуры сушильного агента, но и от наличия озона. Температурная зависимость обусловлена изменением поверхностного натяжения влаги, а также кинетики фазовых переходов. Влияние озона связано с модификацией структуры поверхности зерна, что меняет ее адсорбционные свойства, увеличивая или уменьшая пористость и способность смачиваться. В свою очередь, эквивалентный радиус зерновки r_3 , теплота парообразования r , плотность материала ρ_0 , критерий фазовых превращений ε и коэффициент теплопроводности λ принимаются постоянными для данного зерна.

Поскольку прямое измерение парциального давления озона внутри зерновки затруднительно, то для количественного учёта совокупного эффекта в уравнение введем коэффициент интенсификации влагопереноса $k_{инт}^{вл}$, равный отношению полной влажности зерновки к относительной внутренней влажности:

$$k_{инт}^{вл} = \frac{w}{w_{вн}}. \quad (2.28)$$

Данный коэффициент учитывает перераспределение влаги между внутренней и поверхностной зонами под воздействием озона.

Исходя из выражений (2.14) и (2.16), получаем

$$k_{инт}^{вл} = \frac{w}{w_{вн}} = \frac{m_{вл.об} + m_{вл.зар} + m_{вл.вн}}{m_{вл.вн}}. \quad (2.29)$$

Заменим $m_{вл.об} = m_{вл.нов} - m_{вл.зар}$,

где $m_{\text{вл.пов}}$ – масса влаги на поверхности зерна, г.

Тогда выражение (2.29) будет иметь следующий вид:

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл.зар}}}{m_{\text{вл.вн}}} - \frac{m_{\text{вл.зар}} - m_{\text{вл.пов}}}{m_{\text{вл.вн}}} + 1. \quad (2.30)$$

Упростив выражение (2.30), получим

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл.пов}}}{m_{\text{вл.вн}}} + 1. \quad (2.31)$$

Распределение массы влаги для поверхностного слоя составляет около 10...15% от общей массы влаги в зерне и около 85...90% для внутренней части [9, 108]. Тогда коэффициент интенсификации будет находиться в интервале от 1,11 до 1,18. Точное значение $k_{\text{инт}}^{\text{вл}}$ необходимо будет уточнять с помощью экспериментов.

Заменив $w_{\text{вл}} = \frac{w}{k_{\text{инт}}^{\text{вл}}}$, выражение (2.27) примет следующий вид:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{4 \cdot a_{\text{вл}} \cdot k_{\text{инт}}^{\text{вл}} \cdot \left(w - \frac{2w}{k_{\text{инт}}^{\text{вл}}} \right)}{r_3^2 \cdot \left(\frac{a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}{\lambda} + 1 \right)}. \quad (2.32)$$

После математических преобразований получаем

$$\frac{dw}{dt} = \frac{4a_{\text{вл}} \cdot \lambda \cdot w \cdot (k_{\text{инт}}^{\text{вл}} - 2)}{r_3^2 \cdot (\lambda + a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0)}. \quad (2.33)$$

Полученное уравнение представляет собой модель кинетики влагопереноса, описывающую изменение полного влагосодержания зерна во времени при конвективной сушке с учётом предварительной озоновоздушной обработки. Коэффициент интенсификации влагопереноса отражает совокупное влияние температуры и озона. Полученное уравнение служит основой для количественного расчёта динамики изменения влажности зерна и последующей идентификации параметров модели по экспериментальным данным.

Таким образом, на основе фундаментальных положений теории тепло- и массопереноса А.В. Лыкова получено дифференциальное уравнение, описывающее кинетику влагопереноса в зерновке при предварительной озоновоздушной

обработке: $\frac{dw}{dt} = \frac{4a_{\text{вл}} \cdot \lambda \cdot w \cdot (k_{\text{инт}}^{\text{вл}} - 2)}{r_3^2 \cdot (\lambda + a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0)}$. Данное уравнение отличается наличием коэф-

фициента интенсификации влагопереноса $k_{\text{инт}}^{\text{вл}}$, который учитывает влияние температуры агента сушки и параметров озоноздушной обработки. Теоретически установлено, что данный коэффициент принимает значения от 1,11 до 1,18, что количественно характеризует степень ускорения процесса влагоудаления.

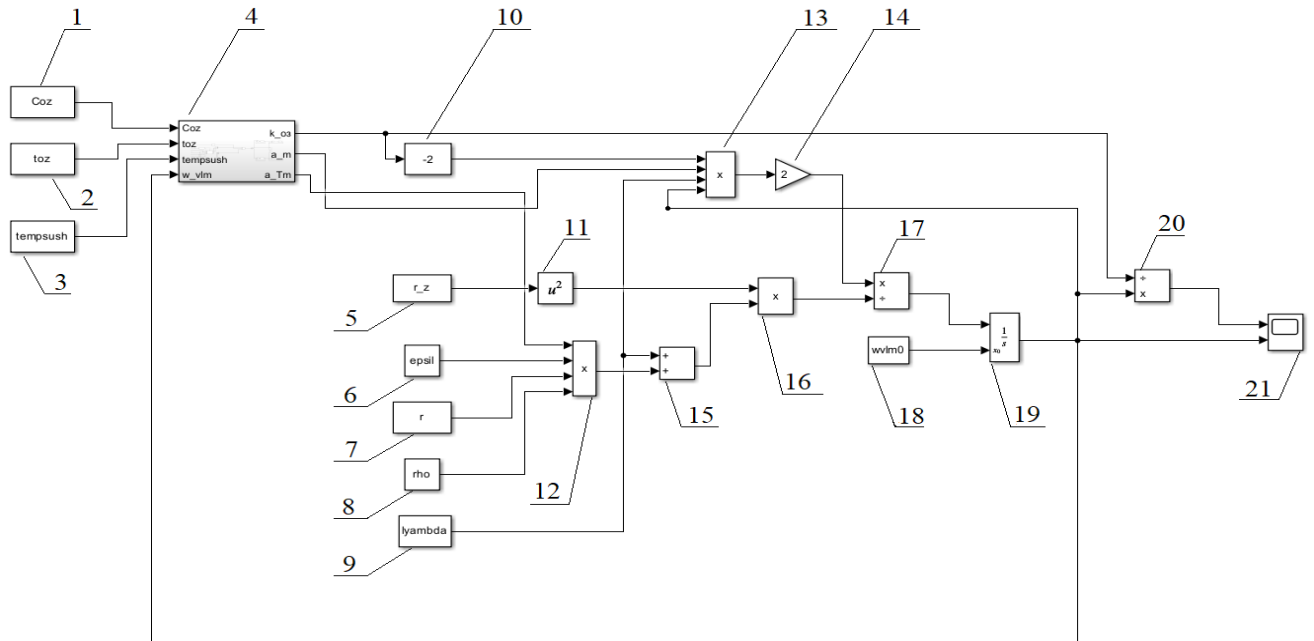
2.2 Зависимость параметров модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с предварительной озоноздушной обработкой влажного зернового вороха для периода постоянной скорости сушки

Для решения полученного дифференциального уравнения (2.33) и идентификации его параметров целесообразно использовать имитационное моделирование. Такой подход позволяет выполнять расчеты по модели при заданных начальных условиях и наборе параметров, а затем сопоставлять расчётные кривые с экспериментальными данными. Применение методов оптимизации даёт возможность подобрать зависимость изменения ключевых параметров модели, при которых теоретические данные наилучшим образом согласуются с результатами эксперимента. Структурная схема модели, реализующей уравнение (2.33), представлена на рисунке 2.1.

На этапе предварительного анализа факторов, влияющих на процесс сушки, была разработана программа для ЭВМ № 2023614948, позволившая выявить наиболее значимые параметры для построения итоговой математической модели [94]. На основе разработанной имитационной модели получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2026619507 [93].

Для нахождения численных значений параметров, входящих в уравнение (2.33), использовалось программное обеспечение Matlab с Simulink. Идентификация проводилась в три этапа, при этом варьировались разные наборы параметров,

а целевой функцией служило минимальное расхождение между расчётными кривыми сушки, полученными в модели, и экспериментальными данными.



1 – концентрация озона, 2 – время озонирования, 3 – температура сушки, 4 – блок определения параметров влагопереноса, 5 – эквивалентный радиус зерновки, 6 – критерий фазовых превращений, 7 – теплота парообразования, 8 – плотность сухого материала, 9 – коэффициент теплопроводности, 10, 11, 14 и 15 – операционные блоки управления, 12, 13, 16, 17, 20 – операционные блоки умножения и деления, 18 – начальная влажность зерна, 19 – блок интегрирования, 21 – блок для визуализации сигналов

Рисунок 2.1 – Схема модели процесса конвективной сушки зерна с предварительной озоновоздушной обработкой

Для обеспечения устойчивости работы модели приняли начальные значения, порядок и границы поиска коэффициентов [9]:

- коэффициент влагопроводности $10^{-9} < a_{\text{вл}} < 10^{-7}$, м²/с;
- коэффициент термовлагопроводности $10^{-9} < a_{\text{т.вл}} < 10^{-7}$, м²/(с·°С);
- коэффициент интенсификации влагопереноса $1,11 < k_{\text{инт}}^{\text{вл}} < 1,18$;
- критерий фазовых превращений $0,5 < \varepsilon < 0,7$;
- коэффициент теплопроводности $0,12 < \lambda < 0,18$, Вт/(м·°С);
- теплота парообразования $2400 < r < 2500$, Дж/кг;
- эквивалентный радиус зерновки $2 < r_3 < 5$ мм.

В ходе численных экспериментов были применены разные алгоритмы: метод нелинейных квадратов, градиентный метод и метод прямого поиска. Следует отметить, что применение алгоритма прямого поиска позволяет довести результаты работы других алгоритмов до локального минимума. Поскольку для этого метода не применяются ограничения, то возможен выход за зону поиска. В результате двухэтапная идентификация показала наилучшую эффективность: сначала выполнялся подбор методом нелинейных квадратов для получения предварительных значений, а затем градиентным методом проводилось их уточнение. Критерием прекращения поиска параметра служило относительное изменение функции менее порядка 10^{-4} и достижение заданной погрешности по параметрам. Результаты моделирования визуализировались в виде графиков, что позволяло контролировать качество подбора, а найденные значения параметров сохранялись для дальнейшего использования.

На первом этапе по экспериментальным кривым сушки зерна, не подвергавшегося предварительному озонированию, для каждого температурного режима определяли базовые параметры: коэффициент влагопроводности $a_{вл}$, коэффициент термовлагопроводности $a_{т.вл}$, коэффициент теплопроводности λ и критерий фазовых превращений ε .

На втором этапе с полученными параметрами для тех же режимов сушки без озонирования определяли коэффициент интенсификации влагопереноса $k_{инт}^{вл}$. Для каждой температуры находили такое значение, при котором расчётная кривая наилучшим образом описывает эксперимент. Полученные значения аппроксимировали линейной функцией от температуры с проверкой значимости и качества аппроксимации. Учитывая, что на коэффициент $k_{инт}^{вл}$ оказывает влияние не только температура, но и наличие озона, посредством программного обеспечения предварительно установлено, что искомая функциональная зависимость должна иметь вид

$$k_{инт}^{вл} = a_0^k + a_1^k \cdot T + a_2^k \cdot C_{оз} \cdot t_{оз}, \quad (2.34)$$

где a_0^k – свободный член уравнения;

a_1^k, a_2^k – коэффициенты уравнения регрессии;

$C_{\text{оз}}$ – концентрация озона, мг/м³;

$t_{\text{оз}}$ – время озонородушной обработки, с.

На третьем этапе использовали данные по сушке зерна кукурузы после предварительной озонородушной обработки. При фиксированных ранее значениях для каждого сочетания температуры и дозы озона подбирали значения коэффициентов влагопроводности, термовлагопроводности и коэффициента интенсификации влагопереноса, обеспечивающие наилучшее совпадение модели с экспериментом. В дальнейшем по проведенным исследованиям сможем определить коэффициенты уравнения регрессии, которые оцениваются на значимость по критерию Стьюдента, а общее качество аппроксимации – по коэффициенту детерминации R^2 . Валидация модели проводится на экспериментальных данных, не участвовавших в подборе параметров.

Таким образом, была разработана имитационная модель процесса конвективной сушки зерна с предварительной озонородушной обработкой, реализующая дифференциальное уравнение (2.33). Разработанный трехэтапный алгоритм идентификации параметров модели влагопереноса для периода постоянной скорости сушки позволил последовательно определить базовые параметры, коэффициент интенсификации влагопереноса и его регрессионную зависимость, которая имеет следующий вид: $k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}$.

2.3 Зависимость параметров модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с предварительной озонородушной обработкой влажного зернового вороха для периода падающей скорости сушки

Идентификация параметров модели влагосодержания зерна при предварительном озонировании для периода падающей скорости сушки проводили аналогично предыдущему подразделу. Отличие состояло в том, что в качестве исходных данных использовали экспериментальные кривые сушки на участке от окон-

чания периода постоянной скорости сушки до окончания эксперимента. Переход от периода постоянной скорости к периоду падающей скорости сушки наступает при достижении зерном влажности, при которой удаление свободной влаги с поверхности сокращается и начинается удаление связанной влаги из внутренних слоев. Анализ литературных источников показывает, что этот момент для зерна кукурузы в зависимости от начальных условий наступает через 50...65 минут после начала процесса [9]. В связи с этим в качестве условной границы между периодами принято время 60 минут.

Все процедуры определения параметров применяли аналогично методике для периода постоянной скорости сушки. Анализ экспериментальных данных, представленных в литературных источниках [1, 8, 24, 55, 68, 133], показал, что зависимости для коэффициентов влагопроводности $a_{\text{вл}}$ и термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$ с дополнительно введенными множителями $a_6 \cdot e^{\frac{a_5}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}$ и $a_9 \cdot e^{\frac{a_8}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}$ соответственно, учитывающими влияние конечной влажности зерна на интенсивность влагопереноса, имеют следующий вид:

$$a_{\text{вл}} = \frac{a_1^{\text{вл}} \cdot T + a_2^{\text{вл}} \cdot T^2 + a_3^{\text{вл}} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{a_6 \cdot e^{\frac{a_5}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}}, \quad (2.35)$$

где $a_1^{\text{вл}}$, $a_2^{\text{вл}}$, $a_3^{\text{вл}}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

$$a_{\text{т.вл}} = \frac{a_0^{\text{т.вл}} + a_1^{\text{т.вл}} \cdot T + a_2^{\text{т.вл}} \cdot T^2 + a_3^{\text{т.вл}} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{a_9 \cdot e^{\frac{a_8}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}}, \quad (2.36)$$

где $a_1^{\text{т.вл}}$, $a_2^{\text{т.вл}}$, $a_3^{\text{т.вл}}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

$a_0^{\text{т.вл}}$ – свободный член уравнения.

Такая зависимость выбрана на основании того, что в период падающей скорости сушки процесс определяется внутренней диффузией, а эффективные коэффициенты влаго- и термовлагопереноса снижаются с уменьшением влагосодержания. Это связано с тем, что по мере снижения влажности зерна происходит уменьшение количества свободной влаги, участвующей в массопереносе. Кроме

того, возрастает доля молекул воды, связанных с органическими компонентами зерновки, для отрыва которых требуется больше энергии. При этом изменяется структура пор и капилляров зерна, что снижает их проницаемость. Также ослабевают градиенты влажности и температуры внутри зерновки.

Таким образом, для периода постоянной скорости сушки предложен алгоритм идентификации параметров, учитывающий переход от удаления свободной влаги к удалению связанной влаги, наступающий через 60 минут. В уравнения для определения коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности введен экспоненциальный множитель, учитывающий снижение интенсивности переноса при уменьшении влажности.

2.4 Определение ключевых параметров влагопереноса при конвективной сушке с предварительной озоновоздушной обработкой влажного зернового вороха для периода постоянной скорости сушки

Для определения основных параметров использовали данные ранее проведенных исследований [6, 7, 9, 20, 21, 22, 35, 68, 79, 109, 110, 120, 131]. Теплота парообразования r принималась равной $2,4 \cdot 10^6$ Дж/кг. В результате идентификации на первом этапе для каждого температурного режима были получены с помощью оптимизации численного эксперимента оценки параметров: коэффициент теплопроводности λ и критерий фазовых превращений ε (табл. 2.1). Средний эквивалентный радиус зерна был принят равным 4,6 мм.

Таблица 2.1 – Параметры модели, определенные на первом этапе

Температура агента сушки, °С	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·°С)	Критерий фазовых превращений, ε
38	0,17777	0,68703
46	0,1779	0,68356
50	0,17779	0,6864
54	0,1778	0,686

Для обоснования возможности использования постоянных значений этих параметров был проведен статистический анализ. Предварительно, с помощью критерия Фишера при уровне значимости 0,05, проверяли однородность дисперсий для каждого показателя. Расчетные значения критерия не превышали критических, что свидетельствует о случайном характере разброса данных. Для каждого параметра проверяли нулевую гипотезу о нормальном распределении со средним значением, соответствующим выборке. Для всех трех параметров получены значения критерия принятия гипотезы $h = 0$ и уровень значимости $p = 0,9999$, что не дает оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении. Это подтверждает физическую достоверность параметров. Анализ разброса значений относительно среднего показал, что ни одно из них не выходит за пределы доверительного интервала. Средние значения полученных параметров модели и их доверительные интервалы по критерию Стьюдента представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Средние значения постоянных параметров модели

Параметр	Среднее значение	Доверительный интервал
Коэффициент теплопроводности, λ	0,177815	0,17772; 0,17791
Критерий фазовых превращений, ε	0,6857475	0,68333; 0,68816

Коэффициент теплопроводности λ и критерий фазовых превращений ε потенциально могут зависеть от температуры. Однако результаты экспериментальной проверки и последующий статистический анализ показали, что различия этих значений при разных температурах не превышают случайной погрешности измерений. Следовательно, в пределах исследуемого температурного диапазона влияние температуры на коэффициент теплопроводности и критерий фазовых превращений отсутствует, и эти параметры могут быть приняты постоянными.

Коэффициенты влагопроводности $a_{\text{вл}}$ и термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$ изменяются с изменением температуры. Их значения для каждого режима представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оценка коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности при различных температурах сушильного агента

Температура, °С	$a_{\text{вл}}$	$a_{\text{т.вл}}$
38	$6,1848 \cdot 10^{-8}$	$3,7836 \cdot 10^{-8}$
46	$8,6076 \cdot 10^{-8}$	$2,7321 \cdot 10^{-8}$
50	$8,5870 \cdot 10^{-8}$	$2,7012 \cdot 10^{-8}$
54	$8,0123 \cdot 10^{-8}$	$2,6651 \cdot 10^{-8}$

Для описания влияния температуры сушильного агента T на величину коэффициента влагопроводности $a_{\text{вл}}$ была проведена обработка данных методами регрессионного анализа, который показал, что наилучшее приближение обеспечивает полином второй степени. Поскольку на данном этапе озонирование не применялось, влияние озона на коэффициенты $a_{\text{вл}}$ и $a_{\text{т.вл}}$ в явном виде не проявлялось. Однако для возможного учета этого влияния в дальнейшем в уравнение регрессии были введены дополнительные множители, содержащие концентрацию озона $C_{\text{оз}}$ и время экспозиции $t_{\text{оз}}$. На данном этапе концентрация озона $C_{\text{оз}}$ и время озоноздушной обработки $t_{\text{оз}}$ равны 0, а уравнение имеет вид

$$a_{\text{вл}} = a_1^{\text{вл}} \cdot T + a_2^{\text{вл}} \cdot T^2 + a_3^{\text{вл}} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}, \quad (2.37)$$

где $a_1^{\text{вл}}$, $a_2^{\text{вл}}$, $a_3^{\text{вл}}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Причем коэффициент $a_3^{\text{вл}}$ будет определен позже, так как характер его изменения при озоноздушной обработке пока не установлен. В случае, если зерно не подвергалось предварительной озоноздушной обработке, то произведение, содержащее данный коэффициент, обращается в ноль и не оказывает влияния на коэффициент влагопроводности.

Параметры модели определяли методом наименьших квадратов. С помощью двустороннего критерия Стьюдента оценивали значимость отдельных коэффициентов. При уровне значимости $p_p > 0,1$ отбрасывали во всех случаях. При уровне значимости $0,1 > p_p > 0,05$ не учитывали, если это существенно не снижало коэффициент детерминации. Полученные значения представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (t_p)	Расчетный уровень значимости (p_p)
$a_1^{вл}$	$2,4875 \cdot 10^{-9}$	$3,4839 \cdot 10^{-10}$	7,1398	0,0020354
$a_2^{вл}$	$-1,7472 \cdot 10^{-11}$	$7,1167 \cdot 10^{-12}$	-2,455	0,070064

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,827$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{кор}^2 = 0,803$.

Анализ таблицы 2.4 показал, что линейный член $a_1^{вл}$ статистически значим, так как $p_p < 0,1$. Квадратичный член $a_2^{вл}$ имеет расчетный уровень значимости 0,07, что при описанном выше уровне значимости также позволяет считать его значимым. Включение квадратичного члена повышает коэффициент детерминации по сравнению с линейной аппроксимацией. Попытки использования других форм регрессионной зависимости давали неудовлетворительные результаты. Таким образом, использование полиномиальной модели второй степени является статистически обоснованным, лучше описывает экспериментальные данные в исследуемом диапазоне температур и может быть использовано для расчета коэффициента влагопроводности $a_{вл}$.

Для коэффициента термовлагопроводности $a_{т.вл}$ было получено следующее уравнение регрессии:

$$a_{т.вл} = a_0^{т.вл} + a_1^{т.вл} \cdot T + a_2^{т.вл} \cdot T^2 + a_3^{т.вл} \cdot C_{оз} \cdot t_{оз}, \quad (2.38)$$

где $a_1^{т.вл}$, $a_2^{т.вл}$, $a_3^{т.вл}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

$a_0^{т.вл}$ – свободный член уравнения.

По аналогии с уравнением (2.37) для возможного учёта влияния озона в дальнейшем в уравнение регрессии были введены дополнительные множители, содержащие концентрацию озона $C_{оз}$ и время экспозиции $t_{оз}$. На данном этапе коэффициент $a_3^{т.вл}$, учитывающий влияние озона, не определялся, так как его значение будет установлено после проведения дополнительных экспериментов. Результаты статистической обработки представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (t_p)	Расчетный уровень значимости (p_p)
$a_0^{т.вл}$	$1,5742 \cdot 10^{-7}$	$2,3111 \cdot 10^{-8}$	6,8113	0,0064724
$a_1^{т.вл}$	$-5,0979 \cdot 10^{-9}$	$1,0457 \cdot 10^{-9}$	-4,8752	0,016494
$a_2^{т.вл}$	$4,9722 \cdot 10^{-11}$	$1,1509 \cdot 10^{-11}$	4,3204	0,022851

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{кор}^2 = 0,933$, критерий Фишера $F_{расч}$: 36,1, уровень значимости ($pValue$): 0,00798.

Критерий Фишера для модели составил 36,1 при уровне значимости 0,00798, что подтверждает значимость модели в целом. Все коэффициенты оказались статистически значимыми ($p_p < 0,05$). Следовательно, данное уравнение может быть использовано для расчета коэффициента термовлагопроводности $a_{т.вл}$.

Добавив в модель (2.33) полученные уравнения регрессии (2.37) и (2.38) и зафиксировав в Parameter Estimator постоянные параметры, был проведен повторный подбор для определения параметра $k_{инт}^{вл}$. Зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса от температуры агента сушки аппроксимирована линейным уравнением

$$k_{инт}^{вл} = a_0^k + a_1^k \cdot T + a_2^k \cdot C_{оз} \cdot t_{оз} \quad (2.39)$$

Результаты статистической обработки при концентрации озона $C_{оз}$ и времени озонирования $t_{оз}$, равных нулю, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (t_p)	Расчетный уровень значимости (p_p)
a_0^k	1,1521	0,0019694	585,02	$5,1222 \cdot 10^{-11}$
a_1^k	-0,00013186	$4,2722 \cdot 10^{-5}$	-3,0865	0,0367

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,804$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{кор}^2 = 0,73$, критерий Фишера $F_{расч}$: 9,53, уровень значимости ($pValue$): 0,0367.

Критерий Фишера для модели составил 9,53 при уровне значимости 0,0367, что свидетельствует о значимости модели. Оба коэффициента уравнения являются статистически значимыми ($p_p < 0,05$), что подтверждает статистическую значимость полученного уравнения регрессии. Значит, его можно использовать в модели для поиска коэффициента интенсификации влагопереноса от температуры агента сушки.

В таблице 2.7 представлены значения коэффициента интенсификации влагопереноса от температуры агента сушки.

Таблица 2.7 – Результаты коэффициента интенсификации влагопереноса от температуры агента сушки

Температура агента сушки, °С	Значение коэффициента $k_{инт}^{вл}$
38	1,14709
46	1,14603
50	1,1455
54	1,14498

Для данного зерна полученное значение свободного члена $a_0^k = 1,1521$ характеризует коэффициент интенсификации влагопереноса при отсутствии предварительной озонвоздушной обработки и при нулевой температуре агента сушки. Однако в рабочем диапазоне температур его величина снижается с ростом температуры. Полученные значения находятся в интервале от 1,11 до 1,18, что согласуется с теоретическими представлениями о влиянии температуры на кинетику влагопереноса.

На третьем этапе использовали данные экспериментов с использованием предварительной озонвоздушной обработки для подбора параметра a_2^k , входящего в уравнение регрессии (2.39) для нахождения коэффициента $k_{инт}^{вл}$, а также параметров $a_3^{вл}$, $a_3^{т.вл}$, входящих в уравнения регрессии для нахождения коэффициента

влажностности $a_{\text{вл}}$ (2.37) и термовлажностности $a_{\text{т.вл}}$ (2.38). Полученные значения приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Значения параметров при различных режимах озонирования

Концентрация озона, мг/м ³	Время экспозиции, мин.	a_2^k	$a_3^{\text{вл}}$	$a_3^{\text{т.вл}}$
5	60	-0,0011798	2,9359	0,74001
9	60	0,0004036	2,8298	1,1026
16	60	-6,7904e-06	2,9428	0,84652
10	60	-0,00078998	3,1074	0,59241
10	120	0,00012522	2,9993	1,0529

Обработка данных показала, что для параметра a_2^k наилучшее приближение обеспечивает линейное уравнение следующего вида:

$$a_2^k = b_1 \cdot T + b_2 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}, \quad (2.40)$$

где b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

Результаты статистической обработки представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента (t_p)	Расчетный уровень значимости (p_p)
b_1	$-1,6402 \cdot 10^{-5}$	$5,3228 \cdot 10^{-6}$	-3,0815	0,017777
b_2	$6,7017 \cdot 10^{-7}$	$2,6848 \cdot 10^{-7}$	2,4962	0,041221

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,817$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{\text{кор}}^2 = 0,788$

Оба коэффициента уравнения регрессии оказались статистически значимыми ($p_p < 0,05$), что позволяет использовать полученную зависимость в модели.

