

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель: **Баскаков Иван Васильевич**, доктор сельскохозяйственных наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Дранников Алексей Викторович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств;

Прохоренко Наталья Андреевна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», доцент кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

Защита состоится 29 октября 2026 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=13694>.

Автореферат разослан 04 сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Уборка кукурузы в большинстве регионов РФ проходит при влажности зерна 20-26%, что значительно превышает кондиционное состояние, при котором его следует хранить. Это делает сушку обязательным элементом послеуборочной обработки, требующим интенсификации. Перспективным решением является предварительная озонозвоздушная обработка. Озон ослабляет связи влаги с органическими компонентами зерна и расширяет межклеточные мембраны, облегчая выход воды из внутренних слоев на поверхность. Такой подход позволяет не только ускорить сушку и сократить энергозатраты, но и одновременно обеззаразить зерно, стимулировать его развитие и снизить образование токсичных веществ, обеспечивая экологическую чистоту продукции.

Следовательно, исследования, направленные на интенсификацию процесса сушки зерна кукурузы посредством предварительной озонозвоздушной обработки, являются актуальными и позволяют 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 использования озонозвоздушной смеси как компонента сушильного агента, позволяющая ускорить процесс сушки. Однако в них отсутствуют единые теоретические подходы к описанию влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы, предварительно обработанного озонозвоздушной 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 озонозвоздушной смесью.

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

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

Задачи исследования:

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

- выявить зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы, предварительно обработанного озоновоздушной смесью, от температуры сушки и параметров озонирования;
- разработать техническое решение устройства для сушки зерна с предварительной озоновоздушной обработкой;
- экспериментально определить режимы предварительной озоновоздушной обработки зерна кукурузы перед подачей в шахтную зерносушилку.

Научная новизна:

- установлена закономерность изменения влагосодержания зерна кукурузы во времени при конвективной сушке от коэффициентов влагопроводности, термовлагопроводности, теплопроводности, критерия фазовых превращений, эквивалентного радиуса зерна и его плотности, отличающаяся учетом влияния предварительной озоновоздушной обработки в виде коэффициента интенсификации влагопереноса;
- выявлена зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке зерна кукурузы от параметров процесса термического воздействия и предварительной озоновоздушной обработки, отличающаяся учетом концентрации озона и времени озонирования;
- предложено техническое решение устройства для сушки зерна, отличающееся наличием предварительной озоновоздушной обработки с постоянным мониторингом режимов озонирования;
- определены режимы предварительной озоновоздушной 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 озоновоздушной обработки на интенсификацию процесса сушки; зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке предварительно проозонированного зерна кукурузы, учитывающая температуру сушильного агента, концентрацию озона и время озоновоздушной обработки, дополняющие теорию сушки зерна.

Практическую значимость представляют программы для ЭВМ (свидетельства № 2023614948 и № 2026619507 РФ), реализующие математическую модель конвективной сушки зерна кукурузы, предварительно обработанного озоновоздушной смесью; устройство для сушки зерна (патент № 226053 РФ) с применением предварительного озонирования; режимы предварительной озоновоздушной 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 озоновоздушной обработки;
- зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса при конвективной сушке предварительно проозонированных зёрен кукурузы, позволяющая определить влияние температуры сушильного агента, концентрации озона и времени озоновоздушной 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, консорциумом «KOBLiK GROUP» при разработке инновационных зерносушильных комплексов, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке магистров по направлению «Агроинженерия».

Личный вклад заключается в обосновании актуальности выбранной темы, формулировке цели и задач исследований, выборе методов и разработке частных методик исследований, проведении лабораторных экспериментов, 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 2 приложения. Список литературы включает 137 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы диссертационной работы, приводятся цель исследования, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, объект и предмет исследования, описана методология и методы, а также положения, выносимые на защиту и т.д.

В первом разделе «Анализ способов сушки зерна и поиск перспективных направлений совершенствования конструкций зерносушилок» проведен обзор существующих способов сушки зерна. Наиболее перспективным является конвективный способ, так как он имеет равномерный прогрев, высокий КПД, низкое энергопотребление, возможность модернизации конвективных зерносушилок. Для его реализации с предварительным озонированием наиболее подходящей является шахтная зерносушилка непрерывного действия. Основным недостатком классической сушки – использование обычного нагретого воздуха. Подача озона непосредственно в сушилку проблематична: озон опасен, при нагреве разлагается, а сушилка негерметична, что ведёт к утечкам газа. Поэтому предложен новый подход – использовать озонозодушную смесь не во время сушки, а в качестве предварительной обработки влажного зерна в герметичном буферном силосе. Обоснована необходимость создания теории, описывающей влияние предварительной обработки озоном на кинетику последующей сушки.

Во втором разделе «Теоретические аспекты интенсификации процесса сушки зерна предварительной озонозодушной обработкой» проведённый обзор теоретических исследований, посвященных влиянию озона на зерновку, показал, что в настоящее время отсутствуют комплексные математические модели, позволяющие определить зависимость влагосодержания зерна, предварительно обработанного озонозодушной смесью от времени операции при конвективной сушке.

Наиболее полное и систематизированное описание процессов переноса тепла и влаги при сушке капиллярно-пористых тел приведено в трудах А.В. Лыкова, которое до настоящего

времени является фундаментальной основой для большинства исследований в данной области. Согласно этой теории, влагосодержание зерна описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dx} \cdot \left(a_{\text{вл}} \cdot \frac{dw}{dx} + a_{\text{т.вл}} \cdot \frac{dT}{dx} \right) \\ c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

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·°C); T – температура зерна, °C; c – удельная теплоёмкость влажного материала, отнесенная к массе сухого вещества, Дж/(кг·°C); ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности влажного материала, Вт/(м·°C); ε – критерий фазовых превращений, показывающий долю влаги, испаряющейся внутри материала; r – теплота парообразования, Дж/кг; 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.

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 ее к более доступным формам, допускающим экспериментальную проверку. Для этого первое уравнение системы (1) преобразуем по правилу суммы дифференциалов, в результате чего получаем

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d \left(a_{\text{вл}} \frac{dw}{dx} \right)}{dx} + \frac{d \left(a_{\text{т.вл}} \frac{dT}{dx} \right)}{dx}. \quad (2)$$

Сначала было сделано допущение, что коэффициенты влагопроводности, термовлагопроводности и теплопроводности изменяются в небольшом диапазоне, поскольку рассматривается один тип культуры – зерно кукурузы. Это позволяет принять эти коэффициенты постоянными и вынести их за знак производной. Переходя к форме вторых производных, преобразуем уравнение (2) к виду

$$\frac{dw}{dt} = a_{\text{вл}} \frac{d^2 w}{dx^2} + a_{\text{т.вл}} \frac{d^2 T}{dx^2}. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим второе уравнение исходной системы (1). Постоянство коэффициента теплопроводности позволяет раскрыть производную и после преобразований получить выражение для второй производной температуры по времени

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} - \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt}}{\lambda}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в уравнение (3), получаем

$$\frac{dw}{dt} = a_{\text{вл}} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \left(c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt} - \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \cdot \frac{dw}{dt} \right). \quad (5)$$

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

$$\frac{dw}{dt} = \frac{a_{\text{вл}} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot c \cdot \rho_0 \cdot \frac{dT}{dt}}{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0} \quad (6)$$

В полученном уравнении (6) изменение влагосодержания зависит от второй производной влажности по координате и от скорости изменения температуры по 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 (6) 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:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{a_{\text{вл}} \frac{d^2 w}{dx^2}}{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0} \quad (7)$$

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

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{dw}{dt} \cdot \frac{1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0}{a_{\text{вл}}} \quad (8)$$

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

$$w = \frac{m_{\text{вл}}}{m_z}, \quad (9)$$

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

Причем общая масса влаги в зерне равна

$$m_{\text{вл}} = m_{\text{вл.об}} + m_{\text{вл.зар}} + m_{\text{вл.вн}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{вл.об}}$ – масса влаги в оболочке зерна, г; $m_{\text{вл.зар}}$ – масса влаги в зародыше, г; $m_{\text{вл.вн}}$ – масса влаги внутри зерна, г.

Общая масса зерна равна

$$m_z = m_{\text{об}} + m_{\text{вн}} + m_{\text{зар}}, \quad (11)$$

где $m_{\text{об}}$ – масса оболочки зерна, г; $m_{\text{вн}}$ – масса внутренней части зерна, г; $m_{\text{зар}}$ – масса зародыша, г.