Для параметров $a_3^{\text{вл}}$ и $a_3^{\text{т.вл}}$ разброс полученных значений оказался небольшим. Для количественной оценки возможности использования постоянных величин был проведен статистический анализ. Для каждого параметра проверяли нулевую гипотезу о нормальном распределении со средним значением, соответствующим выборке. Для всех трех параметров получены значения критерия принятия гипотезы $h = 0$ и уровня значимости $p = 0,99998$, что не дает оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении. Это подтверждает физическую достоверность измеренных величин, а также свидетельствует о слабой зависимости исследуемых параметров от концентрации озона и времени экспозиции. Анализ разброса значений относительно среднего показал, что отдельные значения параметров $a_3^{\text{вл}}$ и $a_3^{\text{т.вл}}$ выходят за пределы доверительных интервалов, рассчитанных для средних. Это не противоречит теории, поскольку доверительный интервал характеризует точность оценки среднего, а не разброс индивидуальных наблюдений. Средние значения полученных параметров модели и их доверительные интервалы по критерию Стьюдента представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Средние значения для параметров $a_3^{\text{вл}}$ и $a_3^{\text{т.вл}}$

Параметр	Среднее значение	Доверительный интервал
$a_3^{\text{вл}}$	2,96304	2,8372; 3,0888
$a_3^{\text{т.вл}}$	0,866888	0,6020; 1,1318

С учётом полученных коэффициентов уравнения (2.37–2.39) будут выглядеть следующим образом:

- коэффициент влагопроводности $a_{\text{вл}}$:

$$a_{\text{вл}} = 2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,96304 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}, \quad (2.41)$$

- коэффициент термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$:

$$a_{\text{т.вл}} = 1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,866888 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}, \quad (2.42)$$

- коэффициент интенсификации влагопереноса k_{umt}^{67} :

$$k_{umt}^{67} = 1,1521 - 0,00013186 \cdot T + C_{oz} \cdot t_{oz} \cdot (6,7017 \cdot 10^{-7} \cdot C_{oz} \cdot t_{oz} - 1,6402 \cdot 10^{-5} \cdot T). \quad (2.43)$$

Таким образом, были определены постоянные параметры модели (коэффициент теплопроводности λ и критерий фазовых превращений ε), получены статистически значимые регрессионные уравнения для коэффициентов влагопроводности $a_{вл}$ и термовлагопроводности $a_{т.вл}$, а также для коэффициента интенсификации влагопереноса k_{umt}^{67} . Все идентифицированные параметры статистически обоснованы и пригодны для расчета кинетики влагопереноса в период постоянной скорости сушки при различных температурах и режимах озонирования.

2.5 Определение ключевых параметров влагопереноса при конвективной сушке с предварительной озоновоздушной обработкой влажного зернового вороха для периода падающей скорости сушки

Для периода падающей скорости сушки параметры остаются такими же, как и для периода постоянной скорости сушки, за исключением коэффициента влагопроводности $a_{вл}$ и коэффициента термовлагопроводности $a_{т.вл}$. На основе структуры уравнений (2.37) и (2.38), полученных для периода постоянной скорости сушки, получены следующие зависимости:

$$a_{вл} = \frac{2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,9325 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}}{a_6 \cdot e^{\frac{a_5}{W_{min}^{a_7}}}}, \quad (2.44)$$

$$a_{т.вл} = \frac{1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,90741 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}}{a_9 \cdot e^{\frac{a_8}{W_{min}^{a_7}}}}, \quad (2.45)$$

где W_{min} – минимальное влагосодержание материала в период падающей скорости сушки, %.

В ходе идентификации по экспериментальным данным для периода падающей скорости сушки определялись параметры a_5 , a_6 , a_7 , a_8 . В результате идентификации получились значения, представленные в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Значения коэффициентов a_5 , a_6 , a_7 , a_8 , полученные при идентификации модели для периода падающей скорости сушки

Значения коэффициентов				
a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
2,7661	0,78633	0,1793	1,2247	1,013
2,7658	0,78598	0,22405	1,2249	1,001
2,7655	0,78587	0,23253	1,2249	1,011
2,7636	0,78546	0,2047	1,2249	1,012

Для обоснования возможности использования постоянных значений этих параметров был проведен статистический анализ. Предварительно, с помощью критерия Фишера, проверялась однородность дисперсий для каждого параметра. Расчетные значения критерия Фишера не превышали критических при уровне значимости 0,05, что подтверждает случайный характер разброса данных. Затем применяли двусторонний критерий Стьюдента. Для каждого параметра проверяли нулевую гипотезу о нормальном распределении со средним значением, соответствующим выборке. Для всех трех параметров получены значения критерия принятия гипотезы $h = 0$ и уровня значимости $p = 0,9998$, что не дает оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении. Анализ разброса значений относительно среднего показал, что только одно значение для параметра a_7 выходит за нижнюю границу доверительного интервала. Средние значения полученных параметров модели и их доверительные интервалы представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Средние значения параметров модели для периода падающей скорости сушки

Параметр	Среднее значение	Доверительный интервал
a_5	2,7626	2,7555; 2,7696
a_6	0,7843	0,7805; 0,7882
a_7	0,227	0,1901; 0,264
a_8	1,2239	1,2215; 1,2264
a_9	1	1,0004; 1,018

Для периода падающей скорости сушки были найдены уравнения регрессии для следующих параметров:

- коэффициент влагопроводности:

$$a_{\text{вл}} = \frac{2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,96304 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{0,7843 \cdot e^{\frac{2,7626}{W_{\text{мин}}^{0,227}}}}; \quad (2.46)$$

- коэффициент термовлагопроводности:

$$a_{\text{т.вл}} = \frac{1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,866888 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{e^{\frac{1,2239}{W_{\text{мин}}^{0,227}}}}. \quad (2.47)$$

Таким образом, были определены коэффициенты для экспоненциальных множителей в уравнениях (2.46) и (2.47), учитывающих снижение коэффициентов влагопроводности $a_{\text{вл}}$ и термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$ в период падающей скорости сушки. Статистический анализ подтвердил возможность использования средних значений (табл. 2.12) этих коэффициентов как постоянных. Полученные уравнения позволяют описывать кинетику влагопереноса на этапе падающей скорости сушки с учетом влажности материала.

2.6 Выводы по разделу

В результате теоретических исследований получены следующие основные результаты:

– на основе теории А.В. Лыкова получено дифференциальное уравнение

$$\frac{dw}{dt} = \frac{4a_{\text{вл}} \cdot \lambda \cdot w \cdot (k_{\text{инт}}^{\text{вл}} - 2)}{r_3^2 \cdot (\lambda + a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0)},$$

отличающееся наличием коэффициента интенсификации влагопереноса $k_{\text{инт}}^{\text{вл}}$, который зависит от температуры сушильного агента и параметров озоноздушной обработки и находится в пределах от 1,11 до 1,18;

– создана имитационная модель, реализующая полученное дифференциальное уравнение и разработанный трёхэтапный алгоритм параметрической идентификации, позволяющий последовательно определять базовые параметры (коэффициент влагопроводности $a_{\text{вл}}$, коэффициент термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$, коэффициент теплопроводности λ , критерий фазовых превращений ε), а также коэффициент интенсификации влагопереноса $k_{\text{инт}}^{\text{вл}}$ и его регрессионную зависимость от температуры сушильного агента и параметров озонирования, имеющую вид

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}};$$

– разработан алгоритм, учитывающий переход от удаления свободной влаги к удалению связанной влаги, который условно принят наступающим через 60 минут после начала процесса. В уравнения для коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности введён экспоненциальный множитель, описывающий снижение интенсивности переноса при уменьшении влажности:

$$a_{\text{вл}} = \frac{a_1^{\text{вл}} \cdot T + a_2^{\text{вл}} \cdot T^2 + a_3^{\text{вл}} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{a_6 \cdot e^{\frac{a_5}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}} \quad \text{и} \quad a_{\text{т.вл}} = \frac{a_0^{\text{т.вл}} + a_1^{\text{т.вл}} \cdot T + a_2^{\text{т.вл}} \cdot T^2 + a_3^{\text{т.вл}} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{a_9 \cdot e^{\frac{a_8}{W_{\text{мин}}^{a_7}}}};$$

– определены постоянные параметры модели, не зависящие от режима сушки: коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,177815$, критерий фазовых превращений $\varepsilon = 0,6857475$, статистический анализ которых подтвердил возможность их использования в качестве констант;

– установлены регрессионные зависимости для коэффициента влагопроводности $a_{\text{вл}}$ и термовлагопроводности $a_{\text{т.вл}}$ от температуры агента сушки и параметров озонирования для периодов постоянной и падающей скорости сушки, что позволило получить зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса от температуры агента сушки и от дозы озона:

$$k_{\text{инт}}^{\text{эл}} = 1,1521 - 0,00013186 \cdot T + C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}} \cdot (6,7017 \cdot 10^{-7} \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}} - 1,6402 \cdot 10^{-5} \cdot T).$$

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Проведенный анализ литературных данных выявил необходимость экспериментальной проверки ряда положений, поскольку научная база, посвящённая применению озонородушной смеси при сушке зерна и семян, остается недостаточно полной. Исходя из цели и задач диссертационной работы, а также принимая во внимание уже имеющиеся запатентованные технические решения, была составлена программа проведения экспериментальных исследований. Её основные положения заключаются в следующем:

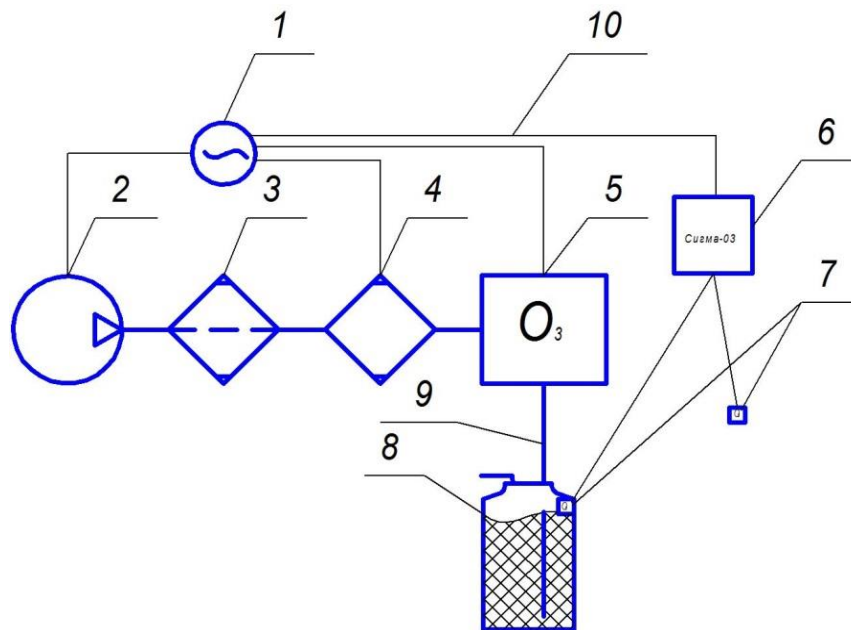
- подтвердить теоретические исследования по интенсификации влагопереноса в зерновке посредством применения предварительной озонородушной обработки;
- спроектировать конструктивно-технологическую схему зерносушилки с применением предварительной озонородушной обработки влажного зерна кукурузы;
- установить рациональные режимы предварительной озонородушной обработки влажного зернового материала перед сушкой;
- обосновать эффективность применения шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при использовании предварительной озонородушной обработки влажного зерна кукурузы перед сушкой;
- выявить влияние предварительной озонородушной обработки влажного зерна кукурузы на эффективность последующей сушки в шахтной зерносушилке;
- провести экспериментальные исследования, направленные на выявление влияния предварительного озонирования семян кукурузы перед сушкой на их посевные показатели.

Реализация данной программы исследований позволит решить поставленные задачи и подтвердить разработанные теоретические положения.

3.2 Лабораторные установки, приборы и оборудование

3.2.1 Лабораторная установка по обработке зернового материала озонородушной смесью

С целью исследования влияния предварительной обработки зерна озонородушной смесью была разработана лабораторная установка, технологическая схема которой включает следующие основные компоненты (рис. 3.1): воздушный компрессор 2, осушитель воздуха 4, озонатор 5, подключенный к источнику переменного тока 1, фильтр 3, газопроводы 9, электрические линии 10 и емкость 8 с датчиком озона 7.

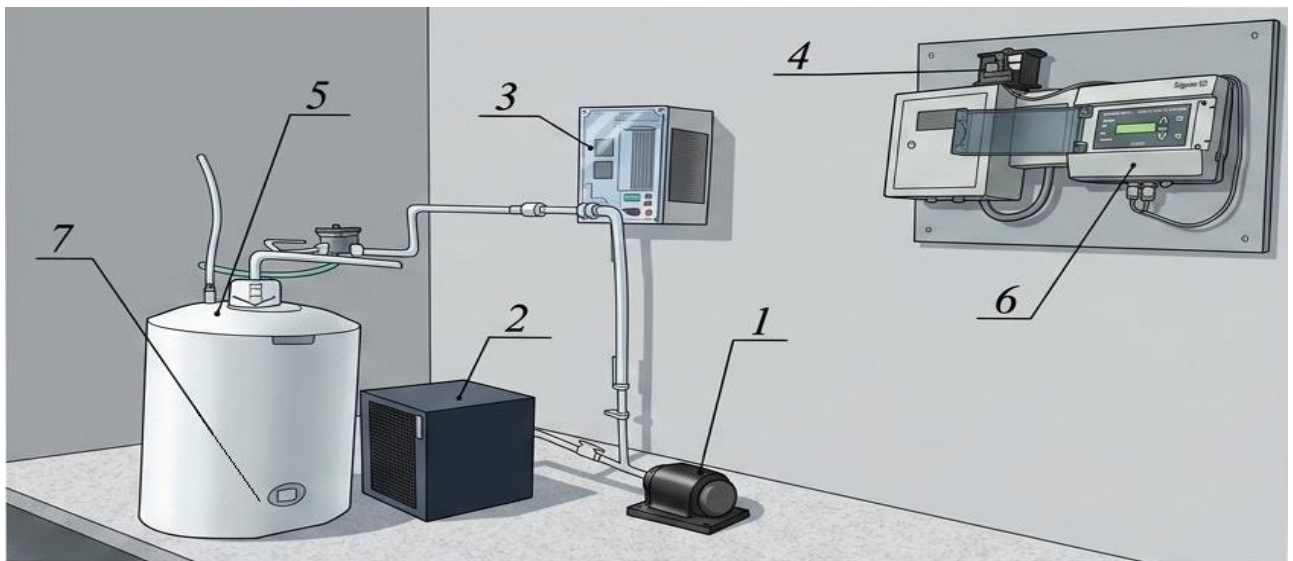


1 – источник переменного тока; 2 – компрессор; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – газоанализатор; 7 – датчики концентрации газа; 8 – ёмкость; 9 – газопроводы, 10 – электрические линии

Рисунок 3.1 – Принципиальная схема лабораторной установки по предварительной обработке зернового материала озонородушной смесью перед сушкой

Лабораторная установка для предварительного озонирования влажного зерна работает следующим образом. Атмосферный воздух, забираемый компрессо-

ром 2, очищается фильтрующим элементом 3 и под давлением до 0,2 МПа (2 атмосферы) поступает в рефрижераторный осушитель 4 для удаления избыточной влаги. Осушенный воздух поступает в озонатор 5, где под действием «тихого» электрического разряда, возникающего в керамических барьерных разрядниках, протекает реакция синтеза озона: $3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}_3$. Обогащенная озоном смесь подаётся в ёмкость 8 с зерном, а после прохождения через зерновой слой отводится в окружающую среду. Уровень концентрации озона в резервуаре контролируется датчиком 7.



1 – компрессор; 2 – осушитель воздуха; 3 – озонатор; 4 и 7 – датчик Сигма-03.ДЭ; 5 – ёмкость; 6 – газоанализатор «Сигма-03»

Рисунок 3.2 – Компоновочная схема лабораторной установки по предварительному озонированию влажного зернового материала перед сушкой

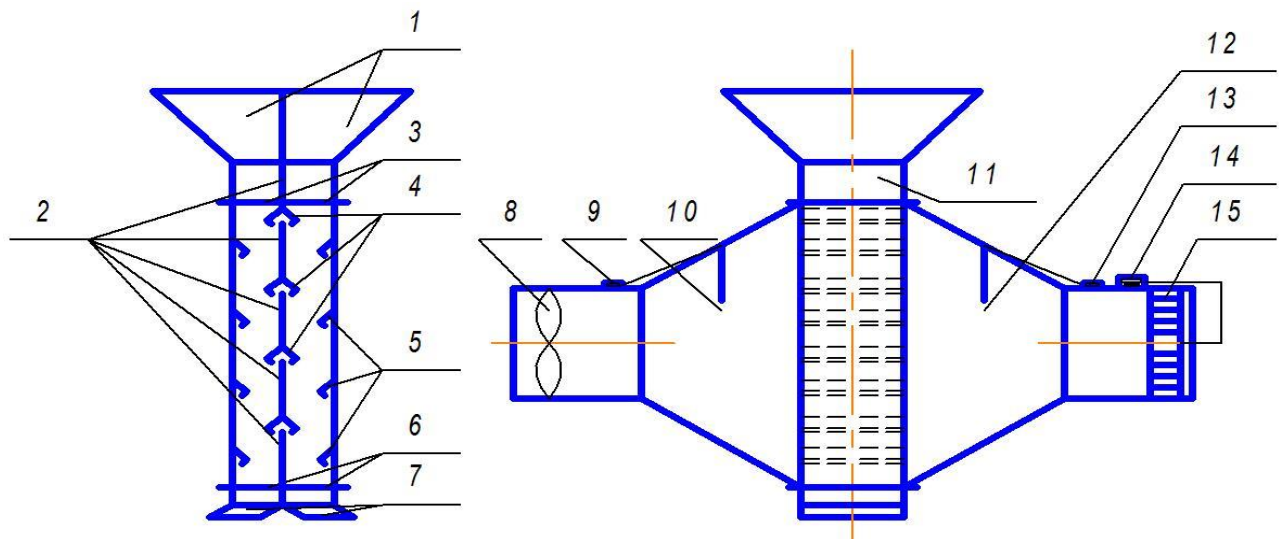
Текущее значение концентрации озона отображается на дисплее газоанализатора «Сигма-03». Данный прибор позволяет одновременно подключать до четырех электрохимических датчиков 4 (рис. 3.2). В случае превышения предельно-допустимого уровня содержания озона в воздухе устройство оповещает оператора звуковой сигнализацией. Датчики «Сигма-03.ДЭ» обеспечивают непрерывное преобразование измеряемой концентрации в электрический унифицированный аналоговый выходной сигнал силой тока 4...20 мА. Диапазон измерений прибора со-

ставляет $0...20 \text{ мг/м}^3$, при этом относительная погрешность не превышает 10% от регистрируемого значения.

Разработанная лабораторная установка позволяет обрабатывать влажный зерновой ворох с различным уровнем концентрации озона в озоновоздушной смеси, что позволит определить рациональные режимные параметры операции.

3.2.2 Лабораторная шахтная зерносушилка

Для оценки эффективности предварительного озонирования влажного зерна была сконструирована лабораторная шахтная зерносушилка, технологическая схема которой представлена на рисунке 3.3.



- 1 – двухсекционный загрузочный бункер; 2 – перегородки; 3 – загрузочные заслонки;
 4 – подводящие короба горячего воздуха; 5 – отводящие короба отработанного воздуха;
 6 – выгрузные заслонки; 7 – отводящие патрубки высушенного зерна; 8 – вытяжной вентилятор;
 9 и 13 – датчики температуры и влажности; 10 – камера влажного воздуха;
 11 – шахта, разделённая на два независимых отсека; 12 – камера горячего воздуха;
 14 – терморегулятор; 15 – электрический нагревательный элемент

Рисунок 3.3 – Схема лабораторной шахтной зерносушилки

Её ключевой особенностью является рабочая шахта 11, разделенная перегородками 2 на две независимые секции. Благодаря этому можно в одинаковых

условиях одновременно проводить сушку предварительно озонированного зерна и контрольного образца. Загрузка материала через заслонки 3 и выгрузка через заслонки 6 осуществляется раздельно для каждого отсека рабочей шахты 11. Нагрев сушильного агента происходит в камере 10 с помощью электрического нагревателя 15, а его температуру поддерживает терморегулятор 14 DM-W3001. Отвод влажного воздуха обеспечивает вентилятор 8. Подача горячего и отвод отработанного воздуха внутри шахт организованы через расположенные в шахматном порядке подводящие 4 и отводящие 5 короба. Высушенное зерно из каждого отсека выводится через отдельные патрубки 7.

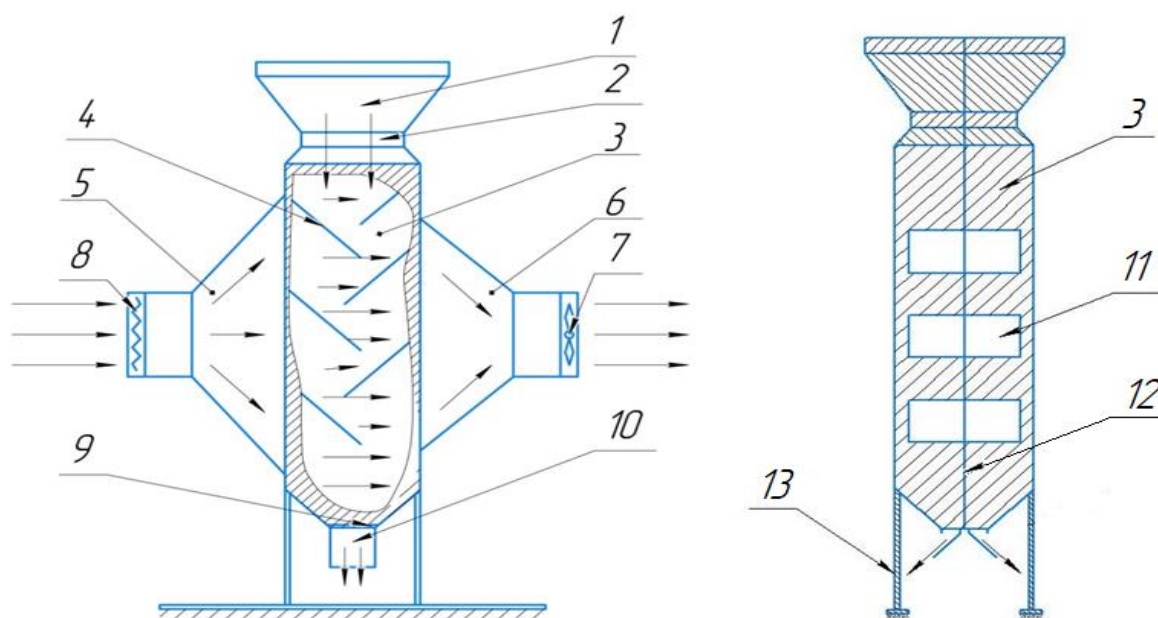
Проведение исследований на шахтной зерносушилке начинается с подготовки материала. Для этого отбираются две идентичные по объему и исходным характеристикам партии влажного зерна. Одна партия подвергается предварительной озоноздушной обработке в лабораторной установке по обработке зернового материала озоноздушной смесью, вторая – остается без обработки в качестве контрольного образца.

Процесс работы установки начинается с раздельной загрузки: в первый отсек бункера 1 (рис. 3.3) загружают проозонированный зерновой ворох, во второй – контрольный, необработанный образец. Раздельные перегородки 2 предотвращают перемешивания партий. После открытия загрузочных заслонок 3 зерновая масса заполняет обе рабочие шахты 11. Количество материала в бункере 1 должно обеспечивать непрерывность процесса, компенсируя выгружаемые порции. Включение нагревателя 15 и вытяжного вентилятора 8 инициирует процесс сушки: нагретый воздух из подводящих коробов 4 камеры 12 проходит сквозь слой зерна, прогревает его и способствует перемещению влаги из центра зерновки к её поверхности. Отработанный влажный воздух отводится через отводящие короба 5 в камеру 10. В процессе разгрузки зерно опускается в нижнюю часть шахты, где через выгрузные заслонки 6 и патрубки 7 отбираются образцы для анализа. Параметры сушильного агента фиксируются термометрами-гигрометрами 9 и 13, а предотвращение перегрева осуществляется терморегулятором, который при необходимости отключает или включает нагревательный элемент 14.

Лабораторная шахтная зерносушилка оснащена оборудованием, которое позволяет отслеживать температуру как зернового материала, так и сушильного агента в рабочих камерах, измерять относительную влажность воздуха в конце технологического процесса, а также определять влажность самого зерна или семян. Следовательно, разработанная лабораторная зерносушилка позволит производить сушку двух партий зерна кукурузы в равных условиях, не смешивая их, что позволит определить эффективность предварительного озонирования влажного зернового вороха.

3.2.3 Лабораторная жалюзийная зерносушилка

Лабораторная зерносушилка жалюзийного типа (рис. 3.4) была разработана для проведения сравнительных исследований в идентичных условиях, обеспечивая одновременную сушку контрольного и предварительно озонированного влажного зерна.



- 1 – загрузочный бункер; 2 – заслонка подачи зерна; 3 – сушильная шахта; 4 – жалюзи;
 5 – камера горячего воздуха; 6 – камера холодного воздуха; 7 – вентилятор;
 8 – электронагреватель; 9 – заслонка разгрузки, 10 – разгрузочные каналы; 11 – отверстия для движения воздуха; 12 – перегородки; 13 – рама

Рисунок 3.4 – Схема лабораторной жалюзийной зерносушилки

Ключевым элементом данной зерносушилки – жалюзийные секции, которые обеспечивают равномерное распределение потока горячего воздуха по всему объему зерновой массы. Конструктивно установка состоит из загрузочного бункера 1, подающих заслонок 2, сушильной шахты 3, жалюзи 4, камер горячего 5 и холодного 6 воздуха, вентилятора 7, электронагревателя 8, разгрузочных заслонок 9, каналов для выгрузки 10, воздухопроводных отверстий 11, разделительных перегородок 12 и несущей рамы 13. Комплекс контрольно-измерительных приборов на сушилке позволяет фиксировать температуру зерна и сушильного агента в камерах, определять относительную влажность воздуха, а также измерять влажность самого зернового материала.

Принцип работы лабораторной жалюзийной зерносушилки построен следующим образом. Вначале отбираются две партии влажного зерна, одна из которых озонируется в лабораторной установке по обработке влажного зернового материала озоновоздушной смесью, а вторая служит контрольным образцом и не подвергается никакому воздействию. Далее производится раздельная загрузка: проозонированный зерновой ворох помещают в первый отсек загрузочного бункера 1, а контрольную партию – во второй. Специальные перегородки 12 исключают возможность смешивания материалов. После открытия загрузочных заслонок 2 зерно поступает в сушильные шахты 3. При этом объем зерна в бункере постоянно поддерживается для компенсации отбора проб в ходе эксперимента.