Исходя из полученных равенств (9–11), получаем

$$w = \frac{m_{\text{вл}}}{m_z} = \frac{m_{\text{вл.об}} + m_{\text{вл.зар}} + m_{\text{вл.вн}}}{m_z} = \frac{m_{\text{вл.об}} + m_{\text{вл.зар}}}{m_z} + \frac{m_{\text{вл.вн}}}{m_z} \quad (12)$$

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

$$w_n = \frac{m_{\text{вл.об}} + m_{\text{вл.зар}}}{m_z} \quad (13)$$

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

$$w_{\text{вн}} = \frac{m_{\text{вн.вн}}}{m_3}. \quad (14)$$

Из выражений (12–14) следует, что полная влажность зерна равна сумме относительной поверхностной и внутренней влажности

$$w = w_n + w_{\text{вн}}. \quad (15)$$

Исходя из полученного равенства (15) получаем следующее выражение:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d(w_n + w_{\text{вн}})}{dt} = \frac{dw_n}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}. \quad (16)$$

С учетом подстановки (16) в уравнение (8) получаем

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\left(1 + \frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0\right) \cdot \left(\frac{dw_n}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{вл}}}. \quad (17)$$

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

$$\frac{dw}{dx} = \frac{(w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{x} = \frac{(w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3/2} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right). \quad (18)$$

Тогда, выражая вторую производную, получим

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right)^2. \quad (19)$$

Приравняв выражения (17) и (19), приходим к следующему:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \left(\frac{dw_{\text{п}}}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{вл}}} = (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}}) \cdot \left(\frac{2}{r_3}\right)^2. \quad (20)$$

Выполнив алгебраические преобразования, приведем уравнение к виду:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \left(\frac{dw_{\text{п}}}{dt} + \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}\right)}{a_{\text{вл}}} = \frac{4 \cdot (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3^2}. \quad (21)$$

В период постоянной скорости сушки количество влаги, поступающей из внутренних слоёв к поверхности, равно количеству влаги, испаряющейся с поверхности в окружающую среду. Поэтому скорость поступления влаги к поверхности и скорость её удаления можно

считать одинаковыми и постоянными во времени. Основываясь на этом, выражение (21) примет следующий вид:

$$\frac{\left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right) \cdot \frac{dw_{\text{вн}}}{dt}}{a_{\text{вл}}} = \frac{4 \cdot (w_{\text{п}} - w_{\text{вн}})}{r_3^2}. \quad (22)$$

Используя введенное ранее соотношение $w_n = w - w_{\text{вн}}$ (15), после алгебраических преобразований выразим $\frac{dw_{\text{вн}}}{dt}$

$$\frac{dw_{\text{вн}}}{dt} = \frac{4 \cdot a_{\text{вл}} \cdot (w - 2 \cdot w_{\text{вн}})}{r_3^2 \cdot \left(\frac{a_{\text{т.вл}}}{\lambda} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 + 1\right)}. \quad (23)$$

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 теплопроводности и термовлагопроводности зависят не только от температуры сушильного агента, но и от наличия озона.

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

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{w}{w_{\text{вн}}}. \quad (24)$$

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

Исходя из выражений (12) и (14), получаем

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{w}{w_{\text{вн}}} = \frac{m_{\text{вл.об}} + m_{\text{вл.зар}} + m_{\text{вл.вн}}}{m_{\text{вл.вн}}}. \quad (25)$$

Заменим $m_{\text{вл.об}} = m_{\text{вл.пов}} - m_{\text{вл.зар}}$,

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

Тогда выражение (25) будет иметь следующий вид:

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл.зар}}}{m_{\text{вл.вн}}} - \frac{m_{\text{вл.зар}} - m_{\text{вл.пов}}}{m_{\text{вл.вн}}} + 1. \quad (26)$$

Упростив выражение (26), получим

$$k_{\text{инт}}^{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл.пов}}}{m_{\text{вл.вн}}} + 1. \quad (27)$$

Распределение массы влаги для поверхностного слоя составляет около 10-15% от общей массы влаги в зерне и около 85-90% для внутренней части. 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.