После включения нагревательного элемента 8 (рис. 3.4) и вытяжного вентилятора 7 начинается процесс сушки. В шахтах 3 влажный зерновой материал взаимодействует с нагретым сушильным агентом, поступающим из камеры 5. Это приводит к нагреву зерна до температуры, инициирующей активное влагоотделение. При этом молекулы воды внутри каждой зерновки перемещаются от ее центра к поверхности. Проходящий через слой нагретый воздух снижает общую влажность материала, а отработанный поток, насыщенный паром, отводится в камеру холодного воздуха 6. По мере продвижения вниз подсушенный материал достигает разгрузочного узла, где через заслонки 9 и каналы 10 отбираются пробы для анализа. Параметры агента сушки в камерах 5 и 6 контролируются термомет-

рами-гигрометрами, а терморегулятор управляет нагревателем 8, предотвращая перегрев зерна. Для обеспечения полной сопоставимости результатов выгрузка образцов из обеих шахт производится одновременно, равными порциями, что гарантирует абсолютную идентичность условий для озонированного и контрольного образцов.

Разработанная и изготовленная лабораторная жалюзийная зерносушилка позволяет производить сушку двух партий зерна в равных условиях, не смешивая их, что позволит определить эффективность предварительного озонирования влажного зернового вороха.

3.2.4 Оборудование, используемое при проведении исследований

Для определения влажности зерна в отобранных пробах применяется портативный электронный влагомер «Wile-65» (рис. 3.5), включенный в Государственный реестр средств измерений РФ.



Рисунок 3.5 – Портативный влагомер зерна и семян сельскохозяйственных культур «Wile-65»

Измерение занимает около 5 секунд. Прибор способен измерять влажность у широкого спектра культур: зерновых (пшеница, рожь, ячмень, овёс, кукуруза, гречиха, просо, сорго), зернобобовых (горох, соевые бобы), масличных (подсолнечник, рапс, лён, горчица), а также муки и отрубей. В память устройства занесены калибровочные данные для 16 видов культур с возможностью дополнительной корректировки. Для анализа требуется проба объемом 90 см³. Влагомер имеет русскоязычный интерфейс, компактные размеры 178×68×68 мм и массу 0,8 кг. Диапазоны измеряемых значений: для зерновых культур – 8...35%, для зернобобовых – 8...40%, для масличных – 5...25%. Погрешность прибора составляет 0,5...1,5%, но не более 5% от измеряемой величины. Функция автоматического расчёта среднего значения по ряду замеров позволяет снизить возможную погрешность измерений.

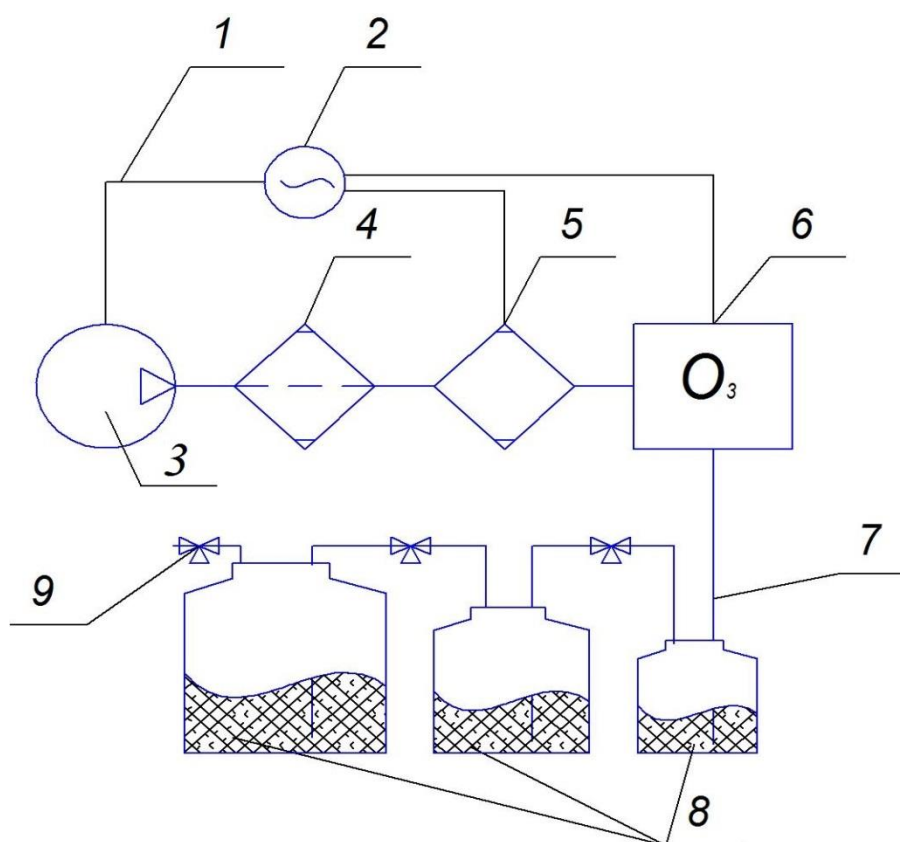
Принцип действия влагомера «Wile-65» является диэлькометрическим, то есть основан на корреляции между влажностью материала и его диэлектрической проницаемостью. Измеряемая проба помещается в колбу с герметичной винтовой крышкой. Датчик прибора генерирует высокочастотное переменное электрическое поле, воздействующее на образец. Степень затухания сигнала зависит от вида культуры (её плотности) и исходного содержания влаги. Анализируя изменения напряженности поля, прибор по специальному алгоритму, адаптированному для каждой культуры, вычисляет и выводит значение влажности.

3.3 Методика проведения экспериментальных исследований

3.3.1 Методика экспериментальных исследований по обоснованию рациональных режимов озонозвоздушной обработки влажного зерна кукурузы перед последующей сушкой

Обработку влажного зерна озонозвоздушной смесью осуществляли с помощью лабораторной установки, в состав которой входят (рис. 3.6): компрессор 3, воздушный фильтр 4, осушитель 5, регулируемая озонаторная установка 6, систе-

ма газопроводов 7, источник переменного тока 2 с электрическими линиями 1 и четыре ёмкости 8 для размещения зерна. Использование регулируемого озонатора позволяет гибко изменять параметры процесса озонирования.



1 – электрические линии; 2 – источник переменного тока; 3 – воздушный компрессор;
4 – фильтр; 5 – осушитель воздуха; 6 – озонаторная установка; 7 – газопроводы; 8 – емкости;
9 – трехходовой кран

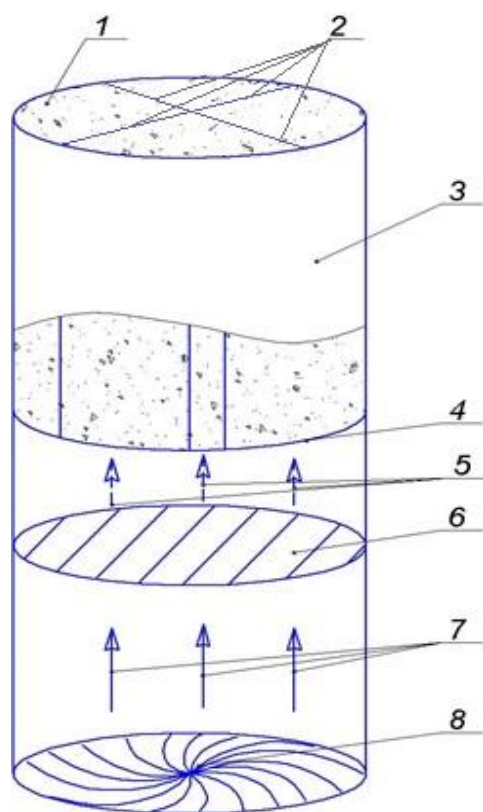
Рисунок 3.6 – Схема лабораторной установки по озонированию влажного зерна перед сушкой

Принцип работы лабораторной установки заключается в следующей последовательности операций. Компрессор 3 (рис. 3.6) нагнетает атмосферный воздух через фильтр 4 в осушитель 5, где происходит удаление избыточной влаги. Затем осушенный воздух поступает в озонатор 6, где обогащается озоном. Под действием давления, создаваемого компрессором 3, полученная озоновоздушная смесь по газопроводам последовательно подается в рабочие емкости 8, имеющие увеличивающийся объем по мере продвижения газа. При этом между резервуарами установлен трехходовой кран 9, сбрасывающий часть озона в атмосферу для сниже-

ния его концентрации в следующем объеме. Тем самым одновременно можно обрабатывать один и тот же материал с разной дозой озонозооной обработки. Это необходимо для выявления наиболее рационального режима озонирования.

Концентрацию озона в процессе обработки измеряли йодометрическим методом [43, 118]. Озонирование зерна проводили в течение 60, 120 и 180 минут. Аналитически установлено, что для эффективной сушки за счет активизации биохимических процессов необходимо поддерживать концентрацию озона более 5 мг в кубическом метре [52, 111, 117].

После озонозооной обработки влажных зерен их помещали в лабораторную установку для сушки, схема которой представлена на рисунке 3.7.



- 1 – влажный зерновой материал; 2 – перегородки; 3 – корпус; 4 – решетчатая поверхность;
 5 – нагретый воздух; 6 – нагревательный элемент; 7 – атмосферный воздушный поток;
 8 – вентилятор

Рисунок 3.7 – Схема лабораторной установки по сушке влажных зерен

Лабораторная установка для сушки влажного зерна включает цилиндрический корпус 3 (рис. 3.7), разделенный внутри на четыре одинаковых отсека пере-

городками 2. В трех камерах размещается предварительно озонированное зерно с разными режимами, а четвертая служит для контрольного образца, не подвергавшегося обработке. В нижней части смонтирован вентилятор 8, подающий атмосферный воздушный поток 7 через нагревательный элемент 6. Далее нагретый сушильный агент проходит сквозь решетчатую поверхность 4 и пронизывает слой влажного зернового материала 1, обеспечивая идентичные условия для всех образцов. Процесс нагрева продолжался в течение четырех часов. Влажность зерна во всех отсеках контролировали каждые 15 минут с помощью влагомера «Wile-65».

3.3.2 Методика экспериментальных исследований по определению эффективности шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при предварительной озоновоздушной обработке зерна кукурузы

Для выявления более перспективного типа зерносушилки при применении предварительного озонирования влажного зернового вороха в буферной емкости провели соответствующие исследования. Для этого были изготовлены лабораторные шахтная и жалюзийная зерносушилки, описанные в подразделах 3.2.2 и 3.2.3. Для проведения эксперимента необходимо 200...240 кг материала, который следует в равных долях разделить на четыре части. Обработку экспериментальной партии озоновоздушной смесью проводили на установке, описанной в подразделе 3.2.1.

Непосредственно перед завершением озоновоздушной обработки опытной партии зерна контрольный образец загружали в сушильные установки. Как только озонирование завершилось, рабочие шахты заполняли обработанным материалом. Далее включали нагревательный элемент и вытяжной вентилятор, что инициировало процесс сушки. В загрузочном бункере сохраняли резерв зерна, объем которого компенсирует последующий отбор проб для анализа. Все измеряемые параметры фиксировали с периодичностью 30 минут, выполняя каждое измерение в трехкратной повторности для обеспечения статистической достоверности.

Ключевым требованием для сохранения посевных качеств зерна в процессе сушки является точное регулирование температуры. Определены следующие максимально допустимые режимные параметры: для семян пшеницы, ячменя, овса, ржи, гречихи, подсолнечника и проса температура материала не должна превышать 40 °С, а температура сушильного агента – 70 °С. Для зерна кукурузы, вики, гороха, фасоли, чечевицы, риса и люпина эти ограничения составляют соответственно 35 °С и 60 °С. Если начальная влажность зерна превышает 19%, то процесс следует разбить на несколько этапов. При первом цикле максимальная температура сушильного агента снижается на 10 °С, а семенного материала – на 5 °С. Кроме того, за один цикл сушки не допускается снижать влажность зерна более чем на 4...6%.

3.3.3 Методика экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса последующей сушки

Озоновоздушную обработку влажного зернового вороха проводили на лабораторной установке, описанной в разделе 3.2.1 (рис. 3.1). Используемый в экспериментах озонатор регулируемый, что позволяет изменять режим озонирования. В процессе обработки концентрацию озона определяли йодометрическим способом. Озонирование проводилось в течение 1 часа с концентрациями 2, 5, 9, 11, 16 и 18 мг/м³, что соответствует дозам озоновоздушной обработки 120, 300, 540, 660, 960 и 1080 мин·мг/м³. Эти значения, а также выбранные температуры сушильного агента были определены планом эксперимента, построенным методом латинского гиперкуба (рис. 3.8), который позволяет при ограниченном числе опытов равномерно покрыть исследуемую область. Согласно этому методу, были получены 6 точек, которые обладали хорошим заполнением факторного пространства, что видно на рисунке 3.8. Точками показаны выбранные сочетания концентрации

озона и температуры сушильного агента, обеспечивающие равномерное покрытие области исследования.

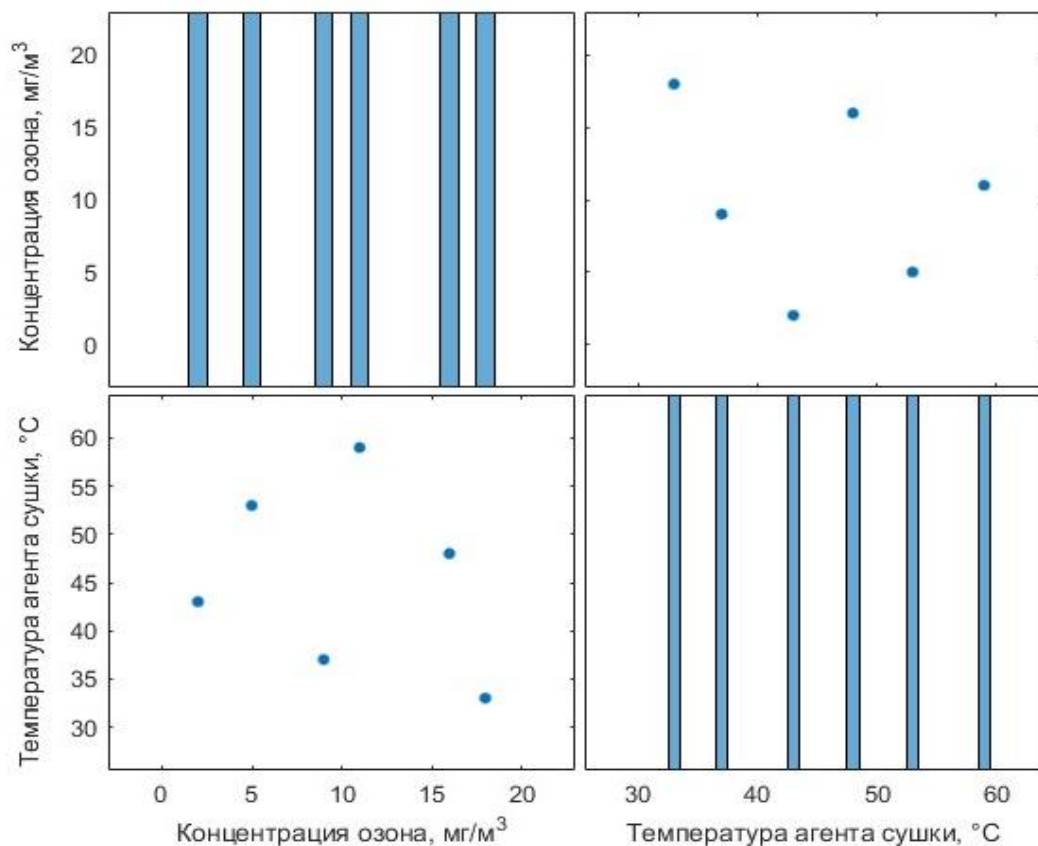


Рисунок 3.8 – Распределение экспериментальных точек при исследовании влияния концентрации озона и температуры на процесс сушки

После озоноздушной обработки влажные зерна помещали в лабораторную шахтную зерносушилку, описанную в разделе 3.2.2 (рис. 3.3). Для проведения эксперимента требовалось 100...120 кг материала, который разделяли в равных долях на две части. Температуру агента сушки устанавливали в соответствии с планом эксперимента в зависимости от концентрации озона. Каждые 30 минут производили замер влажности зерна всех образцов в трехкратной повторности.

После завершения эксперимента зерносушилку полностью разгружали, при этом опытную и контрольную партии зерна сохраняли отдельно для последующего анализа. Если по завершении эксперимента влажность зерна или семян превышала установленные кондиции, то проводили второй цикл сушки, включая этап предварительного озонирования материала.

3.3.4 Методика экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой на их посевные качества

В ходе исследований отбирали образцы семян для оценки влияния озонОВОЗДУшной обработки на их посевные качества после теплового воздействия в процессе сушки. Анализ проводился с использованием оборудования лаборатории массовых анализов ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян кукурузы определяли в соответствии с ГОСТ 12038-84 [28]. Для этого отбирали четыре пробы по 50 зерен в каждой. Семена размещали зародышами вниз на увлажненной фильтровальной бумаге размером 10x100 см (± 2 см), отступив 2...3 см от верхнего края. Сверху накрывали вторым аналогичным увлажненным листом, после чего оба слоя аккуратно сворачивали в рулон и устанавливали вертикально в растительную. Проращивание проводили в термостате ТСО-1/80 СПУ при постоянной температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$, которую контролировали трижды в сутки.

Энергию прорастания семян учитывали на четвертые сутки, лабораторную всхожесть – на седьмые. К нормальным относили проростки с крепкими корешками длиной не менее половины зерна. Невсхожими считали семена ненормально проросшие, твердые, загнившие с почерневшим зародышем, а также те, у которых не образовались корешки или имелись глубокие трещины, затрагивающие проводящие ткани.

3.4 Методика обработки экспериментальных данных

Обработку экспериментальных данных выполняли с использованием методов математической статистики. Основными задачами являлись: оценка достоверности полученных результатов, выявление наличия или отсутствия системати-

ческих ошибок, а также построение регрессионных моделей для описания зависимости исследуемых параметров от различных факторов.

Для проверки гипотезы о случайном характере ошибок измерений применялся критерий Фишера. Нулевая гипотеза о равенстве дисперсий позволяла установить, что разброс экспериментальных данных обусловлен случайными факторами, а не систематическими погрешностями. Если расчетное значение не превышало критического при уровне значимости 0,05, то дисперсии признавались однородными, что подтверждало случайную природу ошибок.

Для статистической проверки гипотез о средних значениях применяли критерий Стьюдента. Проверяли нулевую гипотезу о нормальном распределении со средним значением, соответствующим выборке. Результат проверки представлялся в виде критерия принятия гипотезы h . При $h = 0$ – гипотеза о нормальном распределении не отвергалась, а при $h = 1$ – нулевая гипотеза отвергалась. Дополнительно вычисляли уровень значимости p , который характеризует вероятность получения наблюдаемых результатов при условии истинности нулевой гипотезы. Чем больше p , тем лучше данные согласуются с гипотезой.

Для количественного описания взаимосвязи между переменными применяли методы регрессионного анализа. Поиск коэффициентов модели выполняли методом наименьших квадратов. Оценку качества регрессии проводили по следующим критериям: коэффициент детерминации, критерий Фишера, а также двусторонний критерий Стьюдента для оценки значимости отдельных коэффициентов. Модель признавали значимой, если анализ отдельных коэффициентов по критерию Стьюдента показывал их статистическую значимость в пределах уровня значимости 0,05. Изначально рассматривали линейную модель в виде полинома 1-й степени. Если в ходе анализа устанавливалось, что для ряда зависимостей коэффициент детерминации оказывался низким, а уровень значимости по критерию Стьюдента превышал 0,1, то это свидетельствовало об отсутствии линейной связи между рассматриваемыми величинами. В таких случаях для описания данных применялись линейная регрессия в виде квадратичных полиномов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОЗОНИРОВАНИЯ ВЛАЖНОГО ЗЕРНА КУКУРУЗЫ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ПРОЦЕССА СУШКИ

4.1 Обоснование разработки конструкции применения предварительной озоновоздушной обработки влажного зернового вороха перед сушкой зерна

Для определения охраноспособности и патентной чистоты разрабатываемых конструкций для сушки зерна с применением озоновоздушной смеси был выполнен патентный поиск, представленный в таблице 4.1. Проведенный анализ позволяет установить чистоту предлагаемой конструкции по научно-техническим документам по интересующей нас проблеме. Кроме того, проведенный патентный поиск позволил выявить ключевые научно-технические тенденции, на основе которых будут определены основные направления дальнейшей конструктивной проработки устройства для сушки зерна и семян зерновых культур с применением озоновоздушной смеси, что позволит повысить его эффективность, экологичность и конкурентоспособность.

Таблица 4.1 – Патентный поиск конструкций для сушки зерна

Предмет поиска (объект и его составные части) и автор	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, классификация	Сущность заявленного технического решения
Способ сушки семян зерновых культур. Глущенко Н.А., Глущенко Л.Ф., Троцкая Т.П. [4]	SU 1 095 899 A1, МПК A01F 25/08	Способ сушки семян зерновых культур, включающий пропускание сквозь их слой сушильного агента, отличающийся тем, что с целью интенсификации процесса сушки и снижения энергоемкости в качестве сушильного агента используют озоновоздушную смесь

Предмет поиска (объект и его составные части) и автор	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, классификация	Сущность заявленного технического решения
Способ сушки зерновых культур. Бородин И.Ф., Ленский Л.А., Фомичев М.М., Ткачев Р.В. [70]	RU 2 161 398 C1 МПК A01F 25/08	Способ сушки зерновых культур, заключающийся в том, что сквозь зерновой слой пропускают электроактивированный сушильный агент, содержащий озон-воздушную смесь и ионы, а также воздействуют на слой зерна постоянным электрическим полем, отличающийся тем, что дополнительно используют знакопеременное электрическое поле, которым воздействуют на слой зерна одновременно с постоянным электрическим полем, а процессы воздействия электроактивированного сушильного агента и электрических полей на зерновой слой осуществляют циклически, отдельно во времени
Способ сушки и хранения зерна и устройство для его осуществления. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. [72]	RU 2 228 602 C1, МПК A01F 25/08	Устройство для сушки и хранения зерна, содержащее кольцевую рабочую камеру с внутренней и внешней перфорированными стенками, загрузочное и разгрузочное средства, озонатор, вентилятор, отличающееся тем, что рабочая камера снабжена кольцевой воздухопроницаемой стенкой, разделяющей ее полость на внешнюю камеру подсушки с зазором для прохода зерна и внутреннюю камеру досушки с радиусом наружной стенки. В качестве активизирующих или ингибирующих газовых компонентов используют озон
Способ сушки и хранения зерна и устройство для его осуществления. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. [73]	RU 2 243 463 C2, МПК F26B3/04 F26B9/02	Устройство для сушки и хранения зерна, содержащее транспортеры, воздухораспределительные каналы, вентилятор и калорифер, отличающееся тем, что воздухораспределительные каналы на входе подключены к озонатору и размещены на полу зернохранилища с шагом T , равным: $T = 2[H - L/2tg(90^\circ - \alpha_p/2)]/[tg\alpha + tg(90^\circ - \alpha_p/2)]$

Предмет поиска (объект и его составные части) и автор	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, классификация	Сущность заявленного технического решения
Способ и комплекс для обработки зерна, семян или плодово-овощной продукции озоном. Лужков Ю.М., Соломонов Ю.С. [74]	RU 2 414 113 C1, МПК A01C 1/00	Способ обработки зерна, семян или плодово-овощной продукции озоногазовой смесью, отличающийся тем, что массу зерна, семян или плодово-овощной продукции формируют в виде насыпи, замкнутый объем создают путем закрытия насыпи чехлом из эластичного газонепроницаемого материала, повторяющим их форму, осуществляют закрепление нижней части чехла посредством груза, огибая периметр основания насыпи и обеспечивая его плотное прилегание к поверхности, на которой размещена насыпь, с образованием воздушного промежутка между чехлом и насыпью, перфорированную трубу размещают в насыпи горизонтально, располагая ее на равном расстоянии от краев насыпи, причем подачу озоногазовой смеси в замкнутый объем и отбор вторичной озоногазовой смеси для повторного использования осуществляют по гибким эластичным озоностойким подводным и отводящим рукавам, проходящим через выполненные в материале чехла отверстия, края которых плотно прилегают к рукавам, причем после окончания процесса озонирования проводят снятие чехла и осуществляют сушку продукции активным вентилированием через перфорированную трубу
Способ сушки зернового материала. Баскаков И.В., Оробинский В.И., Гиевский А.М., Гулевский В.А., Чернышов А.В., Чернова О.В. [75]	RU 2 709 712 C1, МПК A01F 25/08	Способ сушки зернового материала, заключающийся в последовательном озонировании и нагреве, отличающийся тем, что озонирование и нагрев осуществляют отдельно за несколько циклов, при этом озонирование проводят в буферном металлическом коническом силосном зернохранилище, подавая озоновоздушную смесь снизу силоса с концентрацией озона в диапазоне 5...20 мг/м ³ в течение часа с момента появления газа в верхних слоях зернового материала, а нагрев осуществляют воздухом с температурой 45...60 °С до уменьшения исходной влажности зернового материала.

Анализ представленных патентов показал, что основными недостатками рассмотренных документов являются сложность устройства, высокий уровень энергопотребления, неравномерность сушки, недостаточная надежность, ограниченность применения, чувствительность к внешним условиям и отсутствие автоматизации. Наиболее перспективной конструкцией является оборудование из па-

тента РФ на изобретение № 2709712 «Способ сушки зернового материала». Поэтому данное устройство примем за прототип и усовершенствуем с целью повышения уровня автоматизации и интенсификации процесса сушки с предварительным озонированием влажного зернового вороха.

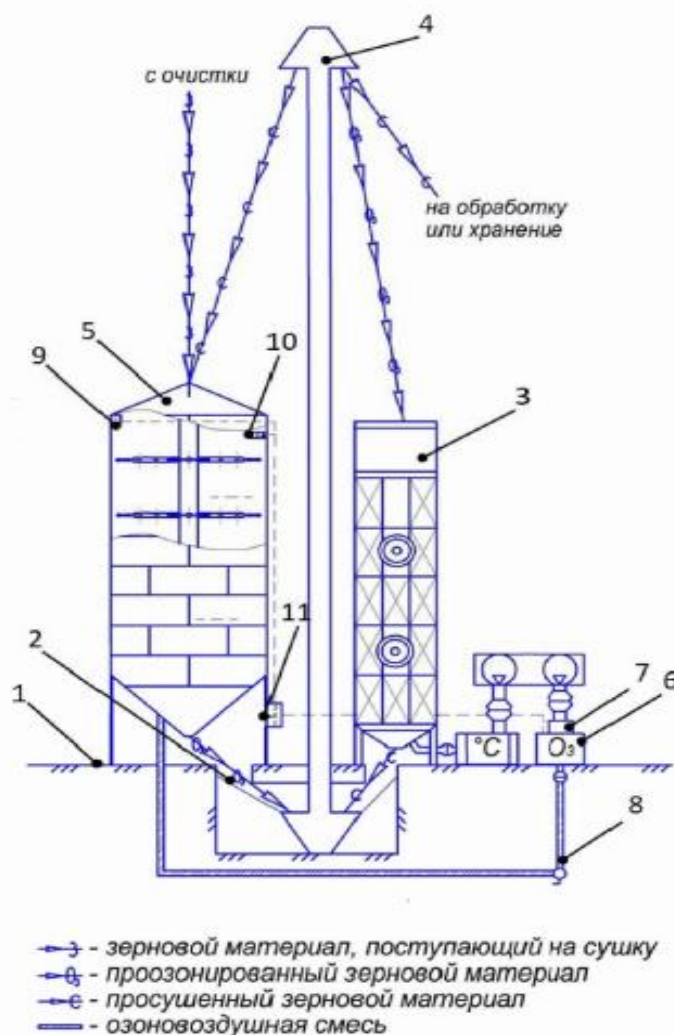
Таким образом, проведенный патентный поиск и оценка охраноспособности позволили выявить перспективное направление для научно-исследовательской деятельности в данной области, проверить новизну технического решения и патентную чистоту, а также сформировать базу знаний по существующей патентной информации. Было установлено, что необходимо создание устройства для сушки зернового материала с применением предварительного озонирования влажного зернового вороха, которое будет отличаться равномерностью процесса сушки, высокой надежностью, универсальностью применения, устойчивостью к внешним условиям, легкостью в эксплуатации. Это позволит значительно повысить эффективность и экономичность данного процесса. В качестве прототипа следует принять патент РФ на изобретение № 2709712 «Способ сушки зернового материала».

4.2 Проектирование конструктивно-технологической схемы зерносушилки с применением предварительной озоновоздушной обработки влажного зерна кукурузы

Реализация способа сушки зернового материала, запатентованного в ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (патент РФ на изобретение № 2709712) [75], показала, что наблюдается снижение эффективности и интенсификации влагопереноса, а также повышенный расход озона при обработке влажного вороха. Основная причина состоит в отсутствии контроля над влажностью зерна на входе в буферный силос. Устранить выявленный недостаток можно путем внесения усовершенствований в конструкцию зерносушильного комплекса.

Технический результат достигается тем, что устройство, включающее металлическое конусное зернохранилище с системой озонирования, состоящее из

озонатора, датчиков определения концентрации озона, воздухопроводов, компрессора, тихоходной нории, отличается дополнительно установленным на входе в зернохранилище поточным влагомером и электронным блоком управления. Это позволяет контролировать режим работы озонатора на основании реальных данных. При этом электронный блок управления имеет возможность обмениваться сигналами через кабель с поточным влагомером и датчиками.



1 – бетонное основание; 2 – приемная горловина нории; 3 – зерносушилка; 4 – нория;
 5 – буферный силос; 6 – озонатор; 7 – компрессор; 8 – трубопровод; 9 – датчик определения
 концентрации озона; 10 – влагомер; 11 – электронный блок управления

Рисунок 4.1 – Зерносушильный комплекс с предварительной озоновоздушной обработкой влажного зернового вороха

Разработанное устройство зерносушильного комплекса (рис. 4.1) состоит из бетонного основания 1, на котором закреплены зерносушилка 3, озонатор 6 и

компрессор 7, связанные трубопроводом 8 с конусным зернохранилищем 5. Приёмная горловина 2 с тихоходной норией 4 расположены между зерносушилкой 3 и конусным зернохранилищем 4. Во внутренней части зернохранилища закреплены датчик определения концентрации озона в озоновоздушной смеси 9 и поточный влагомер 10, а на внешней стенке – электронный блок управления 11.

Рассмотрим принцип работы устройства. Влажный зерновой материал поступает в коническое зернохранилище 5 (рис. 4.1), где происходит его накопление и отволаживание. Влагомер 10 отслеживает текущие показатели влажности и температуры зернового материала, передавая первичный сигнал в электронный блок управления 11. На основе полученной информации формируются управляющие сигналы, которые передаются компрессору 7 и озонатору 6. Генерируемая озоновоздушная смесь необходимой концентрации по трубопроводу 8 подается в нижнюю часть зернохранилища, вытесняя более легкий воздух. Датчик определения концентрации озона 9 регистрирует заполнение зернохранилища газом и сигнализирует электронному блоку управления 11. В случае превышения установленного показания происходит отключение озонатора 6 и компрессора 7. После завершения озонирования зерно самотеком разгружается в приёмную горловину 2 тихоходной нории 4, которая подает его в зерносушилку 3. Просушенный материал выгружается самотеком в приёмную горловину 2 нории 4, которая поднимает его для дальнейшего распределения.

Результаты аналитических исследований [18] дают основание заключить, что стали, применяемые при изготовлении металлических силосов и зерносушилок, обладают достаточной стойкостью к озону, и поэтому опасений по поводу сокращения срока их службы не возникает.

Таким образом, устройство для сушки зернового материала, включающее металлическое конусное зернохранилище с системой озонирования, состоящей из озонатора, датчиков определения концентрации озона, воздухопроводов, компрессора, тихоходной нории, отличается тем, что оно дополнительно снабжено на входе в зернохранилище поточным влагомером и электронным блоком управления, контролирующим работу системы озонирования на основании реальных данных.

Предложенная конструкция имеет признаки интеллектуальной собственности, что позволило запатентовать данное техническое решение. Патент РФ на полезную модель № 226053 [78] подтверждает новизну и оригинальность устройства для сушки зернового материала.

4.3 Результаты экспериментальных исследований по обоснованию рациональных режимов озонирования влажного зерна кукурузы перед его сушкой

Характер воздействия озона на зерновку существенно меняется в зависимости от его концентрации и продолжительности контакта. Небольшое содержание газа в воздухе (до 5 мг/м^3) оказывает терапевтический эффект. Применительно к зерну это отражается в расширении межклеточных мембран, улучшении микроциркуляции веществ и обменных процессов, повышении сохранности качественных показателей. Как правило, в данном случае протекают благоприятные процессы в зерновке. Повышение концентрации озона активизирует сильные окислительные и бактерицидные свойства газа. Это полезно при снижении уровня токсинов, уничтожении вредоносных микроорганизмов, насекомых и грызунов, а также предотвращении развития плесени и бактерий. При этом наряду с положительными сторонами имеются и серьезные недостатки. Высокие концентрации озона наносят вред любым живым организмам, вызывая оксидативный стресс, формируя свободные радикалы, которые приводят к повреждению клеток. Продолжительное воздействие газа на зерно окажет негативное действие на посевные качества. Таким образом, ключевым моментом является грамотный выбор режима работы озонаторного оборудования, обеспечивающего полезный эффект для процесса сушки. При этом обработка должна быть максимально безопасна для человека и сохранять качество зернового материала. Следовательно, интерес заслуживают относительно небольшие концентрации озона, способствующие интенсифи-

кации процесса сушки и одновременно безвредные для жизнеспособности зерновки, включая посевные качества семян кукурузы.

Учитывая, что озонаторное оборудование разных производителей существенно отличается по техническим характеристикам, то для установления оптимальных режимов работы целесообразно ориентироваться на дозу озоноздуш-ной обработки, которую можно рассчитать, умножив концентрацию озона на продолжительность озонирования. Такой подход позволит корректно сопоставлять результаты различных экспериментов.

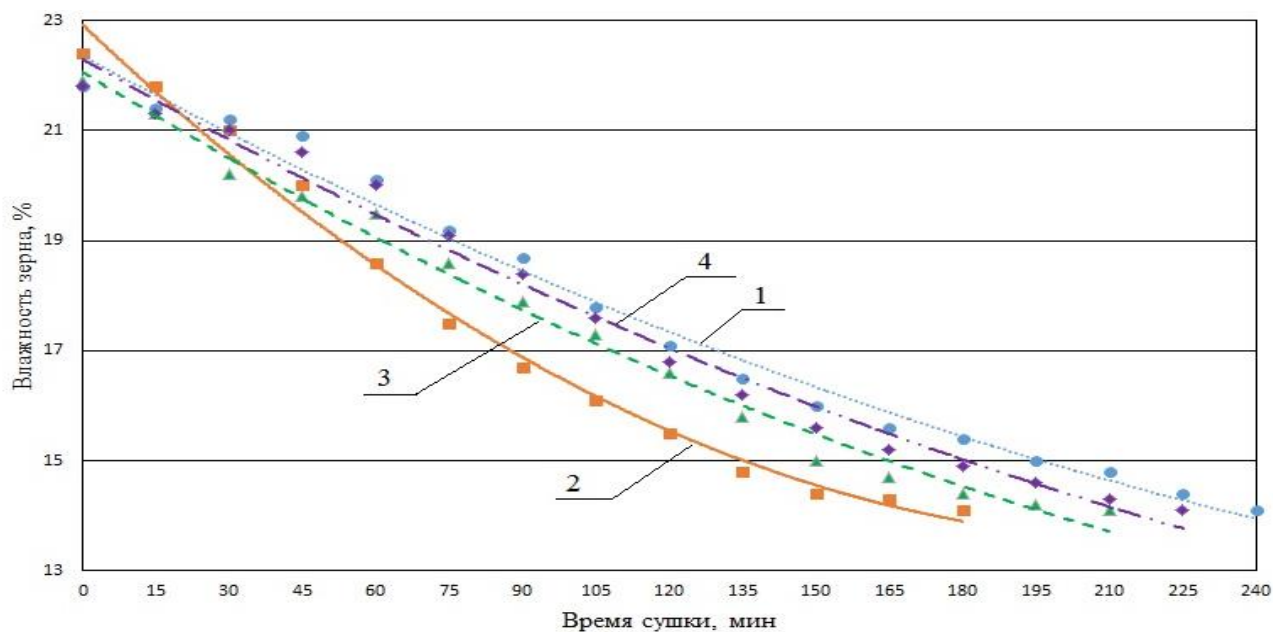
При исследовании рациональных режимов озонирования влажного зерна кукурузы перед сушкой руководствовались методикой, описанной в подразделе 3.3.1. При этом предварительную озоноздушную обработку проводили у трёх образцов при концентрации озона 10 мг/м^3 в течение 60, 120 и 180 мин, что соответствовало дозам озоноздушной обработки соответственно 600, 1200 и $1800 \text{ мин} \cdot \text{мг/м}^3$. Четвёртая контрольная партия зерна не подвергалась озонированию. Сушку всех образцов проводили в идентичных условиях при температуре сушильного агента $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Исследование прекращали при достижении кондиционной влажности зерна, равной 14%. В результате исследований получены данные, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Изменение влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемых образцов с дозами озоноздушной обработки 600, 1200 и $1800 \text{ мин} \cdot \text{мг/м}^3$

Время сушки, мин.	Влажность зерна при сушке, %			
	Контроль (без обработки)	Доза озоноздуш- ной обработки 600 $\text{мин} \cdot \text{мг/м}^3$	Доза озонозвоз- душной обра- ботки 1200 $\text{мин} \cdot \text{мг/м}^3$	Доза озонозвоз- душной обра- ботки 1800 $\text{мин} \cdot \text{мг/м}^3$
0	21,8	22,4	21,9	21,8
15	21,4	21,4	21,3	21,3
30	21,2	20,3	20,2	21
45	20,9	18,9	19,8	20,6
60	20,1	18	19,5	20

Время сушки, мин.	Влажность зерна при сушке, %			
	Контроль (без обработки)	Доза озонородушной обработки 600 мин·мг/м ³	Доза озонородушной обра- ботки 1200 мин·мг/м ³	Доза озонородушной обра- ботки 1800 мин·мг/м ³
75	19,2	17,3	18,6	19,1
90	18,7	16,8	17,9	18,4
105	17,8	16	17,3	17,6
120	17,1	15,3	16,6	16,8
135	16,5	14,9	15,8	16,2
150	16	14,4	15	15,6
165	15,6	14,3	14,7	15,2
180	15,4	14,1	14,4	14,9
195	15		14,2	14,6
210	14,8		14,1	14,3
225	14,4			14,1
240	14,1			

В графическом виде результаты исследований представлены на рисунке 4.2.



1 – необработанный образец; 2 – предварительно обработанный образец с дозой озона 600 мин·мг/м³; 3 – предварительно обработанный образец с дозой озона 1200 мин·мг/м³; 4 – предварительно обработанный образец с дозой озона 1800 мин·мг/м³.

Рисунок 4.2 – Изменение влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемых образцов при различных дозах озонородушной обработки

Анализ таблицы 4.2 и рисунка 4.2 показывает, что при сушке в заданных условиях 14-процентного значения по влажности предварительно проозонированному зерну с дозой озона $600 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$ удалось достичь за 180 минут. В это время контрольный образец для получения того же результата находился под действием температуры 240 минут, т.е. ещё на 60 минут больше. В свою очередь обработка зерна с дозой озона $1200 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$ перед сушкой позволила достичь кондиционного состояния по влажности 14,1% за 210 минут, что только на 30 минут быстрее, чем в контрольном варианте. Также по характеру изменения траектории зависимости влажности зерна можно констатировать, что у проозонированного образца идёт период постоянной сушки, который наиболее эффективен, поскольку испарение влаги с поверхности еще не ограничивается её притоком из внутренних слоев. При этом у контрольного образца уже начался период убывающей скорости сушки, который не только менее эффективен, но и отрицательно влияет на качество материала. Положительный эффект от предварительного озонирования объясняется расширением межклеточных мембран и повышением парциального давления внутри зерновки за счёт воздействия озона на молекулы воды и ослабеванию их взаимосвязи, что способствует более интенсивному продвижению влаги к поверхности зерна. Однако сушка с предварительным озонированием с дозой озона $1800 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$ протекает практически идентично контрольному образцу. Это можно объяснить чрезмерным воздействием озона на зерновку и проявлением окислительных свойств – межклеточные мембраны сужаются ввиду высокой дозы озонородной обработки. Зерно, как живой организм, пытается противостоять агрессивной внешней среде.

Статистическая обработка результатов исследований в программе Matlab позволила проанализировать изменение скорости сушки зерна кукурузы в зависимости от времени предварительного озонирования и времени сушки (рис. 4.3).

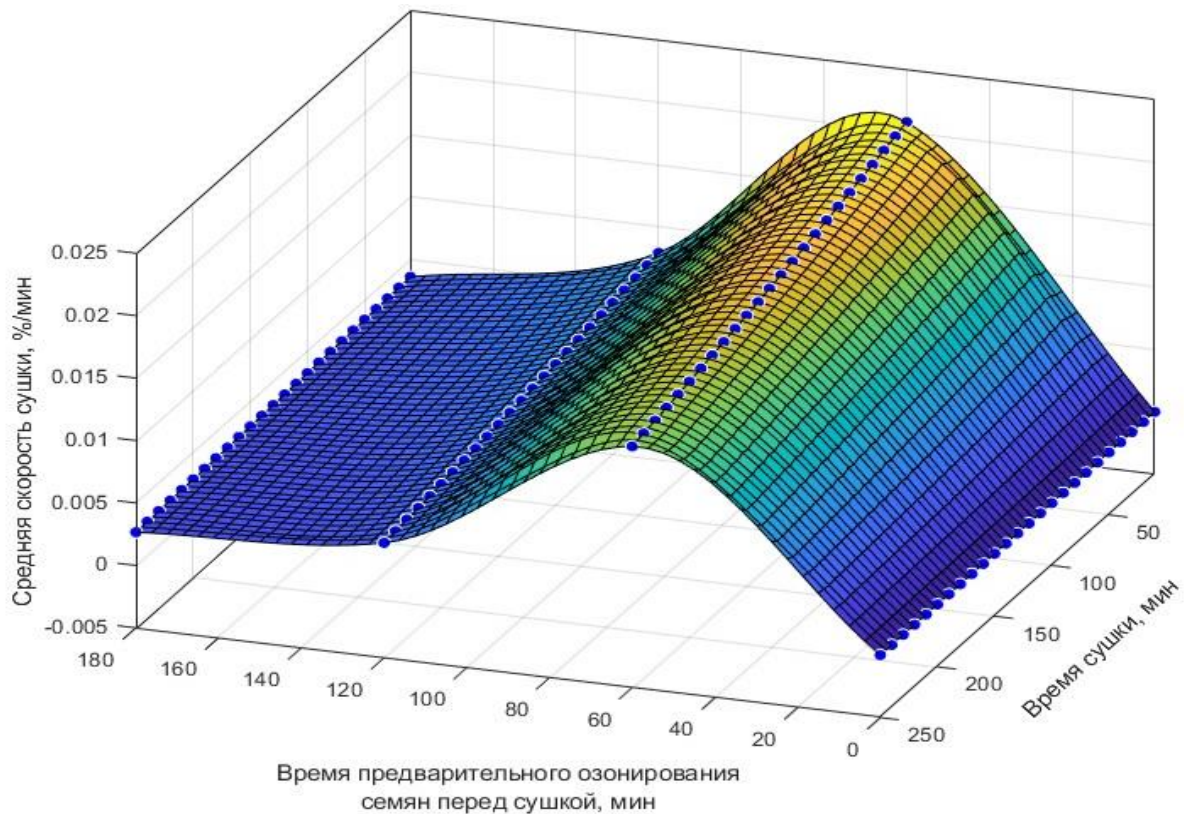


Рисунок 4.3 – Изменение относительной скорости сушки зерна в зависимости от времени озоновоздушной обработки и времени сушки при концентрации озона в озоновоздушной смеси 10 мг/м^3

Анализ рисунка 4.3 показал, что наибольшую относительную скорость сушки имеют зерна, которые предварительно озонировались с дозой озоновоздушной обработки $600 \text{ мин} \cdot \text{мг/м}^3$. Следовательно, данный режим является наиболее рациональным, что позволит сократить время воздействия температуры на зерно до 60 минут.

Таким образом, предварительное озонирование влажного зернового вороха перед последующей операцией сушки зернового материала следует проводить при дозе озоновоздушной обработки $600 \text{ мин} \cdot \text{мг/м}^3$, что обеспечит сокращение времени воздействия температуры на зерно при исходной влажности 21...22% на 60 минут, или в 1,33 раза.

4.4 Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при предварительной озоноздушной обработке влажного зерна кукурузы

Для определения наиболее эффективного типа зерносушилки в комплексе с технологией предварительного озонирования влажного зерна был организован сравнительный эксперимент. Зерновой ворох обрабатывали озоноздушной смесью согласно рациональному режиму, установленному в подразделе 4.2: средняя концентрация озона составляла 10 мг/м^3 , а продолжительность – 60 минут. Это позволило оценить влияние данного способа подготовки на процесс сушки в различных типах зерносушилок.

Экспериментальные исследования проводили согласно методике, описанной в подразделах 3.3.2., на лабораторных зерносушилках шахтного (рис. 3.3) и жалюзийного (рис. 3.4) типа при температуре сушильного агента $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Озоноздушную обработку влажного зернового материала для обоих типов сушилок проводили в одинаковых условиях на соответствующем лабораторном оборудовании (рис. 3.1), описанном в разделе 3.2.1.

В результате исследований получены данные, представленные в таблице 4.3 и на рисунке 4.4.

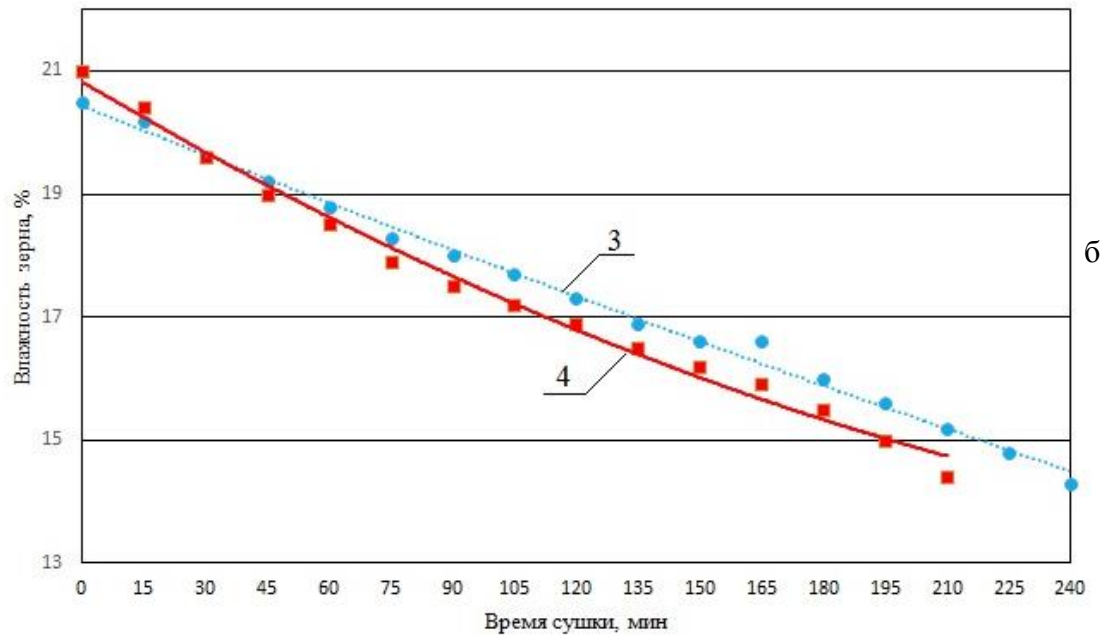
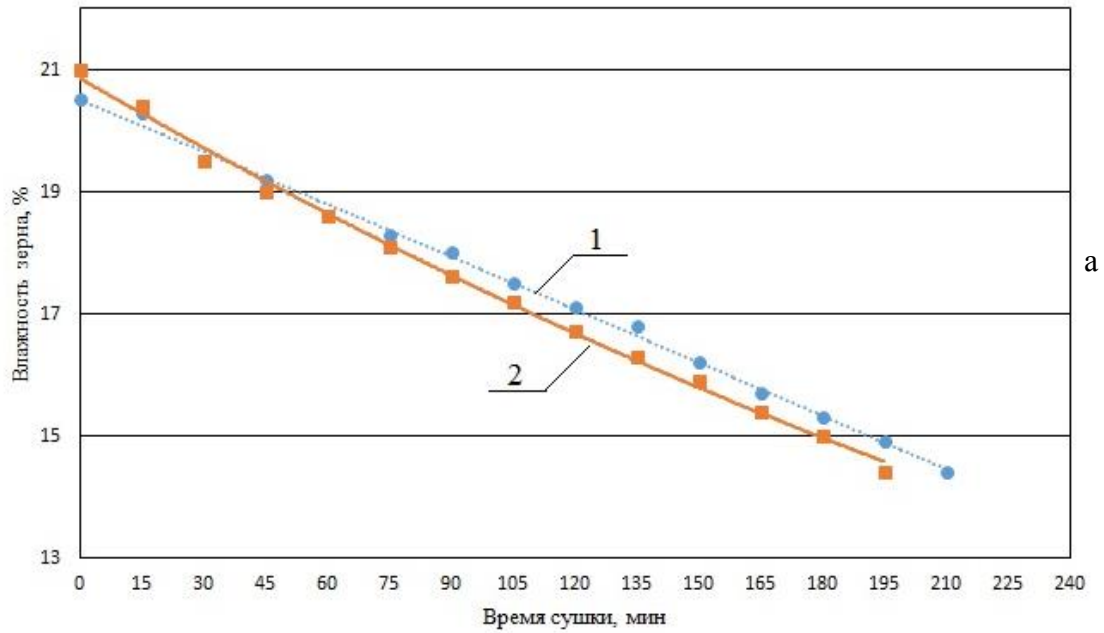
Таблица 4.3 – Динамика изменения влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемого зернового вороха на лабораторных шахтной и жалюзийной зерносушилках

Время сушки, мин.	Влажность зерна кукурузы при сушке на шахтной зерносушилке, %		Влажность зерна кукурузы при сушке на жалюзийной зерносушилке, %	
	Без обработки	С озонной обработкой	Без обработки	С озонной обработкой
0	20,5	21	20,5	21
15	20,3	20,4	20,2	20,4
30	19,5	19,5	19,6	19,6
45	19,2	19	19,2	19
60	18,6	18,6	18,8	18,5
75	18,3	18,1	18,3	17,9

Продолжение таблицы 4.3

Время сушки, мин.	Влажность зерна кукурузы при сушке на шахтной зерносушилке, %		Влажность зерна кукурузы при сушке на жалюзийной зерносушилке, %	
	Без обработки	С озонной обработкой	Без обработки	С озонной обработкой
90	18	17,6	18	17,5
105	17,5	17,2	17,7	17,2
120	17,1	16,7	17,3	16,9
135	16,8	16,3	16,9	16,5
150	16,2	15,9	16,6	16,2
165	15,7	15,4	16,6	15,9
180	15,3	15	16	15,5
195	14,9	14,4	15,6	15
210	14,4		15,2	14,4
225			14,8	
240			14,3	

В графическом виде результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 4.4. Анализ полученных данных показал, что изначально влажность обработанных зерен кукурузы озоновоздушной смесью выше на 0,5%, чем в контрольном образце. Это объясняется тем, что озон способствует перемещению молекул воды из внутренних слоев на поверхность зерновки за счёт ослабления химических связей. По истечении 45 минут сушки на шахтной зерносушилке влажность зёрен кукурузы, прошедших предварительную обработку озоновоздушной смесью, на 0,2% ниже, чем в контрольном образце. Аналогичный результат наблюдается и на жалюзийной зерносушилке. Довести до кондиционного состояния по влажности контрольный образец на шахтной зерносушилке получилось за 210 минут, а предварительно проозонированный – за 195 минут. На жалюзийном типе такая же влажность достигнута за 240 минут у исходного образца и за 210 минут у зёрен кукурузы, прошедших предварительную обработку озоновоздушной смесью.



а) шахтная зерносушилка с коробами; б) шахтная зерносушилка с жалюзи
1, 3 – контрольные образцы; 2, 4 – предварительно озонированные образцы

Рисунок 4.4 – Изменение влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемого зернового вороха на шахтной и жалюзийной зерносушилках

В итоге шахтный тип зерносушилки позволил достичь кондиционного состояния по влажности зерна кукурузы на 30 минут быстрее, чем жалюзийный тип зерносушилки. Это можно объяснить лучшим перемешиванием зернового материала во время сушки, поскольку сушильные короба лучше расслаивают зерновой слой, дви-

жущийся под силой тяжести. При этом выступы в жалюзийных зерносушилках также способствуют изменению траектории движения, но в основном перемешиваются только крайние слои. Предварительная озонородушная обработка влажного зернового вороха позволила интенсифицировать процесс сушки в обоих случаях. Разница по времени операции в рамках одного типа зерносушиллки составляет 15...30 мин., что соответствует сокращению продолжительности сушки на 7...13%.