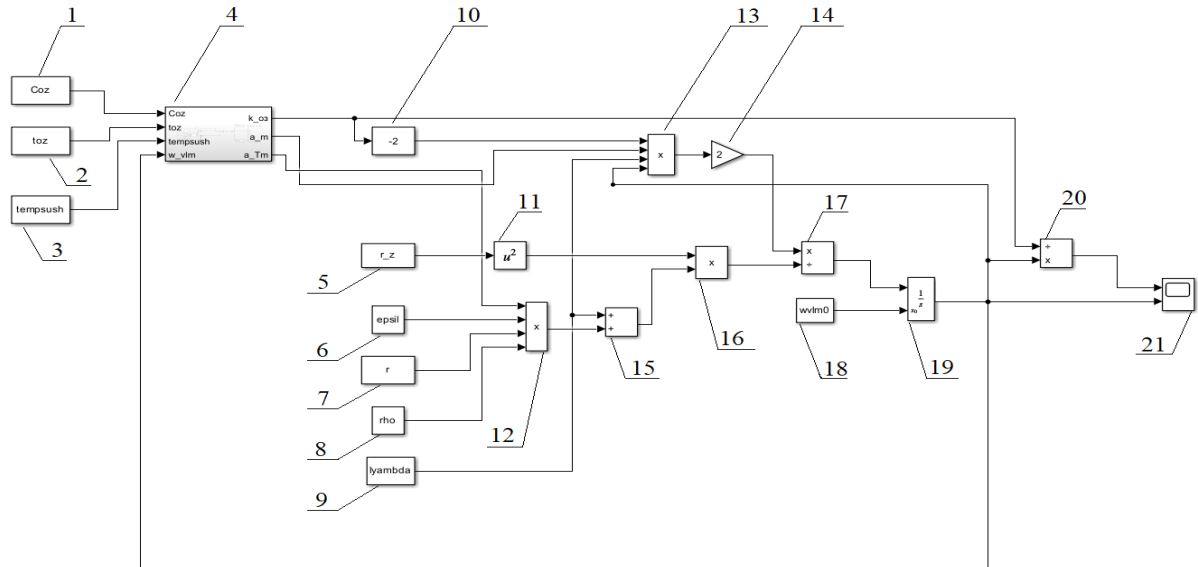
Заменив $w_{\text{вн}} = \frac{w}{k_{\text{инт}}^{\text{вл}}}$ и выполнив математические преобразования выражение (23) примет следующий вид:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{4a_{\text{вл}} \cdot \lambda \cdot w \cdot (k_{\text{инт}}^{\text{вл}} - 2)}{r_3^2 \cdot (\lambda + a_{\text{т.вл}} \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0)}. \quad (28)$$

Полученное уравнение представляет собой модель кинетики влагопереноса, описывающую изменение полного влагосодержания зерна во времени при конвективной сушке с учё-

том 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.

Для решения полученного дифференциального уравнения (28) и идентификации его параметров используется имитационное моделирование. Структурная схема модели, реализующей уравнение (28) представлена на рисунке 1.



1 – концентрация озона, 2 – время озонирования, 3 – температура сушки, 4 – блок определения параметров влагопереноса, 5 – 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 1 – Схема модели процесса конвективной сушки зерна с предварительной озоновоздушной обработкой

Для определения основных параметров использовали данные ранее проведенных исследований. Теплоту парообразования r принимали 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. 1). Средний радиус зерна был принят равным 4,6 мм.

Таблица 1 – Средние значения постоянных параметров регрессионной 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

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

$$a_{вл} = a_1^{вл} \cdot T + a_2^{вл} \cdot T^2 + a_3^{вл} \cdot C_{оз} \cdot t_{оз}, \quad (29)$$

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

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 коэффициентов уравнения регрессии, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии (29)

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 $R_{кор}^2=0,803$

Для коэффициента термовлагопроводности $a_{т.вл}$ было установлена следующая зависимость:

$$a_{т.вл} = a_0^{т.вл} + a_1^{т.вл} \cdot T + a_2^{т.вл} \cdot T^2 + a_3^{т.вл} \cdot C_{оз} \cdot t_{оз}, \quad (30)$$

где $a_1^{т.вл}$, $a_2^{т.вл}$, $a_3^{т.вл}$ – коэффициенты уравнения регрессии, $a_0^{т.вл}$ – свободный член уравнения.

Значения коэффициентов уравнения регрессии (30) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии (30)

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

Для параметров $a_3^{вл}$ и $a_3^{т.вл}$ Разброс полученных значений оказался невелик, статистическая проверка подтвердила нормальность распределения и слабую зависимость от режимов озонирования, поэтому приняты их средние значения (табл. 4).

Таблица 4 – Средние значения для параметров $a_3^{вл}$ и $a_3^{т.вл}$

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

Зависимость коэффициента интенсификации влагопереноса аппроксимирована линейным уравнением

$$k_{инт}^{вл} = a_0^k + a_1^k \cdot T + a_2^k \cdot C_{оз} \cdot t_{оз}, \quad (31)$$

где a_0^k – свободный член уравнения; a_1^k , a_2^k – коэффициенты уравнения регрессии; $C_{оз}$ – концентрация озона, мг/м³; $t_{оз}$ – время озоновоздушной обработки, с.

Результаты статистической обработки представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии (31)

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

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

$$a_2^k = b_1 \cdot T + b_2 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}, \quad (32)$$

где b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

Результаты статистической обработки представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов уравнения регрессии (32)

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 $R_{кор}^2=0,788$

Таким образом, с учётом полученных коэффициентов уравнения (29-31) примут следующий вид:

- коэффициент влагопроводности $a_{вл}$:

$$a_{вл} = 2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,96304 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}; \quad (33)$$

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

$$a_{т.вл} = 1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,866888 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}; \quad (34)$$

- коэффициент интенсификации влагопереноса $k_{инт}^{вл}$:

$$k_{инт}^{вл} = 1,1521 - 0,00013186 \cdot T + C_{oz} \cdot t_{oz} \cdot (6,7017 \cdot 10^{-7} \cdot C_{oz} \cdot t_{oz} - 1,6402 \cdot 10^{-5} \cdot T). \quad (35)$$

Для периода падающей 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 (33) и (34), полученных для периода постоянной скорости сушки, получены следующие зависимости:

$$a_{вл} = \frac{2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,9325 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}}{a_5 \cdot e^{\frac{a_5}{W_{min}^{a_7}}}}, \quad (36)$$

$$a_{т.вл} = \frac{1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,90741 \cdot C_{oz} \cdot t_{oz}}{a_6 \cdot e^{\frac{a_6}{W_{min}^{a_7}}}}, \quad (37)$$

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

В результате идентификации получились значения, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Средние значения параметров регрессионной 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:

$$a_{\text{вл}} = \frac{2,4875 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,7472 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 2,96304 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{0,7843 \cdot e^{\frac{2,7626}{W_{\text{мин}}^{0,227}}}}; \quad (38)$$

- коэффициент термовлагопроводности:

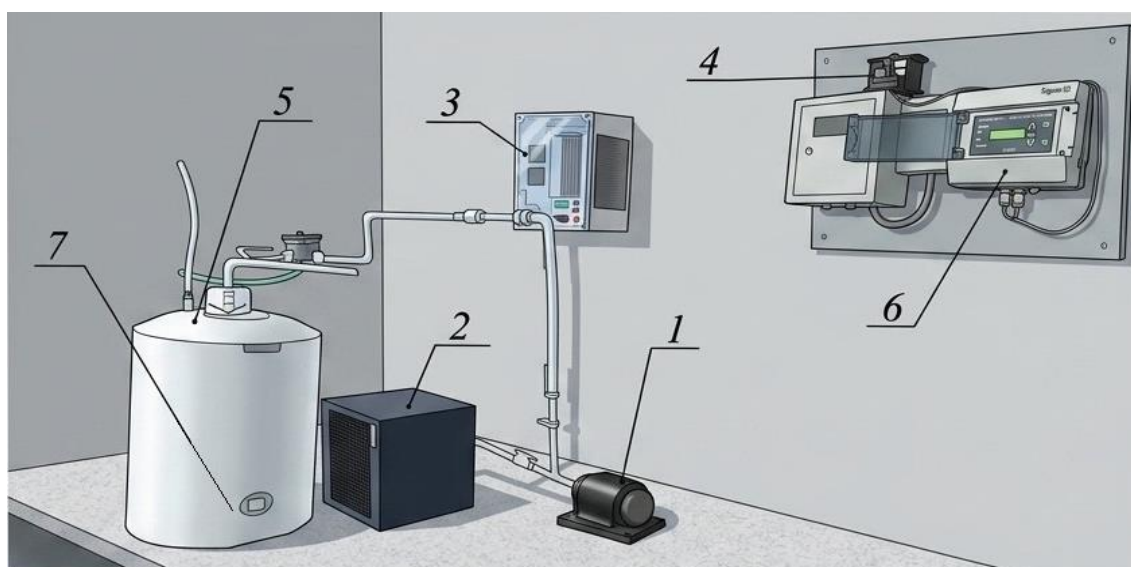
$$a_{\text{т.вл}} = \frac{1,5742 \cdot 10^{-7} - 5,0979 \cdot 10^{-9} \cdot T + 4,9722 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 0,866888 \cdot C_{\text{оз}} \cdot t_{\text{оз}}}{e^{\frac{1,2239}{W_{\text{мин}}^{0,227}}}}. \quad (39)$$