Таким образом, при сушке зерна целесообразно проводить предварительное озонирование влажного зернового вороха, что позволит сократить время сушки на 7...13% относительно вороха, не подвергавшегося озонородушной обработке. Это эквивалентно сокращению продолжительности операции на 15...30 мин. При этом предпочтительнее использовать шахтный тип зерносушилок, в которых перемешивание зернового вороха происходит более интенсивно, что позволит сократить время сушки на 7,5...12,5% относительно применения жалюзийных зерносушилок.

4.5 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса последующей сушки

Эффективность предварительной озонородушной обработки зерна кукурузы оценивали в соответствии с методиками, изложенными в подразделах 3.2.1 и 3.3.3. Эксперименты проводили на специализированных установках (рис. 3.2 и рис. 3.3), варьируя исходную влажность зерна. Объектом исследования служило зерно кукурузы со средней начальной влажностью 26,3%. Озонородушную обработку продолжительностью 60 минут проводили при различных концентрациях озона в озонородушной смеси: 2, 5, 9, 11, 16 и 18 мг/м³. Температура сушильного агента для каждого из этих режимов составляла соответственно 44, 54, 38, 57, 46 и 33 °С. Полученные результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты исследований по влиянию предварительного озонирования зернового вороха на эффективность последующей сушки зерна кукурузы с начальной влажностью 26,3%

Время опыта, мин.	Средняя температура зерна при сушке, °С		Концентрация озона, мг/м ³	Влажность зерна при сушке, %	
	Контроль	С предварительным озонированием		Контроль	С предварительным озонированием
0	44	44	2	25	25,1
30				23,7	23,5
60				22,4	21,7
90				21,7	20,5
120				20,9	19,5
150				20,2	18,8
180				19,6	18,1
210				19,1	17,4
240				18,5	16,5
0				54	54
30	24,8	24,1			
60	23,1	21,8			
90	22,1	20,2			
120	21,2	19,2			
150	20,5	18,3			
180	19,9	17,5			
210	19,1	16,6			
240	18,4	16,2			
0	38	38	9		
30				27,1	26,3
60				26	24,5
90				25,1	23
120				24,4	21,9
150				23,9	20,9
180				23,3	19,9
210				22,8	19,1
240				22,2	18,3
0				57	57
30	23,5	23,5			
60	21,9	21,4			
90	21	20			
120	20,1	18,9			
150	19,3	18			
180	18,6	17,2			
210	18,1	16,4			
240	17,5	15,6			

Продолжение таблицы 4.4

Время опыта, мин.	Средняя температура зерна при сушке, °С		Концентрация озона, мг/м ³	Влажность зерна при сушке, %	
	Контроль	С предварительным озонированием		Контроль	С предварительным озонированием
0	46	46	16	25,9	26,5
30				24,2	25,3
60				22,6	23
90				21,8	21,9
120				21	21
150				20,3	20,2
180				19,7	19,5
210				19,2	18,7
240				18,6	18
0				33	33
30	26,4	26,3			
60	25,6	24,8			
90	24,9	23,8			
120	24,4	22,8			
150	24,1	22,3			
180	23,6	21,5			
210	23,2	21,1			
240	22,8	20,2			

Анализ данных таблицы 4.4 показал, что после озоновоздушной обработки влажность зерна кукурузы увеличилась на 0,2...0,6%. Это связано с тем, что озон способствует переходу части связанной влаги внутри зерна в свободное состояние, а также интенсифицирует её перемещение к поверхности за счёт частичного раскрытия межклеточных структур. Согласно данным таблицы 4.4, часовая озоновоздушная обработка вороха и последующая сушка в течение 60 минут в совокупности снижали влажность зерна во всех случаях в среднем на 3,3%. За аналогичный период данный показатель у контрольного образца уменьшился в среднем на 2,58%. Наиболее интенсивное падение влажности наблюдается в первые 60 минут сушки независимо от концентрации озона, что характерно для удаления свободной влаги. Поскольку озон усиливает внутренний перенос, более высокая температура сушильного агента в этом периоде приводит к ускоренному снижению влажности, что требует строгого контроля для минимизации риска термического повреждения зерна. После снижения влажности на 4...6% сушку следовало

прекратить и направить недосушенный ворох на отволаживание в герметичную ёмкость. Затем озонвоздушную обработку необходимо повторить и отправить материал на второй цикл.

На основании данных таблицы 4.4 можно сделать вывод, что наиболее эффективно сушка проходит при предварительном озонировании с концентрацией озона 11 мг/м^3 . Это ещё связано с тем, что температура агента сушки в данном эксперименте была максимальной ($57 \text{ }^\circ\text{C}$). Для более точного определения оптимальной концентрации необходимо проводить сушку в равных условиях во всех повторностях. Поэтому для дальнейшего исследования были выбраны концентрации 9 и 11 мг/м^3 при более низкой температуре сушильного агента, которая составляла $38 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные результаты приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты исследований по влиянию предварительного озонирования зернового вороха на эффективность последующей сушки зерна кукурузы с исходной влажностью 26 %.

Время опыта, мин.	Средняя температура зерна ($^\circ\text{C}$) при концентрациях:			Средняя температура агента сушки, $^\circ\text{C}$	Средняя влажность зерна (%) при концентрациях:		
	контроль	9 мг/м^3	11 мг/м^3		контроль	9 мг/м^3	11 мг/м^3
0	22	22,2	22,1	38	26	26,3	26,6
30	22,2	22,4	22,3		25,5	25,7	26
60	23,3	23,4	23,3		24,2	24,1	24,8
90	24	24,1	24		23,3	22,7	23,2
120	24,5	24,5	24,6		22,6	21,9	22,3
150	24,9	25	25,3		22,1	20,2	21,8
180	24,7		24,8		21,5		21
210	25		24,5		21		20,5

Согласно данным таблицы 4.5, часовая озонвоздушная обработка привела к увеличению влажности зерна кукурузы: при концентрации озона 9 мг/м^3 влажность возросла на 0,3% до значения 26,3%, а при концентрации 11 мг/м^3 – на 0,6% до значения 26,6%. Влияние предварительного озонирования прослеживается на протяжении всего эксперимента. При этом наибольшая эффективность от озони-

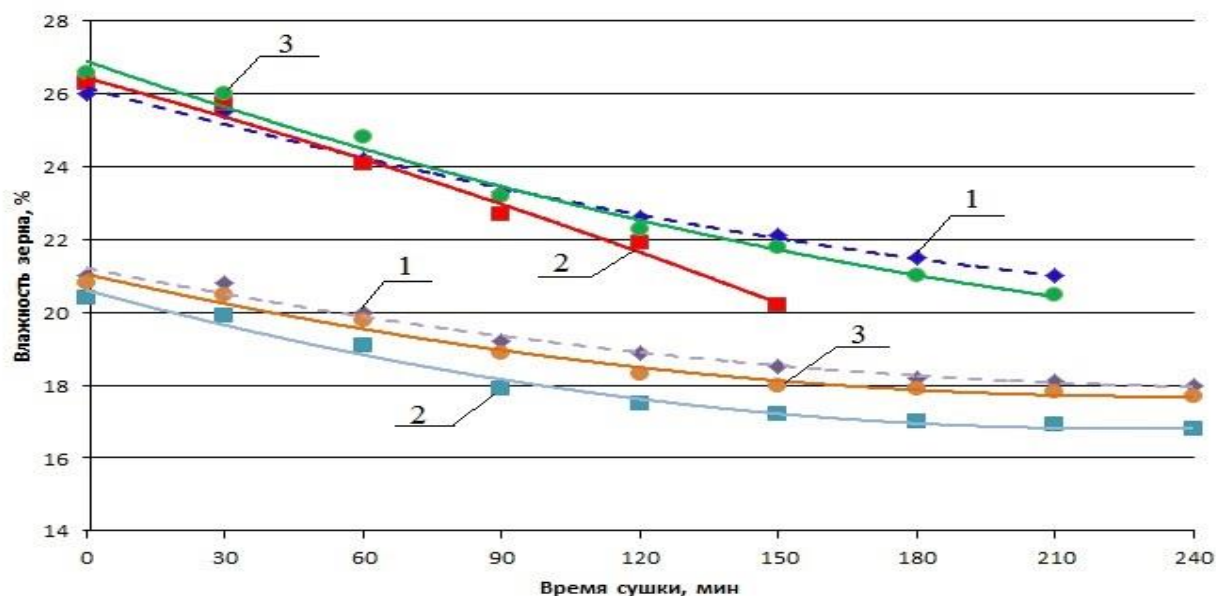
рования прослеживалась в первые 120 минут. За это время контрольная партия снизила влажность зерна на 3,4%. За тот же период данный показатель у прозонированных зёрен с концентрацией озона 9 мг/м^3 уменьшился с 26,3 до 21,9%, т.е. на 4,4%, или в 1,3 раза больше, чем в контрольной партии, а при концентрации озона 11 мг/м^3 – с 26,6 до 22,3%, т.е. на 4,3%, или в 1,26 раза больше, чем в контрольном образце. После снижения влажности на 6% сушка прекращалась, и недосушенный ворох направляли на отволаживание в герметичную ёмкость. Смешивание и отволаживание материала перед вторым циклом сушки привело к увеличению влажности зерна до 21,2%. Затем материал разделили на три партии: первую сушили тонким слоем в отапливаемом помещении, а вторую и третью повторно подвергали часовому озонированию при прежних концентрациях. Полученные результаты отражены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты исследований по влиянию предварительного озонирования зернового вороха на эффективность последующей сушки зерна кукурузы с исходной влажностью 21,2 %.

Время опыта, мин.	Средняя температура зерна при разгрузке, °С			Средняя температура агента сушки, °С	Средняя влажность зерна, %		
	Контроль	9 мг/м^3	11 мг/м^3		Контроль	9 мг/м^3	11 мг/м^3
0	18	18,2	18,2	38	21	20,4	20,8
30	18,2	18,3	18,4		20,8	19,9	20,5
60	18,5	18,7	18,5		20	19,1	19,8
90	19,2	19,1	19		19,2	17,9	18,9
120	19,8	19,5	19,4		18,9	17,5	18,3
150	20,1	20	19,9		18,5	17,2	18
180	20,2	20,2	20,1		18,2	17	17,9
210	20,3	20,1	20,2		18,1	16,9	17,8
240	20,2	20,3	20,2		18	16,8	17,7

На основании данных, приведённых в таблице 4.6, установлено, что повторная часовая обработка озоновоздушной смесью оказывает значимое влияние на снижение влажности зерна. При концентрации озона 9 мг/м^3 влажность снизилась

на 0,8%, достигнув значения 20,4%, а при концентрации 11 мг/м^3 – на 0,4% до значения 20,8%. При этом нахождение материала россыпью в отапливаемом помещении в течение одного часа обеспечило снижение влажности лишь на 0,2%. Действие озона прослеживается на протяжении всего эксперимента. При этом наибольшая эффективность озоновоздушной обработки наблюдалась в первые 120 минут эксперимента. За два часа сушки контрольной партии влажность зерна уменьшилась на 2,3%. У образцов, предварительно обработанных озоновоздушной смесью с концентрацией озона 9 мг/м^3 , за тот же период данный показатель уменьшился с 21,2 до 17,5%, т.е. на 3,7%, или в 1,6 раз больше, чем в контроле. При концентрации 11 мг/м^3 влажность сократилась с 21,2 до 18,3%, т.е. на 2,9%, или в 1,26 раза больше, чем в контрольном образце. В дальнейшем эффект от озонирования снижался, вследствие чего процесс сушки во всех партиях зернового материала протекал со схожими параметрами. Динамика изменения влажности зерна кукурузы в зависимости от способа подготовки вороха к сушке и исходного состояния представлена на рисунке 4.5.



1 – контроль; 2 – проозонированные зерна с концентрацией озона 9 мг/м^3 ;

3 – проозонированные зерна с концентрацией озона 11 мг/м^3

Рисунок 4.5 – Динамика снижения влажности зерна кукурузы в зависимости от способа подготовки зерна кукурузы к сушке

Анализ данных, представленных на рисунке 4.5, показал, что воздействие предварительного озонирования наиболее заметно в течение первых 120 минут сушки, после чего его влияние прекращается. Установлено, что чем выше исходная влажность зерна, тем в меньшей степени допустим его нагрев. В связи с этим предварительное озонирование оказывается особенно эффективным при повышенном начальном влагосодержании зерновки, когда часть связанной с её органическими компонентами влаги переходит в свободную воду, которую значительно легче удалить при сушке.

Статистическая обработка данных (табл. 4.7) подтвердила, что динамика снижения влажности для трех исследуемых образцов описывается полиномиальной зависимостью второй степени, которое имеет следующий вид:

$$W = a_1 \cdot t^2 + a_2 \cdot t + a_3 \quad (4.1)$$

где W – влажность зерна кукурузы, %;

a_1, a_2 – коэффициенты уравнения регрессии;

a_3 – свободный член уравнения.

Таблица 4.7 – Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии в виде $W_{\text{кукур}} = a_1 \cdot t^2 + a_2 \cdot t + a_3$

Концентрация озона в озоно-воздушной смеси при предварительной озоновоздушной обработке, мг/м ³	Показатель	Значение	
		При $W = 26\%$	При $W = 21,2\%$
0	a_1	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
	a_2	-0,0352	-0,025
	a_3	26,175	21,218
	R^2	0,9927	0,9836
9	a_1	$-5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
	a_2	-0,0344	-0,0341
	a_3	26,439	20,608
	R^2	0,9896	0,9825
11	a_1	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
	a_2	-0,0438	-0,0288
	a_3	26,9	21,053
	R^2	0,9879	0,9786

Как следует из таблицы 4.7, коэффициент детерминации R^2 для полученных регрессионных зависимостей находится в диапазоне от 0,9927 до 0,9896. Значения, близкие к единице, свидетельствуют о высокой степени соответствия моделей экспериментальным данным, а значит, уравнения достаточно точно описывают динамику процесса сушки.

Таким образом, эффективность предварительного озонирования зерна кукурузы экспериментально подтверждена. Влияние обработки озоновоздушной смесью наиболее выражено в первые 120 минут сушки, после чего интенсивность эффекта снижается. Предварительное озонирование влажного вороха в течение 1 часа при концентрациях озона 9...11 мг/м³ приводит к повышению начальной влажности зерна на 0,2...0,6% за счёт перехода части связанной влаги в свободное состояние и её миграции к поверхности зерновки. Наиболее эффективно сушка зерна кукурузы протекает при предварительном озонировании с концентрацией озона 9 мг/м³. В таком случае по сравнению с контрольным образцом время сушки сокращается на 120 минут, или в 2,3 раза, а по сравнению с образцами, где предварительное озонирование проводилось с концентрацией 11 мг/м³, время уменьшилось на 90 минут, или в 1,6 раза.

4.6 Влияние предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой на их посевные качества

Озонирование способствует улучшению качественных характеристик семенного материала благодаря уничтожению патогенных микроорганизмов, активизации роста растений и заживлению микротравм [2, 13, 27, 37, 41, 64, 65, 89, 98, 116]. Тем не менее количество исследований по изучению влияния озоновоздушной обработки на качество посевного материала при температурном воздействии на семена недостаточно. Процесс удаления влаги особенно сложен для семян с твердой оболочкой, поскольку даже небольшие отклонения в режимах сушки способны вызывать образование микротрещин. Поэтому было решено прове-

сти исследование именно на кукурузе, используя методику, изложенную в подразделе 3.3.4.

Для сравнительного анализа были подготовлены четыре варианта образцов. Контрольный образец не подвергался термическому воздействию. Вторая проба семян прошла два цикла сушки без предварительного озонирования. Третий и четвертый образцы перед каждым циклом сушки обрабатывали озоновоздушной смесью с концентрациями озона соответственно 9 и 11 мг/м³, при этом температура агента сушки составляла 38 °С. Полученные результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты лабораторных исследований по определению влияния способа подготовки семян кукурузы к сушке на их посевные качества

Концентрация озона, мг/м ³	Повторность	Количество семян, шт.			Энергия прорастания семян, %	Лабораторная всхожесть семян, %
		проросших на 4-е сутки	проросших на 7-е сутки	невсхожих		
Контроль	1	44	46	4	89,0	91,0
	2	47	48	2		
	3	43	44	6		
	4	44	44	6		
0	1	47	49	1	92,5	94,5
	2	46	46	4		
	3	47	47	3		
	4	45	47	3		
9	1	48	48	2	97,5	98,5
	2	48	49	1		
	3	49	50	0		
	4	50	50	0		
11	1	49	50	0	95,5	97,0
	2	47	48	2		
	3	48	48	2		
	4	47	48	2		

Анализ данных, представленных в таблице 4.8, показал, что сушка семян кукурузы благоприятно сказывается на её посевных качествах.

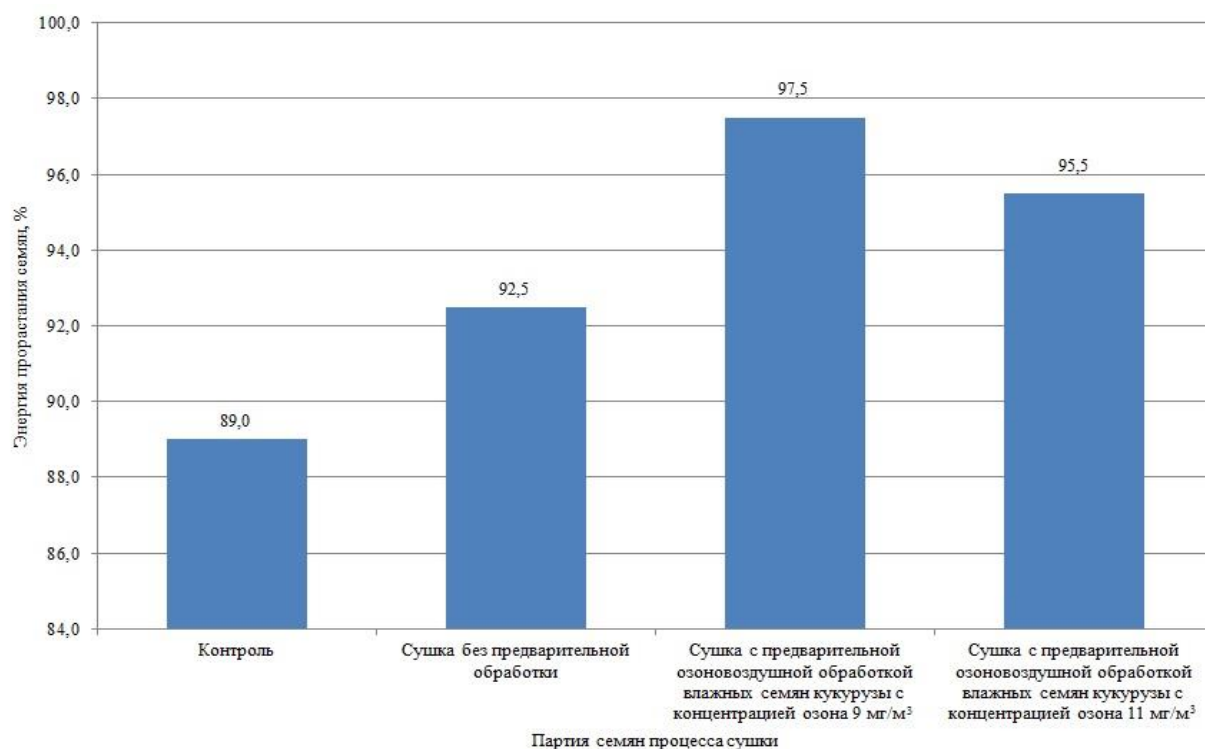


Рисунок 4.6 – Влияние предварительной озонозвоздушной обработки семян кукурузы перед сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке на энергию прорастания

Помимо этого, предварительная озонозвоздушная обработка влажных семян перед сушкой продемонстрировала также положительное воздействие на качество посевного материала. Так, наилучшая энергия прорастания проозонированных семян после сушки по сравнению с контрольным образцом повысилась с 89% до 97,5% при концентрации озона 9 мг/м³ (рис. 4.6).

Предварительная обработка семян кукурузы озонозвоздушной смесью перед сушкой способствовала увеличению всхожести семян в лабораторных условиях. Лучший результат был достигнут при концентрации озона в смеси с воздухом 9 мг/м³ (рис. 4.7). При данных условиях лабораторная всхожесть семян увеличилась на 7,5% – с 91 до 98,5%.

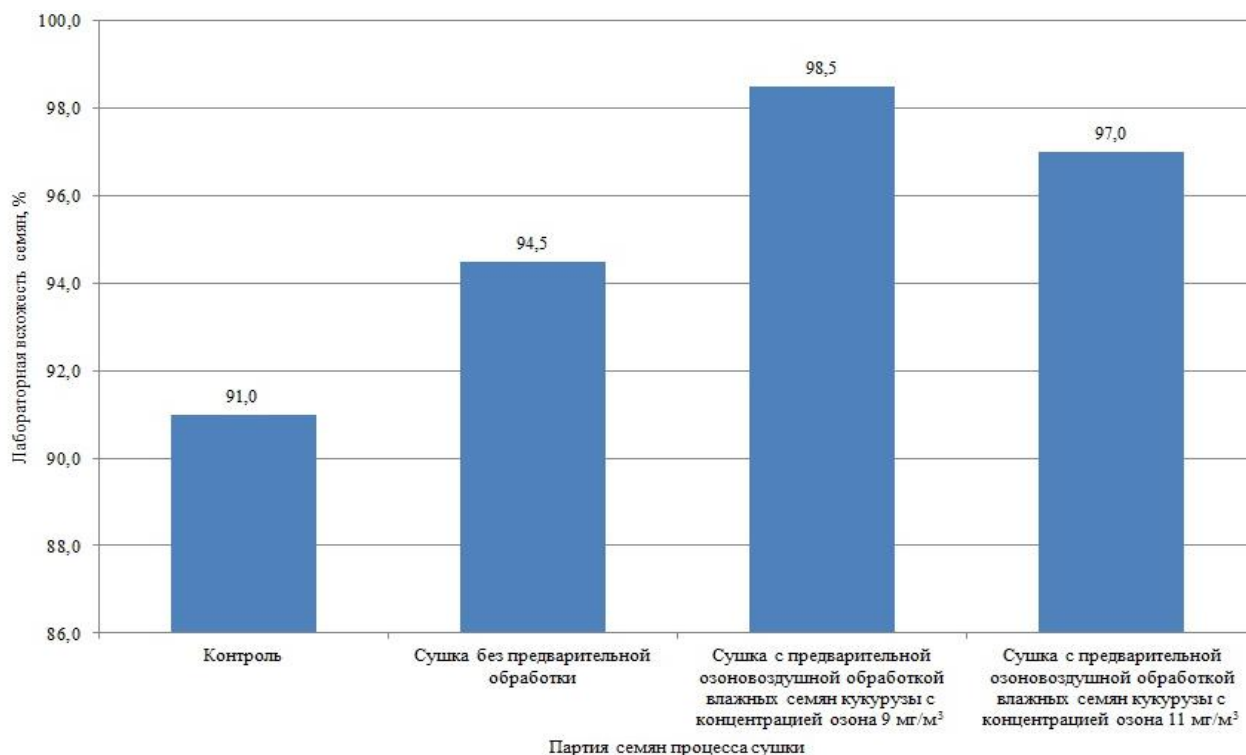


Рисунок 4.7 – Влияние предварительной озонозооной обработки семян кукурузы перед сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке на лабораторную всхожесть

Таким образом, установлено, что термическое воздействие на семена кукурузы при температуре агента сушки 38 °С способствует улучшению показателей энергии прорастания и лабораторной всхожести семян. Особенно значимый положительный эффект достигается при предварительном воздействии озонозооной смеси с концентрацией 9 мг/м³ в течение одного часа непосредственно перед загрузкой семян в шахтную зерносушилку. Посевной материал, прошедший такую обработку, демонстрирует повышение энергии прорастания на 5% относительно традиционного метода сушки и на 2% по сравнению с озонозооной обработкой с концентрацией озона 11 мг/м³. Аналогичный положительный эффект зафиксирован и по показателю лабораторной всхожести семян: после предварительной озонозооной обработки с концентрацией озона 9 мг/м³ указанный показатель достигает уровня 98,5%, тогда как при стандартной сушке он составляет 94,5%, а при озонозооной обработке с концентрацией озона 11 мг/м³ – 97%.

4.7 Проверка адекватности математической модели влагосодержания зерна при конвективной сушке с применением предварительного озонирования

Для проверки адекватности разработанной модели были использованы экспериментальные данные, не участвовавшие в подборе параметров. В качестве контрольных образцов были выбраны режимы с температурой агента сушки 33, 44 и 57 °С. Для этих температур дополнительно рассматривали образцы, подвергнутые предварительной озоновооздушной обработке с дозой озона 120, 660, 1080 мин·мг/м³. Такой выбор позволил оценить способность модели прогнозировать кинетику влагопереноса в условиях, не охваченных исходными данными для идентификации. На рисунках 4.8–4.9 приведено сопоставление расчетных кривых с экспериментальными точками для этих режимов.

Анализ рисунков 4.8–4.9 показывает, что отклонения экспериментальных и расчетных значений не превышают 1,5% во всем диапазоне изменения параметров. При этом модель правильно отражает характер протекания процесса сушки: на начальном этапе наблюдается период постоянной скорости сушки, затем плавный переход к падающей скорости сушки, что соответствует физической картине влагопереноса в капиллярно-пористых телах.