Таким образом, установлены регрессионные зависимости для коэффициентов 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. Все идентифицированные параметры статистически обоснованы и пригодны для расчета кинетики влагопереноса при различных температурах и режимах озонирования.

В третьем разделе «Программа и методика проведения экспериментальных исследований» представлена программа экспериментальных исследований, описаны используемые приборы и оборудование, а также методы статистической обработки опытных данных.

Программа экспериментальных исследований включала проектирование лабораторной установки, позволяющей провести эксперимент по предварительной озоновоздушной обработке зерна; лабораторную установку по сушке влажных зерен и две лабораторных шахтных зерносушилки с коробами и с жалюзи.

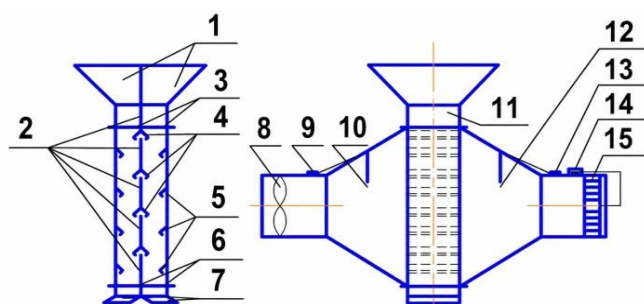
Экспериментальную часть исследований по предварительной озоновоздушной обработке зерна проводили на разработанной лабораторной установке, представленной на рисунке. 2.



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

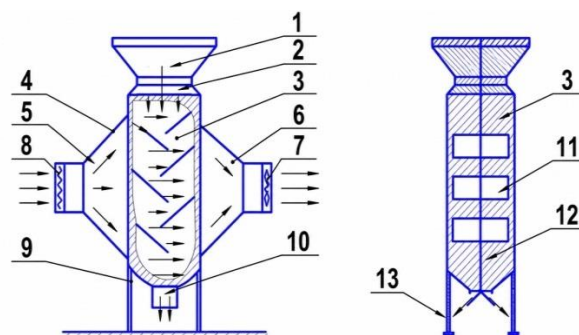
Рисунок 2 – Компонентная схема лабораторной установки по предварительному озонированию влажного зернового материала перед сушкой

Для оценки эффективности предварительного озонирования влажного зерна были сконструированы лабораторные шахтные зерносушилки с коробами и с жалюзи, представленные на рисунках 3 и 4. Особенностью данных зерносушилок является то, что устройства загрузки и выгрузки зернового вороха были разделены на две симметричные части. Сделано это для того, чтобы можно было проводить одновременно сушку озонированного и необработанного зерна, при одинаковых условиях.



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; 12 – камера горячего воздуха; 14 – терморегулятор; 15 – электрический нагревательный элемент

Рисунок 3 – Схема лабораторной шахтной зерносушилки

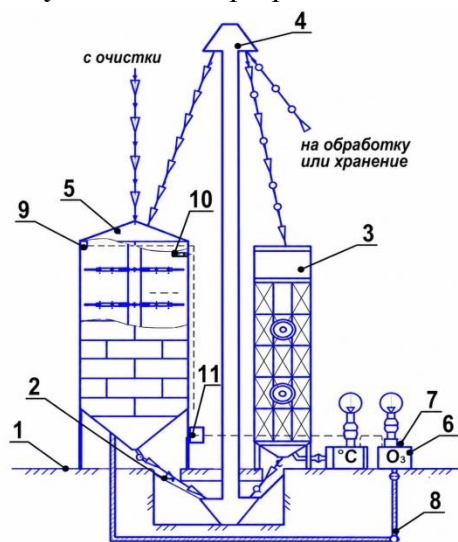


1 – загрузочный бункер; 2 – заслонка подачи зерна; 3 – сушильная шахта; 4 – жалюзи; 5 – камера горячего воздуха; 6 – камера холодного воздуха; 7 – вентилятор; 8 – электронагреватель; 9 – заслонка разгрузки; 10 – разгрузочные каналы; 11 – отверстия для движения воздуха; 12 – перегородки; 13 – рама

Рисунок 4 – Схема лабораторной жалюзийной зерносушилки

Обработку экспериментальных данных выполняли с использованием методов математической статистики. Основными задачами являлись: оценка достоверности полученных результатов, выявление наличия или отсутствия систематических ошибок, а также построение регрессионных моделей для описания зависимости исследуемых параметров от различных факторов.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса сушки» было разработано техническое решение, на которое получен патент РФ на полезную модель №226053 (рис. 5). Технический результат достигается тем, что устройство, включающее металлическое конусное зернохранилище с системой озонирования, состоящее из озонатора, датчиков определения концентрации озона, воздухопроводов, компрессора, тихоходной норрии, 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 норрии; 3 – зерносушилка; 4 – норрия; 5 – буферный силос; 6 – озонатор; 7 – компрессор; 8 – трубопровод; 9 – датчик определения концентрации озона; 10 – влагомер; 11 – электронный блок управления

Рисунок 5 – Устройство для сушки зернового материала (патент № 226053 РФ)

В результате экспериментального исследования по обоснованию рациональных режимов озонирования влажного зерна кукурузы перед его сушкой было установлено, наибольшую относительную скорость сушки имеют зёрна, которые предварительно озонировались с дозой озоновоздушной обработки $600 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$ (рис. 6). Следовательно, предварительное озонирование влажного зернового вороха перед последующей операцией сушки зернового материала следует проводить при дозе озоновоздушной обработки $600 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$, что обеспечит сокращение времени воздействия температуры на зерно при исходной влажности 21-22% на 60 минут или в 1,33 раза (рис. 7).

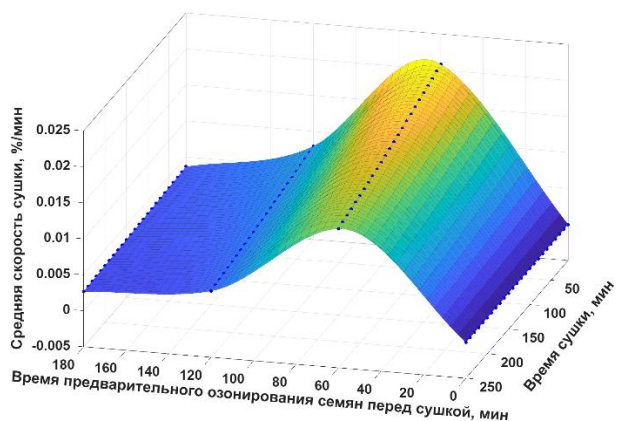
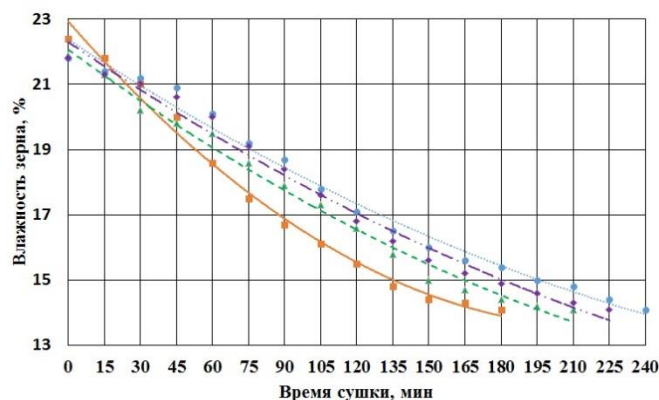