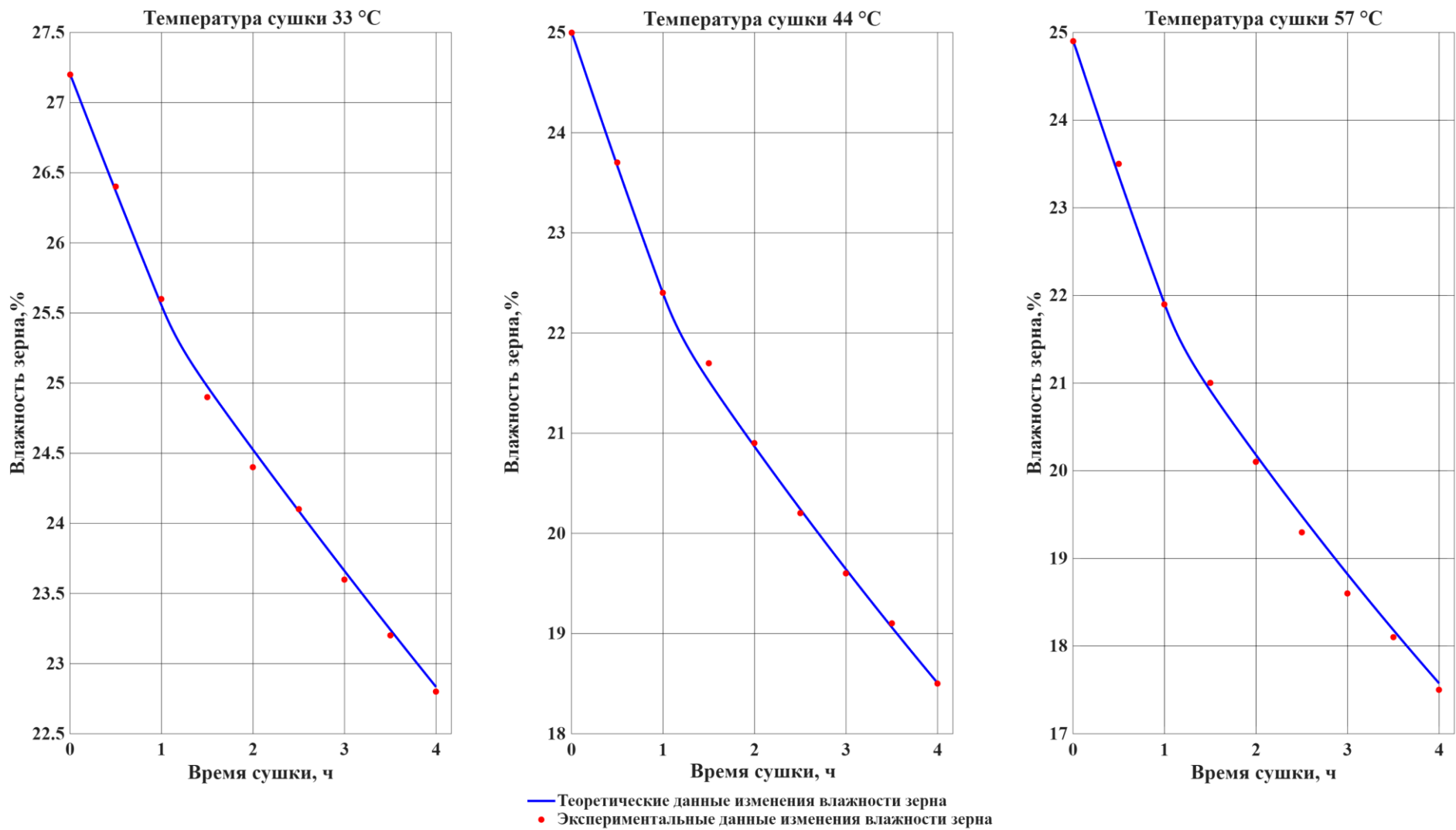


Рисунок 4.8 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных для сушки без предварительной озоновоздушной обработки

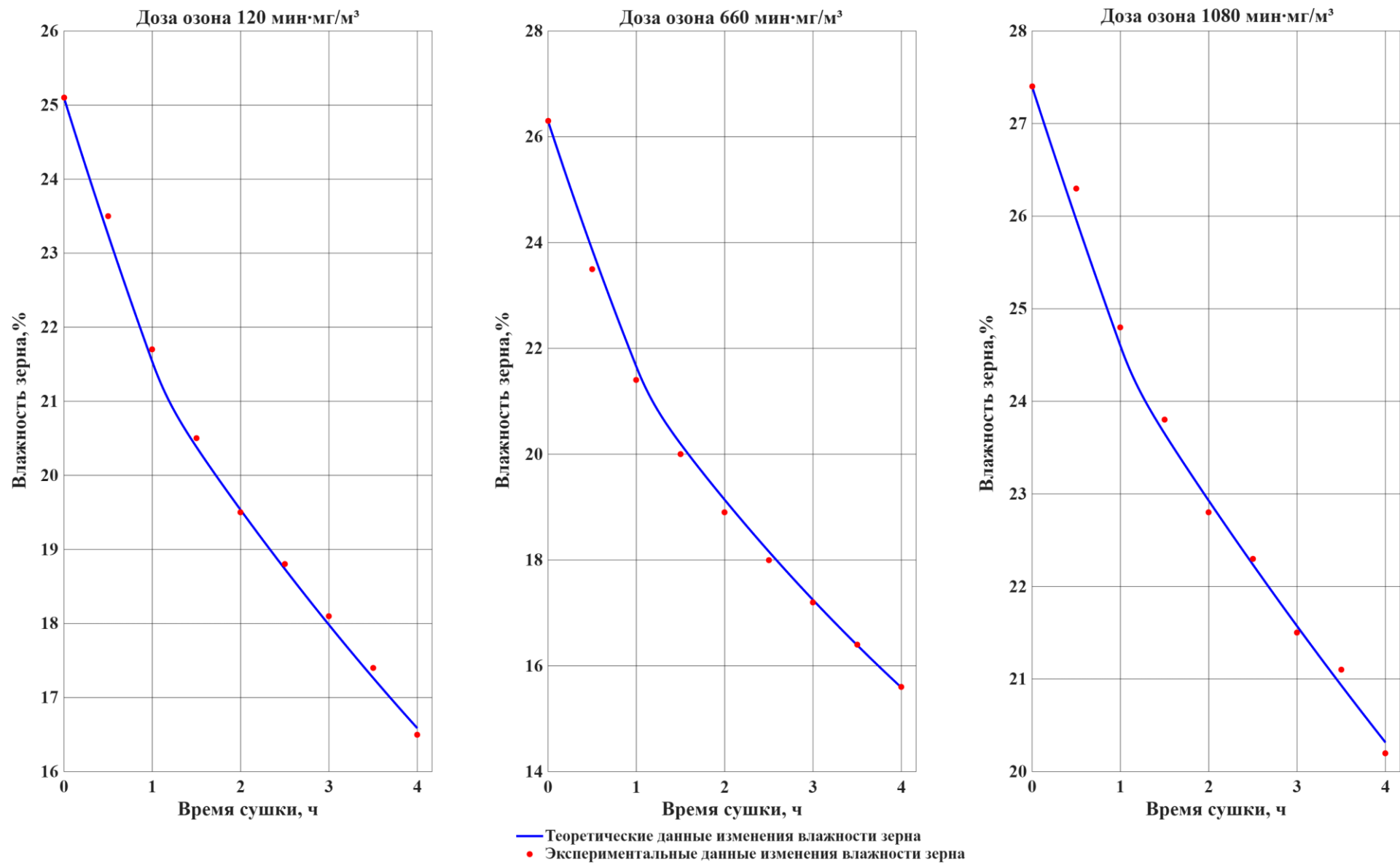


Рисунок 4.9 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных для сушки с применением предварительной озоноздушной обработки

Таким образом, полученные результаты подтверждают адекватность разработанной математической модели, включающей теоретические зависимости влагосодержания зерна от времени операции при конвективной сушке и коэффициента интенсификации влагопереноса с учетом предварительной озонозвоздушной обработки. Она позволяет с высокой точностью (погрешность $<1,5\%$) прогнозировать динамику изменения влажности зерна кукурузы при различных температурах сушильного агента и доз озонозвоздушной обработки. Полученная зависимость может быть использована для оптимизации режимов сушки и проектирования технологических линий с применением предварительной озонозвоздушной обработки.

4.8 Оценка влияния ключевых технологических параметров конвективной сушки зерна с предварительной озонозвоздушной обработкой на интенсификацию процесса

На основе разработанной математической модели был проведен расчетный эксперимент с целью оценки влияния основных технологических параметров на кинетику сушки зерна кукурузы. В качестве варьируемых факторов рассматривали:

- температуру агента сушки в диапазоне $30 \dots 60$ °C;
- дозу озонозвоздушной обработки в диапазоне $0 \dots 800$ мин·мг/м³.

Конечную влажность, до которой проводилось моделирование, принимали равной 14%, что соответствует безопасному уровню влажности для хранения зерна кукурузы.

На рисунке 4.10 представлены расчетные кривые изменения влажности зерна кукурузы во времени при температурах агента сушки 40, 50 и 60 °C. При этом влагоперенос был разбит на две стадии: период постоянной скорости и период падающей скорости сушки. Начальная влажность зерна составляла 25%, предварительное озонирование не проводилось.

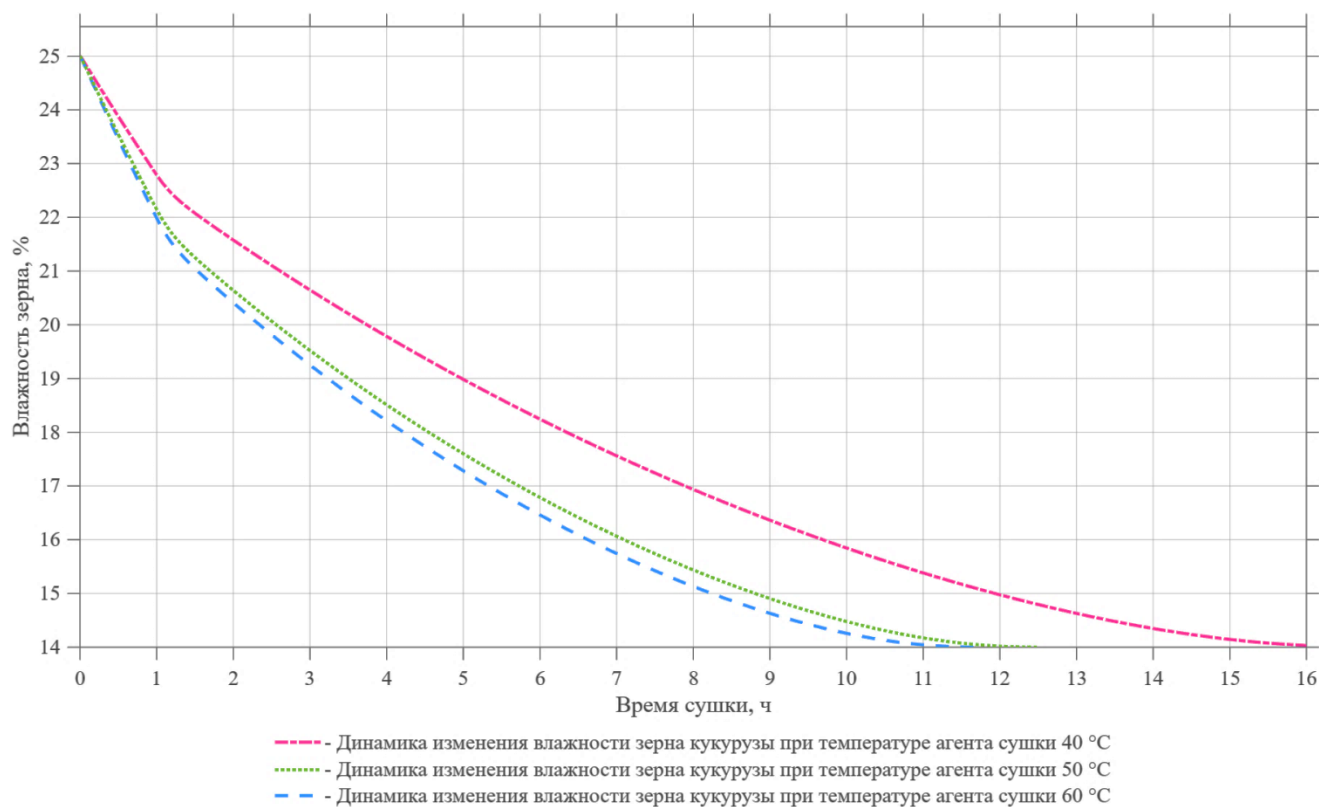


Рисунок 4.10 – Динамика изменения влажности зерна кукурузы при различных температурах сушильного агента

Анализ полученных результатов показывает, что повышение температуры ускоряет процесс сушки. Так, при температуре 40 °С влажность снизилась с 25% до 14% за 16 часов, тогда как при температуре 60 °С для достижения того же результата требуется около 11 часов. Поскольку при такой высокой влажности зерна снимать за один проход более 4% влаги нельзя из-за образования микротрещин на поверхности зерновки, то процесс сушки пришлось бы остановить при температуре 40 °С – через 2,5 часа, при температуре 50 °С – через 1,7 часа, при температуре 60 °С – через 1,5 часа.

На рисунке 4.11 представлены расчетные кривые изменения влажности зерна во времени с применением предварительной озонородушной обработки влажного зернового вороха с различными дозами озона: 0, 300, 500, 600 и 800 мин·мг/м³. Температура агента сушки составляла 50 °С. Во всех случаях продолжительность озонирования была равна 60 минутам, при этом дозу варьировали за счёт разной концентрации озона. Начальная влажность зерна составляла 25%.

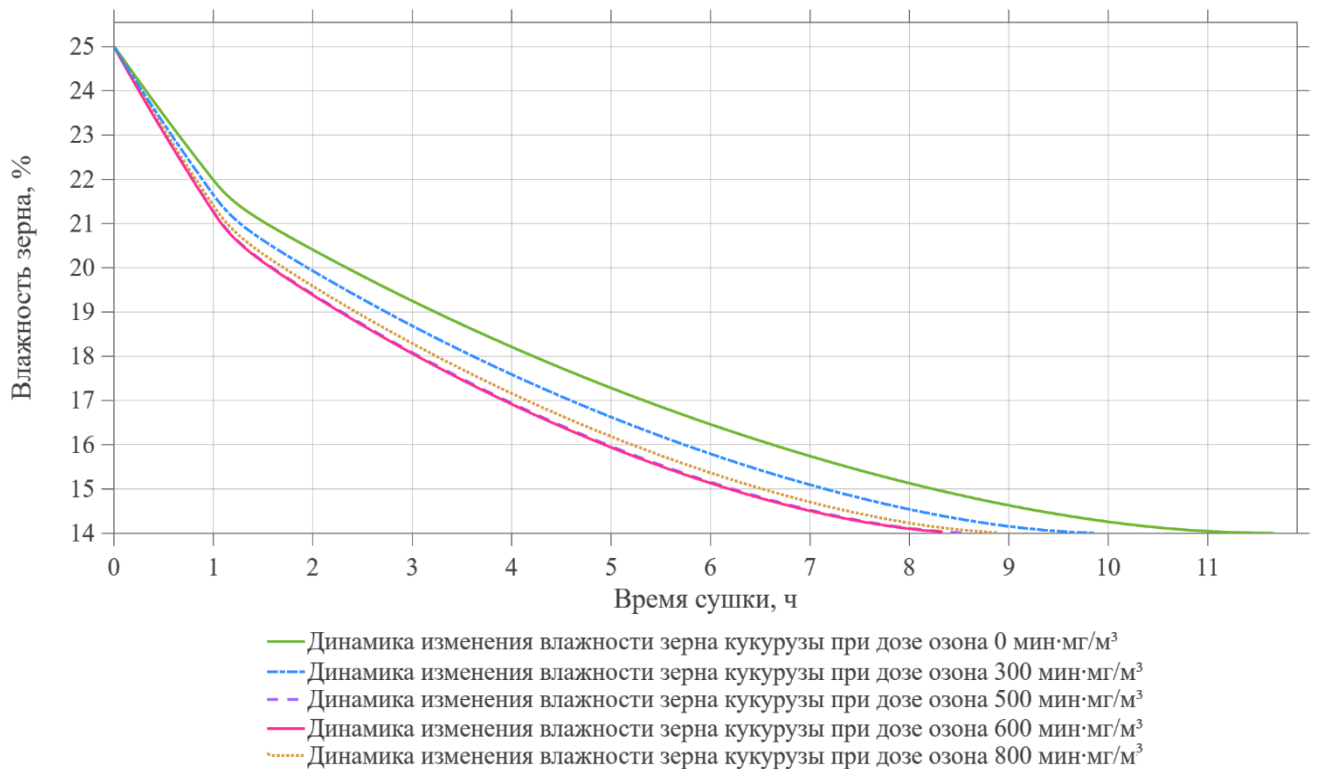


Рисунок 4.11 – Динамика изменения влажности зерна кукурузы при различных дозах озона

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что применение предварительного озонирования ускоряет процесс сушки зерна кукурузы на всех стадиях. Так, при дозе озона $300 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$ время достижения кондиционной влажности сокращается на 16% по сравнению с сушкой без озонирования. При дозе $600 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$ сокращение достигает около 30%. Дальнейшее увеличение дозы дает уже менее значимый прирост скорости сушки. Так, при дозе озона $800 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$ сокращение времени составляет 25%. Поскольку съём более 4% влаги за один проход при высокой начальной влажности зерна ведёт к появлению микротрещин, то процесс сушки необходимо было бы остановить. Время, за которое удаляется предельно допустимое количество влаги, составляет: 1,5 часа при дозе озона $0 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$; 1,3 часа при дозе озона $300 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$; 1,1 часа при дозах озона 500 и $600 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$; 1,2 часа при дозе озона $800 \text{ мин}\cdot\text{мг}/\text{м}^3$. В таблице 4.9 приведены значения коэффициента интенсификации влагопереноса для различных доз озона при температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$, рассчитанные по уравнению (2.43).

Таблица 4.9 – Зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса от дозы озона

Доза озона, мин·мг/м ³	Значение коэффициента $k_{инт}^{67}$
0	1,1455
300	1,1264
500	1,0196
600	1,0155
800	1,0567

Как видно из таблицы, с увеличением дозы озона значение коэффициента интенсификации $k_{инт}^{67}$ уменьшается. При дозе 600 мин·мг/м³ достигается минимальное значение 1,0155, что соответствует максимальной интенсификации влагопереноса. При дальнейшем увеличении дозы с 600 мин·мг/м³ до 800 мин·мг/м³, наблюдается незначительный рост, что может указывать на наличие рационального диапазона дозы озона (500...600 мин·мг/м³), за пределами которого положительный эффект от предварительной озоновоздушной обработки снижается. Тем не менее даже при дозе озона 800 мин·мг/м³ коэффициент интенсификации влагопереноса остается ниже контрольного значения, то есть процесс сушки протекает быстрее по сравнению с сушкой без озона.

Таким образом, разработанные математические зависимости адекватно воспроизводят кинетику конвективной сушки зерна кукурузы на шахтной зерносушилке. Температура агента сушки является одним из значимых факторов, определяющих скорость сушки. Повышение температуры с 40 до 60 °С сокращает время достижения кондиционной влажности на 30%. Предварительная озоновоздушная обработка интенсифицирует влагоперенос за счет структурных изменений зерна. Полученный по модели оптимальный диапазон доз озонирования (500...600 мин·мг/м³) хорошо согласуется с результатами проведенных экспериментов, в которых наилучший эффект был достигнут при дозе 540 мин·мг/м³ (концентрация озона 9 мг/м³, время экспозиции 60 минут). Это подтверждает

адекватность модели и правильность выбора рациональных параметров предварительной озонозвоздушной обработки зерна кукурузы.

4.9 Выводы по разделу

В результате выполнения экспериментальных исследований и последующего определения параметров разработанной математической модели влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы с предварительной озонозвоздушной обработкой были получены следующие основные результаты:

- разработанное устройство для сушки зернового материала с предварительной озонозвоздушной обработкой влажного вороха отличается дополнительно установленным на входе в зернохранилище поточным влагомером и электронным блоком управления, контролирующим работу системы озонирования на основании реальных данных, имеет признаки интеллектуальной собственности, что подтверждает полученный патент РФ на полезную модель № 226053;

- предварительное озонирование влажного вороха перед последующей операцией сушки зерна следует проводить при дозе озонозвоздушной обработки $600 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$, предпочтительно при концентрации озона в озонозвоздушной смеси $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ в течение 60 минут;

- влажные зерна кукурузы после предварительного озонирования следует сушить на шахтных зерносушилках, поскольку их эффективность по времени операции на 7,5...12,5% выше, чем у зерносушилок жалюзийного типа;

- применение предварительного озонирования влажного зерна кукурузы перед зерносушилкой с концентрацией озона $2...18 \text{ мг}/\text{м}^3$ позволит сократить время сушки при температуре агента сушки от 33 до 57 °C на 30...120 минут, причем наиболее рациональным режимом является концентрация озона $9 \text{ мг}/\text{м}^3$, позволяющая сократить время сушки при температуре сушильного агента 38 °C на 120 минут по сравнению с традиционной сушкой, или же в 2,3 раза;

- предварительная озоновоздушная обработка влажных семян кукурузы перед термической обработкой при температуре 38 °С положительно влияет на посевные качества, наилучшая эффективность достигается при часовой обработке озонем с концентрацией 9 мг/м³, что способствует повышению энергии прорастания и лабораторной всхожести семян относительно традиционного метода сушки соответственно на 5% и 4%;

- валидация модели на независимых экспериментальных данных показала, что средняя относительная погрешность не превышает 1,5%, следовательно, модель правильно воспроизводит характер процесса сушки;

- результаты расчётного эксперимента с использованием модели конвективной сушки предварительно проозонированного зерна показывает, что повышение температуры с 40 до 60 °С приводит к сокращению время операции на 30%, а рациональная доза озонирования в диапазоне 500...600 мин·мг/м³ обеспечивает снижение продолжительности процесса на 25...30%.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЗОНовОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКИ ВЛАЖНОГО ЗЕРНА КУКУРУЗЫ ПЕРЕД ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКОЙ

Для определения целесообразности применения предварительного озонирования зерна кукурузы перед шахтной зерносушилкой был произведен расчёт экономической эффективности. Состав оборудования, его количество, стоимость на базовой и проектируемой технологии сушки представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Состав необходимого оборудования для сушки зерна по базовому и проектируемому вариантам

№	Наименование оборудования, марка	Стоимость, руб	
		Базовый	Проект
1	Зерносушилка СВШ 4-12	6 633 560	6 633 560
2	Озонаторная установка		205 170
3	Газоанализатор		30 000
4	Компрессор		90 000
5	Осушитель воздуха		64 000
6	Датчики определения концентрации озона		80 000
7	Соединительные шланги		1000
8	Бункер для хранения сыпучих материалов		108 000
9	Стоимость оборудования	6 633 560	7 211 730
10	Затраты на монтаж оборудования, 10% от стоимости оборудования		721 173
11	Затраты на пусконаладочные работы, 7% от стоимости оборудования		504 821,1
12	Прочие расходы, 3% от стоимости оборудования		216 351,9
13	Капитальные вложения, К	0	1 442 346
14	Затраты на оборудование	6 633 560	8 654 076

С целью вычисления экономической эффективности необходимо определить эксплуатационные издержки для каждого варианта.

Расчёт амортизационных отчислений для базового варианта выполняется по следующей формуле

$$A_m = C \cdot N_a / 100, \quad (5.1)$$

где A_m – затраты на амортизацию, руб;

C – затраты на оборудование, руб;

N_a – годовая норма амортизации, $N_a = 5\%$.

Для базового варианта значение амортизационных отчислений $A_m^{\text{баз}}$ составит:

$$A_m^{\text{баз}} = 6\,633\,560 \cdot 5 / 100 = 331\,678 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта амортизационные отчисления $A_m^{\text{пр}}$ будут равны:

$$A_m^{\text{пр}} = 8\,654\,076 \cdot 5 / 100 = 432\,703,8 \text{ руб.}$$

Следовательно, дополнительные амортизационные отчисления $A_m^{\text{доп}}$, обусловленные установкой оборудования, будут равны

$$A_m^{\text{доп}} = A_m^{\text{пр}} - A_m^{\text{баз}} = 432\,703,8 - 331\,678 = 101\,025,8 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

Затраты, обусловленные проведением ремонтов и техническим обслуживанием, рассчитываются по следующей формуле:

$$P_m = C \cdot N_p / 100, \quad (5.3)$$

где P_m – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб;

N_p – ежегодная норма отчисления на ремонт и техническое обслуживание оборудования, $N_p = 6\%$.

Для базового варианта затраты на ремонт и техническое обслуживание составят:

$$P_m^{\text{баз}} = 6\,633\,560 \cdot 6 / 100 = 398\,013,6 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта затраты на ремонт и обслуживание составят:

$$P_m^{\text{пр}} = 8\,654\,076 \cdot 6/100 = 519\,244,6 \text{ руб.}$$

Таким образом, дополнительные затраты на ремонт и техническое обслуживание, вызванные установкой оборудования, будут равны

$$P_m^{\text{доп}} = P_m^{\text{пр}} - P_m^{\text{баз}} = 519\,244,6 - 398\,013,6 = 121\,231 \text{ руб.} \quad (5.4)$$

Расчет расходов на электроэнергию произведем по формуле:

$$C_{\text{эл}} = Q_{\text{эл}} \cdot \text{Ц}_{\text{эл}}, \quad (5.5)$$

где $C_{\text{эл}}$ – затраты на электроэнергию, руб;

$Q_{\text{эл}}$ – годовой расход электроэнергии, кВт·ч;

$\text{Ц}_{\text{эл}}$ – средняя цена 1 кВт·ч в России, $\text{Ц}_{\text{эл}} = 7,92$ руб.

Исходя из данных производителя, суммарная потребляемая мощность базового варианта равна 27,5 кВт, а для проектируемого варианта – 35,6 кВт.

Годовой расход электроэнергии определяем по формуле

$$Q_{\text{эл}} = G \cdot T_{\text{раб}} \cdot J, \quad (5.6)$$

где G – суммарная потребляемая мощность базового варианта, кВт·ч;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность рабочего времени, час;

J – количество рабочих дней в году.

Для базового варианта годовой расход электроэнергии составляет:

$$Q_{\text{эл}}^{\text{баз}} = 27,5 \cdot 8 \cdot 247 = 54\,340 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Согласно экспериментальным данным, изложенным в предыдущем разделе, предварительное озонирование влажного зерна кукурузы в течение 1 часа позволяет сократить время сушки на 20% по сравнению с классической сушкой. Эти экспериментально подтвержденные значения приняты в экономическом расчете в качестве исходных данных для проектируемого варианта.

Для проектируемого варианта годовой расход электроэнергии составляет:

$$Q_{\text{эл}}^{\text{пр}} = 8,1 \cdot 1 \cdot 247 + 27,5 \cdot 6,4 \cdot 247 = 45\,472,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Затраты на электроэнергию для базового варианта составляют:

$$C_{\text{эл}}^{\text{баз}} = 54\,340 \cdot 7,92 = 430\,372,8 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для проектируемого варианта составляют:

$$C_{\text{эл}}^{\text{пр}} = 45\,472,7 \cdot 7,92 = 360\,144,2 \text{ руб.}$$

Следовательно, дополнительные затраты на электроэнергию за счет установленного оборудования будут равны:

$$Q_{\text{эл}}^{\text{доп}} = Q_{\text{эл}}^{\text{пр}} - Q_{\text{эл}}^{\text{баз}} = 360\,144,2 - 430\,372,8 = -70\,228,6 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

Таким образом, за год экономия за электроэнергию составит 70 228,6 руб.

Годовые эксплуатационные затраты базовой модели составят:

$$\mathcal{E}_{\text{Г}}^{\text{баз}} = A_m^{\text{баз}} + P_m^{\text{баз}} + C_{\text{эл}}^{\text{баз}} = 331\,678 + 398\,013,6 + 430\,372,8 = 1\,160\,064,4 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Суммарные эксплуатационные затраты проектируемого варианта в год составят:

$$\mathcal{E}_{\text{Г}}^{\text{пр}} = A_m^{\text{пр}} + P_m^{\text{пр}} + C_{\text{эл}}^{\text{пр}} = 432\,703,8 + 519\,244,6 + 360\,144,2 = 1\,312\,092,6 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

Таким образом, годовые дополнительные эксплуатационные издержки составят:

$$\mathcal{E}_{\text{ц}} = \mathcal{E}_{\text{Г}}^{\text{пр}} - \mathcal{E}_{\text{Г}}^{\text{баз}} = 1\,312\,092,6 - 1\,160\,064,4 = 1\,520\,28,2 \text{ руб.} \quad (5.10)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ц}}$ – дополнительные эксплуатационные издержки, руб.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что применение процесса озонирования влечёт за собой удорожание базового процесса сушки на 349 024,3 рублей. Это обуславливается установкой и дороговизной озонаторного оборудования и его комплектующих. Однако озонирование – экологически чистая технология, которая не оказывает отрицательного влияния на зерно, а также интенсифицирует процесс сушки и улучшает товарные качества. Согласно проведенным исследованиям, озонирование позволяет снизить зараженность зерновой массы вредителями и микрофлорой, а также уменьшить содержание микотоксинов, благодаря чему часть зерна переходит из третьего класса во второй. Это дает

возможность реализовывать продукцию по более высокой цене, повышая общую рентабельность процесса.

Расчет годовой экономической эффективности применения озоновоздушной обработки зерна по сравнению с базовым вариантом представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Годовой экономический эффект применения предварительной озоновоздушной обработки влажных зерен кукурузы перед сушкой за счет повышения качества получаемой продукции

Показатели	Базовый вариант	Проектируемый
Годовой объём обрабатываемого посевного материала, т:	2500	2500
- зерно третьего класса	1500	800
- зерно второго класса	1000	1700
Цена тонны зернового материала, руб/т:		
- зерно третьего класса	14 350	14 350
- зерно второго класса	16 000	16 000
Стоимость продукции в год, руб:		
- зерно третьего класса	21 525 000	11 480 000
- зерно второго класса	16 000 000	27 200 000
Стоимость всей продукции, руб.	37 525 000	38 680 000
Дополнительная прибыль от продукции в год, руб.	-	1 155 000
Дополнительные эксплуатационные издержки	-	152 028,2
Годовой экономический эффект, руб.	-	1 002 971,8

Таким образом, годовой экономический эффект от применения предварительной озоновоздушной обработки влажного зерна кукурузы перед сушкой по сравнению с традиционной сушкой зерна составляет $P_{гг} = 1\,002\,971,8$ руб.

Экономический эффект за срок эксплуатации учитывает ежегодный эффект и возрастание его по годам по формуле сложных процентов:

$$K_T = P_{rt} \cdot \frac{(1+ND)^{T_э} - 1}{ND}, \quad (5.11)$$

где K_T – экономический эффект за срок эксплуатации, руб;

$T_э$ – срок эксплуатации оборудования; $T_э=15$ лет;

ND – требуемая норма доходности.

В расчётах экономического эффекта за срок эксплуатации выплаты по налогам не учитывались, поэтому

$$K_T = 805\,975,1 \cdot \frac{(1+0,1211)^{15} - 1}{0,1211} = 30\,314\,003 \text{ руб.}$$

Определим цену спроса D_p на комплекс ресурсов для реализации проекта по следующей формуле:

$$D_p = \frac{K_T}{(1+ND)^{T_э}} = \frac{30\,314\,003}{(1+0,1211)^{15}} = 5\,457\,302 \text{ руб.} \quad (5.12)$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений определим по формуле

$$E_T = \sqrt[T_э]{\frac{K_T}{K_{доп}}} - 1, \quad (5.13)$$

где $K_{доп}$ – дополнительные затраты на модернизацию, $K_{доп} = 1\,442\,346$ руб.

$$E_T = \sqrt[15]{\frac{30\,314\,003}{1\,442\,346}} - 1 = 1,23 - 1 = 0,23.$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений больше требуемой нормы доходности, т.е. $E_T = 0,23 > ND = 0,1211$. Это подчёркивает экономическую целесообразность предложенной модернизации.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений найдем по следующей зависимости:

$$T_{ок} = \frac{-\ln(1 - K_{доп} \cdot \frac{ND}{P_{rt}})}{\ln(1+ND)} = \frac{-\ln(1 - 1\,442\,346 \cdot \frac{0,1211}{1\,002\,971,8})}{\ln(1+0,1211)} = 1,67 \text{ года.} \quad (5.14)$$

Результаты расчётов экономической эффективности представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Экономическая эффективность применения предварительной озоновооздушной обработки влажных зерен кукурузы перед шахтной зерносушилкой

Наименование показателя	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Стоимость оборудования, руб.	6 633 560	7 211 730
Капитальные вложения, руб.	-	1 442 346
Стоимость реализованной продукции, руб.	37 525 000	38 680 000
Дополнительная прибыль от повышения качества продукции, руб.	-	1 155 000
Годовой экономический эффект, руб.	-	1 002 971,8
Коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений	-	0,23
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	-	1,67

Таким образом, расчеты экономической эффективности применения предварительной озоновооздушной обработки влажного зерна кукурузы показали, что при дополнительных капитальных вложениях 1 442 346 рублей, при объеме производства 2500 т/год его срок окупаемости составит 1,67 года, а годовой экономический эффект – порядка 1 002 971,8 рублей. Сокращение времени сушки на 20% и продолжительность озонирования 1 час позволили снизить затраты на электроэнергию проектируемого варианта относительно базового. Следовательно, реализация предложенного технического и технологического решения является экономически обоснованной и позволит улучшить финансовые показатели хозяйств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При сушке зерна кукурузы наиболее перспективным является конвективный способ, реализуемый в шахтных зерносушилках, которые обеспечивают высокую производительность, равномерный прогрев, невысокие удельные энергетические затраты, самотечность технологического процесса и имеют возможность дальнейшей модернизации.

2. Установленная закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы во времени от коэффициентов влагопроводности, термовлагопроводности, теплопроводности, критерия фазовых превращений, эквивалентного радиуса зерна и его плотности при конвективной сушке учитывает предварительную озонозвоздушную обработку посредством введения коэффициента интенсификации влагопереноса и позволяет оценить степень интенсификации процесса сушки.

3. Выявленная зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы от температуры агента и параметров озонозвоздушной обработки показывает динамику снижения влагосодержания. В исследуемом диапазоне режимов сушки зерна кукурузы этот коэффициент изменяется в диапазоне от 1,0 до 1,18.

4. Предложенное техническое решение устройства для сушки зерна (патент № 226053 РФ) включает систему озонирования и реализует постоянный мониторинг поступающего сырья для изменения режима предварительной озонозвоздушной обработки, что обеспечивает интенсификацию процесса конвективной сушки в шахтных зерносушилках.

5. Для интенсификации процесса конвективной сушки зерна кукурузы в шахтных зерносушилках предварительное озонирование влажного вороха следует проводить при дозе озонозвоздушной обработки $500 \dots 600 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$, причем целесообразно применять зерносушилki с коробами, поскольку их эффективность по времени операции на $7,5 \dots 12,5 \%$ выше, чем у зерносушилок с жалюзи.

6. Применение предварительного озонирования влажного зерна кукурузы перед шахтной зерносушилкой с концентрацией озона в озонозвоздушной смеси

2...18 мг/м³ интенсифицирует процесс сушки, сокращая время операции при температуре агента от 33 до 57 °С на 30...120 минут, при этом наилучшие результаты получены при концентрации озона 9 мг/м³ и температуре сушильного агента 38 °С, что сократило продолжительность сушки до достижения кондиционной влажности на 120 минут по сравнению с сушкой без предварительного озонирования.

7. Предварительная озоновоздушная обработка влажных семян кукурузы с концентрацией озона 9 мг/м³ в течение часа перед термической конвективной обработкой с температурой 38 °С способствовала повышению энергии прорастания семян на 5% и лабораторной всхожести семян на 4% относительно сушки без предварительного озонирования.

8. Расчет экономических показателей применения предварительного озонирования зерна кукурузы перед шахтной зерносушилкой показал, что при дополнительных капитальных вложениях 1 442 346 рублей и объеме производства 2500 т/год срок окупаемости составит 1,67 года при годовом экономическом эффекте 1 002 971,8 рублей. Экономический эффект достигается за счёт повышения класса зерна, что позволяет реализовать его по более высокой цене, и за счёт интенсификации процесса сушки.

9. Предприятиям сельхозмашиностроения рекомендуется при разработке и модернизации зерносушильных комплексов внедрять в них предварительную озоновоздушную обработку, основываясь на техническом решении, защищенном патентом № 226053 РФ; сельхозпроизводителям целесообразно при сушке зерна кукурузы в шахтных зерносушилках применять предварительное озонирование зернового вороха в буферном коническом силосе с дозой обработки 500...600 мин·мг/м³ при концентрации озона 9 мг/м³ в течение одного часа.

10. Перспективы дальнейшей разработки темы: изучение влияния процесса озонирования на различные компоненты зернового вороха с учётом их разного состава, уточнение режимных параметров озонаторной установки при обработке различных культур.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A_m – затраты на амортизацию, руб.;

$A_m^{\text{баз}}$ – амортизационные отчисления для базового варианта;

$A_m^{\text{доп}}$ – дополнительные амортизационные отчисления, вызванные установкой оборудования;

$A_m^{\text{пр}}$ – амортизационные отчисления для проектируемого варианта;

$a_{\text{т.вл}}$ – коэффициент термовлагопроводности, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot ^\circ\text{C})$;

a_0^{k} – свободный член уравнения;

$a_0^{\text{т.вл}}$ – свободный член уравнения;

$a_{\text{вл}}$ – коэффициент влагопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

$a_1^{\text{k}}, a_2^{\text{k}}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

$a_1^{\text{вл}}, a_2^{\text{вл}}, a_3^{\text{вл}}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

$a_1^{\text{т.вл}}, a_2^{\text{т.вл}}, a_3^{\text{т.вл}}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

a_1, a_2 – коэффициенты уравнения регрессии;

a_3 – свободный член уравнения;

α_{m0} – коэффициент диффузии влаги при температуре $20\ ^\circ\text{C}$, $\text{м}^2/\text{с}$;

b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии;

$C_{\text{вх}}$ – концентрация озона на входе в зерновой материал, $\text{мг}/\text{м}^3$;

$C_{\text{вых}}$ – концентрация озона на выходе из зернового материала, $\text{мг}/\text{м}^3$;

$C_{\text{эл}}$ – затраты на электроэнергию, руб.;

$C_{\text{оз}}$ – концентрация озона, $\text{мг}/\text{м}^3$;

C – затраты на оборудование, руб.;

c – удельная теплоёмкость влажного материала, отнесенная к массе сухого вещества, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

$c_{\text{вл}}$ – удельная теплоёмкость влаги, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;

c_3 – удельная теплоёмкость зерна, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;

c_p – удельная теплоёмкость воздуха $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;

G – суммарная потребляемая мощность базового варианта, кВт·ч;

$g_{\text{адс}}$ – количество адсорбированного озона, мг/м³;

$g_{\text{обм}}$ – количество разложившегося озона в обрабатываемом объеме, мг/м³;

$g_{\text{разл}}$ – количество разложившегося озона на поверхности, мг/м³;

$g_{\text{хим.р}}$ – количество озона, вступившего в химические реакции, мг/м³;

K_C – константа скорости поглощения озона единицей объема зерна, мг/м³·с;

K_T – экономический эффект за срок эксплуатации, руб.;

$K_{\text{доп}}$ – дополнительные затраты на модернизацию;

k_o – коэффициент;

K – коэффициент пропорциональности расходования озона по высоте слоя;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты уравнения регрессии;

$k_{\text{инт}}^{\text{вл}}$ – коэффициент интенсификации влагопереноса;

k_T – коэффициент, являющийся функцией температуры агента сушки $T_{\text{а.с.}}$;

k_b – удельная теплота, выделяемая при внутренних преобразованиях, кДж/(кг·°С);

$k_{\text{с.а.}}$ – удельная теплота, выделяемая от рекомбинации в сушильном агенте, кДж/(кг·°С);

k_g – удельная теплота, выделяемая при дыхании зерна, кДж/(кг·°С);

k_m – удельная теплота, выделяемая от рекомбинации на поверхности зерна, кДж/(кг·°С);

$m_{\text{вл.зар}}$ – масса влаги в зародыше, г;

$m_{\text{вл.об}}$ – масса влаги в оболочке зерна, г;

$m_{\text{вл.вн}}$ – масса влаги внутри зерна, г;

$m_{\text{вн}}$ – масса внутренней части зерна, г;

$m_{\text{зар}}$ – масса зародыша, г;

$m_{\text{об}}$ – масса оболочки зерна, г;

$m_{\text{вл}}$ – общая масса влаги в зерне, г;

m_{O_3} – масса синтезированного озона, мг;

m_3 – масса зерна, обрабатываемая озоном, кг;

N_a – годовая норма амортизации;

N_p – ежегодная норма отчисления на ремонт и техническое обслуживание оборудования;

n_b – часть озона, участвующая во внутренних преобразованиях, мг;

$n_{c.a.}$ – коэффициент распада озона в сушильном агенте;

n_g – часть озона, инициирующая биохимические реакции, мг;

n_m – коэффициент распада озона на поверхности зерна;

n – коэффициент полезно используемой теплоты;

Q_{p1} – теплота, выделяемая от рекомбинации озона в сушильном агенте, кДж;

Q_{p1n} – часть теплоты, выделяемой от рекомбинации озона в сушильном агенте и используемой для нагрева зерна, кДж;

Q_{p2} – теплота, выделяемая от рекомбинации озона на поверхности зерна, кДж;

Q_T – общее количество теплоты, которое выделяется от воздействия озона, кДж;

Q_b – теплота, образованная за счёт вторичных преобразований внутри зерна, кДж;

Q_g – теплота, выделяемая за счёт реакции дыхания, кДж;

$Q_{эл}$ – годовой расход электроэнергии, кВт·ч;

q_5 – удельные потери теплоты в окружающую среду через стенки сушильной камеры, кДж/(кг·ч);

T – температура зерна, °С;

T_0 и T_τ – температура зерна начальная и в момент времени τ , К;

$T_{a.c.}$ – температура агента сушки, °С;

T_K – температура зерна в контроле, °С;

T_0 – температура зерна в опыте, °С;

$T_{ок}$ – срок окупаемости дополнительных капитальных вложений;

$T_э$ – срок эксплуатации оборудования;

$T_{раб}$ – продолжительность рабочего времени, час;

t – время сушки, ч;

t_0 – время контакта с зерновым слоем, мин;

$t_{\text{оз}}$ – время озонОВОЗДУШНОЙ обработки;

W_{min} – минимальное влагосодержание материала в период падающей скорости сушки;

W – влажность зерна, %;

W_1^c – начальная влажность зерна, %;

$W_{\text{культура}}^{\text{конт}}$ – влажность зерна данной культуры в контрольном опыте, %;

$W_{\text{культура}}^{\text{озон}}$ – влажность зерна данной культуры при вентилировании озонОВОЗДУШНОЙ смесью, %;

w – влагосодержание, кг влаги/кг абсолютно сухого вещества;

λ – коэффициент теплопроводности влажного материала, Вт/(м·°С);

ε – критерий фазовых превращений, показывающий долю влаги, испаряющейся внутри материала;

$\frac{d}{dx}$ – производная по координате x ;

$\frac{dc}{dt}$ – скорость поглощения озона зерном;

r – теплота парообразования, Дж/кг;

D_p – цена спроса на комплекс ресурсов для реализации проекта;

$C_{\text{эл}}$ – средняя цена 1 кВт·ч в России;

$E_{\text{ц}}$ – дополнительные эксплуатационные издержки, руб;

$E_{\text{т}}$ – коэффициент эффективности капитальных вложений;

O_3 – озон;

P_m – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.;

$D_{\text{оз}}$ – расход озонОВОЗДУШНОЙ смеси через слой зернового материала, мин·мг/м³;

ρ_0 – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

ΔU – градиент влагосодержания, г/кг;

ΔT – градиент температуры, °С;

$h_{\text{сл}}$ – толщина зернового слоя, м;

h – критерий принятия гипотезы;

R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации;

x – количество озона в момент времени t , мг/м³;

δ – термоградиентный коэффициент, %/°C;

A и B – функции основных параметров процессов сушки, а также теплофизических свойств сушильного агента и зерна;

J – количество рабочих дней в году;

L – расход сушильного агента, м³/ч;

ND – требуемая норма доходности;

S – площадь обрабатываемого зернового материала, м²;

V – объем обрабатываемого зернового материала, м³;

j – плотность потока влаги при сушке зерна в озонозодушной смеси, кг/(м·с);

v^{oz} – скорость движения озонозодушной смеси, м/с;

$v \cdot \rho$ – массовая скорость агента сушки, кг/(м²·с);

v_c – скорость сушки зерна данной культуры, % / ч;

γ – насыпная плотность зерна, кг/м;

a_3 – длина зерновки, мм;

b_3 – ширина зерновки, мм;

c_3 – толщина зерновки, мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева А.А. Обоснование термо-технологических приемов сушки пшеницы на сушилках типа «С»: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Авдеева Алла Аркадьевна. – М., 2003. – 200 с.
2. Авдеева В.Н. Воздействие озонированного воздуха на качественные показатели пшеницы / В.Н. Авдеева, Ю.А. Безгина // Вестник АПК Ставрополя. – 2013. – № 2 (10). – С. 97–100.
3. Авдеева В.Н. Применение экологических методов подавления патогенной микрофлоры зерна озимой пшеницы при хранении: дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.16 / Авдеева Валентина Николаевна. – Ставрополь, 2009. – 141 с.
4. Авторское свидетельство № 1095899 А1 СССР, МПК А01F 25/08. Способ сушки семян зерновых культур / Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко, Т.П. Троцкая; патентообладатель Гродненский сельскохозяйственный институт. – № 3355297; заявлено 04.09.1981; опубл. 07.06.1984. Бюл. № 21. – 5 с.
5. Анализ эффективности предпосевного озонирования семян в сравнении с другими известными методами обработки / В.Ю. Кирмасов [и др.] // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Воронеж, 29–30 апреля 2021 г.). – Ч. I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 109–117.
6. Баскаков И.В. Влияние озона на процесс сушки зерна / И.В. Баскаков, В.В. Чистохвалов // Приоритетные векторы развития промышленности и сельского хозяйства: материалы I междунар. науч.-практ. конф. (Макеевка, 26 апреля 2018 г.). – Т. III. – Макеевка: ГОУ ВПО Донбасская аграрная академия, 2018. – С. 31–36.
7. Баскаков И.В. Влияние процесса озонирования на процесс сушки зерна озимой пшеницы / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.С. Гончаров // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 ноября 2021 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ. – 2021. – С. 291–301.

8. Баскаков И.В. Интенсификация процесса сушки зерна озонородной смесью / И.В. Баскаков // Food Metaengineering. – 2023. – Т.1, № 3. – С. 21–32. – DOI: 10.37442/fme.2023.3.7.
9. Баскаков И.В. Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала: дис. ... д-ра с.-х. наук: 05.20.01 / Баскаков Иван Васильевич. – Воронеж, 2019. – 339 с.
10. Боуманс Г. Эффективная обработка и хранение зерна / Г. Боуманс: Пер. с англ. В.И. Даниевского. – М.: Агропромиздат, 1991. – 607 с.
11. Будников Д.А. Научно-методические основы определения параметров и режимов работы установок СВЧ-конвективной сушки зерна: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Будников Дмитрий Александрович. – М., 2020. – 405 с.
12. Буханцов К.Н. Озон и аэроионы: возможности и проблемы использования для сушки зерна (Часть 1) / К.Н. Буханцов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 11–17.
13. Васильчук Н.С. Предпосевная обработка семян озоном / Н.С. Васильчук, И.В. Шестерин // Агро XXI. – 2003/2004. – №7–12. – С. 67–68.
14. Вендин С.В. Конвейерная сушилка пророщенного зерна с применением конвективного и инфракрасного нагрева / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Р.З. Байрамов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2023. – № 1(37). – С. 19–26.
15. Вербицкая С.В. Предпосевная обработка семян фасоли озоном и магнитным полем: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Вербицкая Софья Викторовна. – зерноград, 2001. – 167 с.
16. Виртуальное исследование процесса сушки зерна в шахтных сушилках с тепловым насосом методами компьютерного моделирования / А.А. Шевцов [и др.] // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2024. – № 2(194). – С. 50–56. – DOI: 10.52190/2073-2597_2024_2_50.
17. Влияние коэффициента рециркуляции сушильного агента на его температуру в сушилке аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреен-

ко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – Т. 92, № 1. – С. 99–106. – DOI: 10.17816/0321-4443-632168.

18. Влияние озона на коррозионное поведение металлов и сплавов / И.В. Баскаков [и др.] // Наука в Центральной России. – 2024. – Т. 68, № 2. – С. 141–149. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-141-149.

19. Влияние температуры сушильного агента и влажности зерна на продолжительность процесса сушки в сушилке аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко [и др.] // Вестник Брянской ГСХА. – 2025. – № 6(112). – С. 61–65.

20. Влияние озонной обработки влажного зернового вороха на интенсификацию процесса сушки зерна озимой пшеницы / А.С. Гончаров [и др.] // Приоритетные векторы развития промышленности и сельского хозяйства: материалы III международной науч.-практ. конф. (Макеевка, 09 апреля 2020 г.). – Макеевка: ГОУ ВПО «Донбасская аграрная академия». – 2020. – С. 14-19.

21. Влияние предварительного озонирования зернового вороха на эффективность его сушки / А.С. Гончаров [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 08–09 июня 2021 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ. – 2021. – С. 312–321.

22. Влияние процесса озонирования на эффективность сушки семян / И.В. Баскаков [и др.] // Производство и переработка сельскохозяйственной продукции: менеджмент качества и безопасности: материалы V междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 25-летию факультета технологии и товароведения Воронежского гос. аграр. ун-та имени императора Петра I (Россия, Воронеж, 7–9 ноября 2018 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – С. 34–42.

23. Гержой А.П. Зерносушение и зерносушилки / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов. – М.: Колос, 1967. – 256 с.

24. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

25. Гинзбург А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
26. Голубкович А.В. Энергосбережение при активном вентилировании и низкотемпературной сушке зерна озono-воздушной смесью / А.В. Голубкович, С.П. Рудобашта, Н.Н. Нуриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 8. – С. 59–60.
27. Горский И.В. Обработка семян пшеницы озонированным воздухом: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Горский Илья Всеволодович. – М., 2004. – 202 с.
28. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: введ. 01.07.1986. – М.: Стандартиформ, 2011. – С. 36–64.
29. Демский Н.В. Исследование процессов послеуборочной обработки зерна / Н.В. Демский Д.В. Доброхотов, С.К. Манасян // Интеллект-2004: сб. материалов межрегиональной науч. конф. молодых ученых. – Красноярск, 2004. – С. 492–495.
30. Желтоухова Е.Ю. Исследование радиационно-конвективной сушки плодов апельсинов при комбинированном теплоподводе / Е.Ю. Желтоухова, М.С. Колесник, А.В. Терехина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2025. – Т. 87, № 1(103). – С. 204–210. – DOI: 10.20914/2310-1202-2025-1-204-210.
31. Жидко В.И. Зерносушение и зерносушилki / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 339 с.
32. Журавлев А.В. Математическое моделирование процесса сушки сыпучих сред в аппарате с закрученным потоком теплоносителя при СВЧ-энергоподводе / А.В. Журавлев, И.Н. Сухарев, Е.С. Бунин // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2025. – № 4. – С. 291–297. – DOI: 10.24412/2311-6447-2025-4-291-297.
33. Закладной Г.А. Биологическая активность озона в отношении вредителей зерна – рисового долгоносика и амбарного долгоносика / Г.А. Закладной,

Е.К.М. Саеед, Е.Ф. Когтева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 4. – С. 59–61.

34. Закладной Г.А. Современные направления защиты хранящегося зерна от насекомых: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.11 / Закладной Геннадий Алексеевич. – М., 1985. – 426 с.

35. Интенсификация процессов временного хранения и сушки зерна озонированием сушильного агента [Электронный ресурс] / А.В. Голубкович [и др.]. – Режим доступа: http://www.kge.msu.ru/ozone/archives/1rus_conf_pr/Presentations/Golubkovich.pdf (дата обращения: 12.04.2025).

36. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян / Д.А. Нормов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 1438–1451.

37. Исследование предпосевного озонирования семян / В.Ю. Кирмасов [и др.] // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 01 октября 2021 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 19–26.

38. Исследование процесса озонирования при сушке зерна / В.Ю. Кирмасов [и др.] // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 17 марта 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 55–62.

39. К определению продолжительности процесса сушки семян тыквы / А.И. Купреенко [и др.] // Вестник Брянской ГСХА. – 2024. – № 4(104). – С. 74-77.

40. Кей Р.Б. Введение в технологию промышленной сушки / Р.Б. Кей. – Пер. с англ. – Минск: Наука и техника, 1983. – 262 с.

41. Кирмасов В. Ю. Исследование режимов озонной обработки влажных семян кукурузы при предварительной подготовке посевного материала к сушке / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков, А.В. Химченко // Таврический вестник аграрной науки. – 2025. – № 2(42). – С. 136–146. – DOI: 10.5281/zenodo.16563774.

42. Кирмасов В.Ю. Влияние озонной обработки на интенсификацию процесса сушки семян зерновых культур / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 12 февраля 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 131–136.

43. Кирмасов В.Ю. Колориметрическая оценка содержания озона в воздухе в процессе сушки зерна / В.Ю. Кирмасов, А.А. Звягин, И.В. Баскаков // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – Т. 92, № 1. – С. 10–16. – DOI: 10.17816/0321-4443-633262.

44. Кирмасов В.Ю. Механизм удаления влаги из зерна при конвективной сушке / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 26 сентября 2025 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2025. – С. 223–229.

45. Кирмасов В.Ю. Озоновоздушная обработка зерна: экологические и экономические преимущества / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 29 января 2026 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2026. – С. 48–52.

46. Кирмасов В.Ю. Применение озона в тепличных хозяйствах / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 31 октября 2025 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2025. – С. 154–157.

47. Конвейерная сушилка пророщенного зерна с применением инфракрасного нагрева / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, А.Ф. Окунев, Р.З. Байрамов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 1(33). – С. 60–70.

48. Красноруцкий Н.И. Совершенствование конвейерной сушилки / Н.И. Красноруцкий, Ю.В. Саенко // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: материалы VI международной студенческой науч. конф. (Россия, Май-

ский, 13–15 марта 2024 г.). – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 100–101.

49. Кришер О. Научные основы техники сушки / О.Кришер. – Пер. с нем.; Под ред. А.С. Гинзбурга. – М.: Издательство, 1961. – 539 с.

50. Ксенз Н.В. Генерация озона коронным разрядом / Н.В. Ксенз, О.В. Меликова, И.Г. Сидорцов // Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе: материалы VI Российской науч.-практ. конф. (Ставрополь, 22-24 апреля 2011 г.). – Ставрополь, 2011. – С. 70–73.

51. Ксенз Н.В. Распределение озона от электроозонатора в воздушной среде производственного помещения / Н.В. Ксенз, И.Г. Сидорцов, А.В. Белоусов // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 4 (40). – С. 70–75.

52. Ксенз Н.В. Способы снижения энергоёмкости процесса сушки семян зерновых культур использованием электрофизических методов / Н.В. Ксенз, Н.И. Шабанов // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 2 (14). – С. 48–51.

53. Лебедев В.Б. Обработка и хранение семян / В.Б. Лебедев. – М.: Колос, 1983. – 243 с.

54. Лебедев П.Д. Расчет и конструирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.

55. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

56. Любарский Л.Н. Оценка эффективности работы охладительных камер зерносушилок / Л.Н. Любарский, М.А. Скороваров, Н.И. Малин // Хранение и переработка зерна. Серия: Элеваторная промышленность. – 1974. – Вып. 1. – С. 9–12.

57. Максименко Ю.А. Совершенствование тепломассообменных процессов при сушке кормовых дрожжей в диспергированном состоянии: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Максименко Юрий Александрович. – Астрахань, 2005. – 279 с.

58. Малин Н.И. Технология хранения зерна / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2005. – 240 с.

59. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2004. – 240 с.
60. Манасян С.К. Имитационное моделирование процессов сушки зерна в зерносушилках сельскохозяйственного назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Манасян Сергей Керопович. – Красноярск, 2009. – 403 с.
61. Место сушки в поточной комплексной организации послеуборочной обработки зерна / Н.В. Цугленок [и др.] // Аграрная наука на рубеже веков: материалы региональной научн. конф. Краснояр. гос. аграр. ун-та. – Красноярск, – 2007. – С. 235–237.
62. Моделирование процесса сушки с учетом кинетики и структуры потока высушиваемого материала / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, А.А. Шурак, Н.А. Меренцов // Технологии нефти и газа. – 2025. – № 1(156). – С. 54–59. – DOI 10.32935/1815-2600-2025-156-1-54-59.
63. Моделирование тепло- и массообменных процессов сушки с учетом структуры потоков / А.Б. Голованчиков, А.А. Шурак, Н.А. Меренцов, Н.А. Прохоренко. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – 200 с.
64. Нормов Д.А. Анализ существующих научных гипотез по влиянию озонородушной обработки на семена сельскохозяйственных растений / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, И.И. Федоров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 116. – С. 424–434.
65. Нормов Д.А. Баланс озона при детоксикации фуражного зерна / Д.А. Нормов, Д.В. Пожидаев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 94. – С. 348–359.
66. Нормов Д.А. Распределение озонородушной смеси в слое зерна / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 101. – С. 1897–1907.

67. Озонирование семенного материала – резерв повышения урожайности зерновых культур / И.В. Баскаков [и др.] // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию А.П. Тарасенко, д-ра техн. наук, заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора кафедры сельскохозяйственных машин Воронежского гос. агр. ун-та имени императора Петра I (Россия, Воронеж, 10 января 2017 г.). – Ч. II. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. – С. 10-16.

68. Озонная технология сушки зерна / Т.П. Троцкая [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии, 2008 – № 2 – С. 20–25.

69. Оценка влияния процесса озонирования на состояние здоровья персонала / В. С. Пиляев [и др.] // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Воронеж, 12–13 ноября 2020 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – С. 197–202.

70. Патент на изобретение № 2161398 С1 РФ, МПК А01F 25/08. Способ сушки зерновых культур / И.Ф. Бородин, Л.А. Ленский, М.М. Фомичев, Р.В. Ткачев; патентообладатель Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – № 99109836/13; заявлено 07.05.1999; опубл. 10.01.2001. Бюл. № 1. – 5 с.

71. Патент на изобретение № 2196417 С2 РФ, МПК А01F 25/00, А01F 25/08, А01F25/22, А23В 9/08, А23В 8/18. Способ сушки зерна и семян / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков; патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – №2001110265/13; заявлено 16.04.2001; опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2. – 8 с.

72. Патент на изобретение № 2228602 С1 РФ, МПК А01F 25/08. Способ сушки и хранения зерна и устройство для его осуществления / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков; патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – № 2003102928/12; заявлено 31.01.2003; опубл. 20.05.2004. Бюл. № 14. – 9 с.

73. Патент на изобретение № 2243463 С2 РФ, МПК F26В 3/04. Способ сушки и хранения зерна и устройство для его осуществления / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков, В.П. Чеботарев, А.С. Тимошек; патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – № 2003102392/06; заявлено 27.01.2003; опубл. 27.12.2004. Бюл. № 36. – 8 с.

74. Патент на изобретение № 2414113 С1 РФ, МПК А01С 1/00. Способ и комплекс для обработки зерна, семян или плодоовощной продукции озоном / Ю.М. Лужков, Ю.С. Соломонов, Н.В. Карягин [и др.]; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Московские озонаторы». – № 2009133051/13; заявлено 02.09.2009; опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8. – 20 с.

75. Патент на изобретение № 2709712 С1 РФ, МПК А01F 25/08. Способ сушки зернового материала / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, В.А. Гулевский, А.В. Чернышов, О.В. Чернова; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2019118552; заявлено 14.06.2019; опубл. 19.12.2019. Бюл. № 35. – 10 с.

76. Патент на изобретение № 2811707 С1 РФ, МПК F26В 17/12. Шахтная зерносушилка / А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Я.П. Домбровская; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий». – № 2023120012; заявл. 30.07.2023; опубл. 16.01.2024. Бюл. № 2. – 11 с.

77. Патент на изобретение № 2856555 С1 РФ, МПК F26В 25/22. Способ определения дополнительных энергозатрат на удаление из продукта связанной влаги в процессе сушки / В.М. Арапов [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий». – № 2025118883; заявл. 09.07.2025; опубл. 24.02.2026. Бюл. № 6. – 16 с.

78. Патент на полезную модель № 226053 U1 РФ, МПК А01F 25/08. Устройство для сушки зерна и семян зерновых культур / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.В. Чернышов, А.В. Лощенко;

патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – №2024108197; заявлено 28.03.2024; опублик. 20.05.2024. Бюл. № 14. – 4 с.

79. Пахомов В.И. Энергосберегающая технология комбинированной высокотемпературной конвективной сушки и озонвоздушной обработки зерна (Ч.1) / В.И. Пахомов, В.А. Максименко, К.Н. Буханцов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2013. – № 5 – С. 19–25.

80. Применение процесса озонирования в отраслях / И.Н. Стаканов [и др.] // Молодёжный вектор развития аграрной науки: материалы 68-й студенческой науч. конф. (Россия, Воронеж, март – июнь 2017 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. – С. 269–275.

81. Применение процесса озонирования в сельском хозяйстве / И.В. Баскаков [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – Вып. 3. – № 50. – С. 120–126.

82. Проблемы использования процесса озонирования в сельском хозяйстве / И.В. Баскаков [и др.] // Современные научно-практические решения в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 6–7 июня 2017 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 41–46.

83. Рашковская Н.Б. Исследование процесса сушки сыпучих материалов, паст и растворов химической промышленности в фонтанирующем слое: дис. ... д-ра техн. наук: 05.00.00 / Рашковская Наталия Борисовна. – Ленинград, 1969. – 321 с.

84. Результаты экспериментальных исследований сушилки / Ю.В. Саенко [и др.] // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2026. – № 1(49). – С. 21–32.

85. Романков П.Г. Высушивание и сушилки. / П.Г. Романков. – М.: Академия, 1934. – 132 с.

86. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии: Системы с твердой фазой / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская, В.Ф. Фролов. – Ленинград: Химия, 1975. – 333 с.

87. Рудобашта С.П. Исследование кинетики процесса конвективной сушки с учетом массопроводности: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Рудобашта Станислав Петрович. – М., 1967. – 153 с.

88. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1982. – 248 с.

89. Саеед Е.К.М. Биологическая активность озона как средства дезинсекции хранящегося зерна: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11 / Саеед Емад Касим Мохаммад. – М., 2004. – 134 с.

90. Сайко Д.С. Математическая модель теплопереноса при ИК-конвективной сушке пищевых материалов / Д.С. Сайко, С.А. Титов, Д.Г. Андреев // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сборник научных статей и докладов X международной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 19-20 ноября 2023 г.). – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 192–193.

91. Сафин Р.Р. Вакуумная сушка капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Сафин Руслан Рушанович. – Казань, 2007. – 414 с.

92. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682136. Сравнительный расчёт зерносушильных агрегатов / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко [и др.] (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2022681365; заявл. 08.11.2022; опубли. 18.11.2022. – Бюл. № 11. – 1 с.

93. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619507. Моделирование процесса конвективной сушки зерна с применением предварительной озонозвоздушной обработки / В.Ю. Кирмасов, А.В. Химченко, И.В. Баскаков (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2026618957; заявл. 03.04.2026; опубли. 03.04.2026. – Бюл. № 4. – 1 с.

94. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614948. Расчёт параметров процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке с электрокалорифером / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский,

А.В. Чернышов (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023614100; заявл. 08.03.2023; опубл. 08.03.2023. – Бюл. № 3. – 1 с.

95. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684040. Программа для расчета параметров процесса сушки с учетом кинетики и структуры потока высушиваемого материала / А.Б. Голованчиков, А.А. Шурак, Н.А. Меренцов, Н.А. Прохоренко (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2022684090; заявл. 09.12.2022; опубл. 09.12.2022. – Бюл. № 12. – 1 с.

96. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616467. Программа для расчета оптимальных технико-экономических параметров барабанной сушилки и сушилки с псевдоожиженным слоем высушиваемого материала / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, Н.А. Меренцов, А.А. Шурак (РФ); правообладатель ФГБОУ ВО ВолгТУ. – № 2020615716; заявл. 15.06.2020; опубл. 18.06.2020. – Бюл. № 6 – 1 с.

97. Семенов М.Д. Повышение энергоэффективности шахтной зерносушилки / М.Д. Семенов, К.В. Харченков // Материалы студенческой науч. конф. (Воронеж, 15-26 апреля 2024 г.). – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2024. – С. 120–121.

98. Сигачёва М.А. Влияние предпосевного озонирования семян на урожайность и качество зерна яровой мягкой пшеницы в Кузнецкой лесостепи: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.01 / Сигачёва Мария Александровна – Красноярск, 2015. – 152 с.

99. Смирнов А.А. Электротехнологическая озонаторная установка для обеззараживания кормовых смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. / Смирнов Александр Анатольевич. – М., 2014. – 23 с.

100. Совершенствование рециркуляционного способа сушки зерна / А.С. Гинзбург [и др.] // Хранение и переработка зерна. Серия: Элеваторная промышленность. – 1973. – 68 с.

101. Современные методы хранения зерна в хранилищах силосного типа / И.В. Баскаков [и др.] // Инновационные технологии и технические средства для

агропромышленного комплекса: материалы науч. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (Россия, Воронеж, март – июнь 2015 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – С. 15–20.

102. Сорокин А.Н. Влияние озонирования на посевные качества семян и урожайность клевера лугового / А.Н. Сорокин, Т.М. Морозова // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 3(55). – С.146–151.

103. Сорочинский В.Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна // В.Ф. Сорочинский / Комбикормовая промышленность. – 1996. – № 4. – С. 17–18.

104. Стаканов И.Н. The effect of preliminary ozonization of seeds before drying on their germination and germination energy / И.Н. Стаканов, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы междунар. V науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (на иностранных языках) (Россия, Воронеж, апрель 2019 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 151–154.

105. Стародубцева Г.П. Влияние озона на снижение токсичности зерна озимой пшеницы / Г.П. Стародубцева, Ю.А. Безгина, В.Н. Авдеева // Разработка новых южнороссийских технологий и технической базы для возделывания зерновых в зоне засушливого земледелия: сб. науч. тр. Всероссийской науч.-техн. конф. по результатам научных исследований за 2004 год (Россия, зерноград, 25–26 мая 2005 г.). – Зерноград, 2005. – С. 144–148.

106. Сторчевой В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды в птицеводстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Сторчевой Владимир Федорович. – М., 2004. – 283 с.

107. Суржик Т.В. Некоторые аспекты использования сушильных технологий / Т.В. Суржик, В.А. Щекина // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 17 (139). – С. 125–132.

108. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов [и др.]. – Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

109. Троцкая Т.П. Озонная технология сушки зерна / 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.

110. Троцкая Т.П. Сушка зерна с помощью озонозвоздушной смеси / Т.П. Троцкая // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 1. – С. 36–39.

111. Троцкая Т.П. Электроактивирование процессов сушки растительных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Троцкая Таисия Павловна. – М., 1998. – 31 с.

112. Трушкин В.А. Перспективы использования озона в сельскохозяйственном производстве / В.А. Трушкин, С.В. Шлюпиков, Т.И. Третьякова // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы X национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием (Россия, Саратов, 22 апреля 2019 г.). – Саратов: Изд-во ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 228–232.

113. Фролов В.Ф. Исследование тепло- и массообмена в процессах химической технологии с дисперсной твердой фазой: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Фролов Владимир Федорович. – Ленинград, 1974. – 363 с.

114. Целесообразность применения предварительного озонирования влажного зерна перед сушкой / И. В. Баскаков [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – № 4(70). – С. 114–126. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-114-126.

115. Шевцов А.А. Повышение эффективности сушки зерновых культур в рециркуляционной шахтной зерносушилке / А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сборник научных статей и докладов XII международной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 15–16 октября 2025 г.). – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2025. – С. 231–233.

116. Шестерин И.В. Влияние озона и протравителей на посевные качества и оздоровление яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.05, 06.01.11 / Шестерин Игорь Валерьевич. – Саратов, 2004. – 26 с.

117. Штанько Р.И. Электроозонаторная установка для сушки зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Штанько Роман Иванович. – зерноград, 2000. – 143 с.

118. Шустов Д.А. Упрощенный метод определения озона и двуокиси азота при совместном их присутствии в воздухе / Д.А. Шустов, Л.А. Бакулина // Гигиена и санитария. – 1975. – № 12 – С. 69–71.

119. Шхалахов Р.С. Параметры электроозонатора барьерного типа заданной стабильности для предпосевной обработки семян сахарной свеклы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Шхалахов Руслан Сафарович. – Краснодар, 2006. – 153 с.

120. Энергосберегающая технология сушки зерна / Н. В. Ксенз [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – № 2. – 2010. – С. 11–16.

121. Энергосбережение в электрифицированных технологиях на основе активации взаимодействующих сред / Н.В. Ксенз [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – № 4 (44). – 2018. – С. 16–20.

122. A review on ozonebased treatments for fruit and vegetables preservation / F.A. Miller, C.L. Silva, T.R. Brandao // Food Engineering Reviews. – 2013. – Vol. 5. – Pp. 77–106.

123. Brodowska A.J. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview / A.J. Brodowska, A. Nowak, K. Smigielski // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2018. – Vol. 58. – Pp. 2176–2201.

124. Controlling deterioration of high-moisture maize with ozone treatment / S.D. White [et al.] // Journal of Stored Products Research. – 2010. – Vol. 46. – Pp. 7–12.

125. Dubey P. Ozonation: An evolving disinfectant technology for the food industry / P. Dubey, A. Singh, O. Yousuf // *Food and Bioprocess Technology*. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 2102–2113.

126. Efcacy of ozone to reduce total viable count, yeast and mould count, coliform count and enterobacteriaceae count in raw onion and dehydrated onion products / V. Agnihotri [et al.] // *Plant Archives*. – 2018. – Vol.18. – Pp. 2811–2821.

127. Effect of drying and ozonation process on naturally contaminated wheat seeds / S.J. Granella [et al.] // *Journal of cereal science*. – 2018. – Vol. 80. – Pp. 205–211.

128. Effect of ozone gas processing on physical and chemical properties of wheat proteins / M. Obadi [et al.] // *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. – 2016. – Vol. 15. – Pp. 2147–2154.

129. Gaseous ozone treatment of chickpea grains, part I: Effect on protein, amino acid, fatty acid, mineral content, and microstructure / C. Nickhil [et al.] // *Food Chemistry*. – 2021. – Vol. 345. – P. 345.

130. Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review / B. Llavata // *Current Opinion in Food Science*. – 2020. – Vol. 35. – Pp. 20–26.

131. Investigations in intensification of grain drying by active ventilation applying ozone / A. Rucins [et al.] // *Engineering for Rural Development*. – 2020. – Vol. 19. – Pp. 231–237.

132. Mycoflora of high-moisture maize treated with ozone / S.D. White [et al.] // *Journal of Stored Products Research*. – 2013. – Vol. 55. – Pp. 84–89.

133. Ozone technology in food processing: A review / V. Prabha [et al.] // *Trends in Biosciences*. – 2015. – Vol. 6. – Pp. 4031–4047.

134. Power analysis of ozone generator for high capacity production / E. Yulianto [et al.] // *In Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1170. – Pp. 012013.

135. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry / S. Sivaranjani [et al.] // *Lwt-Food Science and Technology*. – 2021. – Vol. 146. – Pp. 111412.

136. Zhou X. Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review / X. Zhou, S. Wang // *Drying Technology*. – 2019. – Vol. 37. – Pp. 271–286.

137. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products / F. Zhu // *Food Chemistry*. – 2018. – Vol. 264. – Pp. 358–366.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023614948

Расчёт параметров процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке с электрокалорифером

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I" (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Кирмасов Владислав Юрьевич (RU), Баскаков Иван Васильевич (RU), Оробинский Владимир Иванович (RU), Чернышов Алексей Викторович (RU)*

Заявка № 2023614100

Дата поступления 08 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 марта 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Рисунок А1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023614948 «Расчет параметров процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке с электрокалорифером»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 226053**Устройство для сушки зерна и семян зерновых культур**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Кирмасов Владислав Юрьевич (RU), Баскаков Иван Васильевич (RU), Оробинский Владимир Иванович (RU), Гиевский Алексей Михайлович (RU), Чернышов Алексей Викторович (RU), Лощенко Алексей Владиславович (RU)*

Заявка № 2024108197

Приоритет полезной модели 28 марта 2024 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 мая 2024 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 28 марта 2034 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3b53164ba9f6f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Рисунок А2 – Патент на полезную модель РФ №226053 «Устройство для сушки зерна и семян зерновых культур»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026619507

**Моделирование процесса конвективной сушки зерна с
применением предварительной озоновоздушной
обработки**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I" (ФГБОУ ВО Воронежский
ГАУ) (RU)*

Авторы: *Кирмасов Владислав Юрьевич (RU), Химченко Аркадий
Васильевич (RU), Баскаков Иван Васильевич (RU)*

Заявка № 2026618957

Дата поступления 03 апреля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2026 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

Рисунок А3 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026619507 «Моделирование процесса конвективной сушки зерна с применением предварительной озоновоздушной обработки»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Внедрение научных исследований в учебный и производственный процесс

KOBLIK GROUP

ООО «Воронежсельмаш»
 ИНН/КПП 3664104210/366301001
 ОГРН 1103668017551
 р/с 40702810500000038458
 БИК 044525700,
 АО «Райффайзенбанк», г. Москва
 К/с 30101810200000000700
 юридический и почтовый адрес:
 394056, РФ, г. Воронеж,
 ул. Солдатское поле, 285/5

Исх. № 34 от 16.06.2025г.

Председателю диссертационного совета на соискание
 ученой степени кандидата наук, на соискание ученой
 степени доктора наук 35.2.008.01, созданного на базе
 федерального государственного бюджетного
 образовательного учреждения высшего образования
 «Воронежский государственный аграрный университет
 имени императора Петра I»
 Оробинскому В.И.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «Воронежсельмаш», входящее в состав консорциума «KOBLIK GROUP», подтверждает, что на основе проведенных научных исследований аспирантом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ В.Ю. Кирмасовым обоснованы и предоставлены компании практические рекомендации по совершенствованию зерносушильных комплексов посредством применения предварительной озонной обработки влажного зернового вороха. Предложенная автором конструкция имеет признаки интеллектуальной собственности, что подтверждается полученным вузом патентом РФ на полезную модель №226053. Аспирантом В.Ю. Кирмасовым была аргументирована необходимость применения предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой с уточнением рациональных режимов озонной обработки. Рекомендовано озонирование проводить в буферных силосах, установленных перед шахтной зерносушилкой, при концентрации озона в озоновоздушной смеси 9 мг/м³. Это позволит сократить время сушки зерна кукурузы при температуре сушильного агента 38°C в 1,6 раза по сравнению с традиционной сушкой. Помимо этого, предварительная озонная обработка влажных семян кукурузы перед их сушкой позволит повысить энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян на 5% и 4% соответственно относительно традиционного метода сушки.

Полученные результаты научных исследований аспирантом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ В.Ю. Кирмасовым предприятия сельхоз-машиностроения консорциума «KOBLIK GROUP», в частности ООО «Воронежсельмаш», использует при разработке и проектировке инновационных зерносушильных комплексов.

Технический директор группы компаний
 «KOBLIK GROUP»



Карпенко Р.Н.

Рисунок Б1 – Акт о внедрении результатов НИР в производственную деятельность ООО «Воронежсельмаш»

РЕКОМЕНДОВАНО
Учебно-методической комиссией
агроинженерного факультета
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ
Протокол № 9 от 22.05.2025 г.
Председатель Костиков О.М.



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный аграрный универси-
тет имени императора Петра I»
Андреев А.В.
« 26 » _____ 2025 г.



**Акт о внедрении результатов
научных исследований в учебный процесс**

Комиссия в составе представителей кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ заведующего кафедрой Оробинского В.И., профессора Гиевского А.М. и членов учебно-методической комиссии агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ Афоничева Д.Н., Козлова В.Г. составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований, выполненных на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ ассистентом Кирмасовым В.Ю. под руководством профессора Баскакова И.В., внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия» при изучении дисциплины «Механизация и автоматизация технологических процессов в растениеводстве».

Результаты исследований используются при выполнении обучающимися курсового проекта, а также при проведении лабораторных работ, связанных с определением эффективности сушки зернового материала. Кроме того, результаты научных исследований используются при чтении лекций и в ходе выполнения выпускных квалификационных работ на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.

Использование представленных результатов научных исследований в учебном процессе способствует повышению качества образования и совершенствованию профессиональной подготовки обучающихся.

Представители
Учебно-методической комиссии
агроинженерного факультета
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:

Афоничев Д.Н.

Козлов В.Г.

Представители кафедры
сельскохозяйственных машин,
тракторов и автомобилей
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:

Оробинский В.И.

Гиевский А.М.

Рисунок Б2 – Акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс кафедры сель-
скохозяйственных машин, тракторов и автомобилей

УТВЕРЖДАЮ
 Врио ректора ФГБОУ ВО «Воронежский
 государственный аграрный университет
 имени императора Петра I»
 Воронина А.А.
 «15» июня 2026 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» подтверждает, что учебно-научно-технологическим центром «Агротехнология» для доведения влажных семян кукурузы до базисных кондиций по влажности был использован способ сушки, реализованный в лабораторной установке, изготовленный на основе патента РФ на полезную модель № 226053, предложенный аспирантом кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» Кирмасовым В.Ю., включающий предварительную озоноздушную обработку влажного посевного материала перед сушкой с последующим применением лабораторной шахтной зерносушилки.

Исходный ворох кукурузы влажностью 26% подвергали двум способам сушки:

1. С предварительной озоноздушной обработкой (с дозой 500-600 мин·мг/м³) и последующей сушкой в лабораторной зерносушилке в течение 3,5 часов.

2. Контрольный вариант – сушка на открытом воздухе без предварительного озонирования. При этом время сушки до кондиционной влажности составило 54 часа.

После сушки были отобраны образцы для определения лабораторной всхожести семян. Установлено, что применение озоноздушной обработки с последующей сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке позволило:

- сократить время сушки влажных семян кукурузы в 15,4 раза;
- повысить лабораторную всхожесть семян кукурузы на 8% по сравнению с контрольным образцом.

Учитывая важность проблемы получения качественных семян, считаем целесообразным дальнейшее внедрение в производство предложенный способ предварительной озоноздушной обработки с последующей сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке при работе с влажным зерновым материалом.

Представители
 Учебно-научно-технологического
 центра «Агротехнология»:

директор  Лобастов А.А.
 агроном  Власова Л.М.



Представители
 кафедры сельскохозяйственных
 машин, тракторов и автомобилей
 ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:
 профессор  Баскаков И.В.
 профессор  Оробинский В.И.

Рисунок Б3 – Акт о внедрении результатов НИР в учебно-научно-технологический центр «Агротехнология»



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Новоусманская земля»
 Мануковский А.А.

«16» 06 _____ 2026 г.



УТВЕРЖДАЮ

Врио ректора ФГБОУ ВО
 Воронежский государственный
 аграрный университет имени
 императора Петра I

Воронина А.А.

«17» 06 _____ 2026 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «Новоусманская земля» подтверждает, что аспирантом кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» Кирмасовым В.Ю. была проведена совместная работа по оценке эффективности предварительной озоноздушной обработки посевного материала кукурузы. Также была обоснована конструкция зерносушильного оборудования, на которое получен патент РФ №226053.

На предприятии была отобрана пробная партия влажного зернового вороха кукурузы с исходной влажностью 25%. В присутствии представителей предприятия на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей была проведена сушка семян на лабораторной шахтной зерносушилке с предварительной озоноздушной обработкой (доза озона 540 мин·мг/м³, температура агента сушки 40 °С). Высушенные и подготовленные семена кукурузы, а также семена контрольной партии, не подвергающейся озонированию, были посеяны на предприятии на экспериментальном участке площадью 75 м² для определения урожайности. В результате было установлено, что применение предварительной озоноздушной обработки посевного материала кукурузы позволило повысить урожайность на 13%.

На основании полученных результатов предприятие считает целесообразным внедрение предварительного озонирования в технологическую линию сушки посевного материала кукурузы. Предприятие планирует оснастить зерносушильное оборудование озонаторами согласно патенту №226053 и использовать результаты исследований при подготовке семенного материала.

Представители
 ООО «Новоусманская земля»:

главный инженер

 Проскурин И.С.

Представители
 Кафедры сельскохозяйственных
 машин, тракторов и автомобилей
 ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:
 профессор

Баскаков И.В.

профессор

Оробинский В.И.

Рисунок Б4 – Акт о внедрении результатов НИР в производственную деятельность ООО «Новоусманская земля»