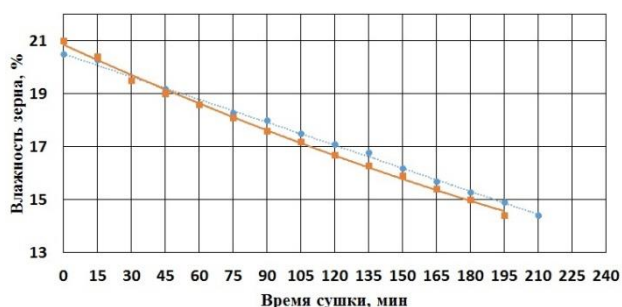
Рисунок 6 – Изменение относительной скорости сушки зерна в зависимости от времени озонозооной обработки и времени сушки при концентрации озона в озонозооной смеси 10 мг/м^3



1 – необработанный образец; 2 – доза озона 600 мин·мг/м^3 ; 3 – доза озона 1200 мин·мг/м^3 ; 4 – доза озона 1800 мин·мг/м^3

Рисунок 7 – Изменение влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемых образцов при различных дозах озонозооной обработки

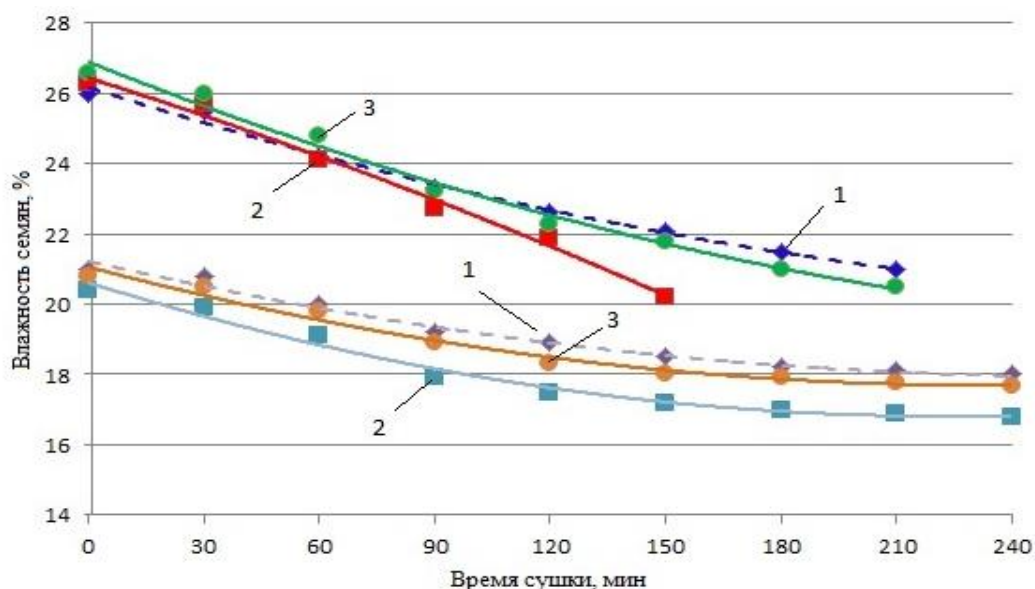
Результаты исследований по определению эффективности шахтного и жалюзийного типа зерносушилок при предварительной озонозооной обработке влажного зерна кукурузы представлены на рисунке 8. В результате было установлено, что предпочтительнее использовать шахтный тип зерносушилок, в которых перемешивание зернового вороха происходит более интенсивно, что позволит сократить время сушки на 7,5-12,5% относительно применения жалюзийных зерносушилок.



1 – зависимость изменения влажности зерна кукурузы контрольного образца на шахтной зерносушилке; 2 – зависимость изменения влажности зерна кукурузы с предварительной озонозооной обработкой на шахтной зерносушилке; 3 – зависимость изменения влажности зерна кукурузы контрольного образца на жалюзийной зерносушилке; 4 – зависимость изменения влажности зерна кукурузы с предварительной озонозооной обработкой на жалюзийной зерносушилке

Рисунок 8 – Изменение влажности зерна кукурузы при сушке необработанного и предварительно озонируемого зернового вороха на шахтной и жалюзийной зерносушилках

В результате экспериментальных исследований по определению влияния предварительного озонирования влажного зерна кукурузы на интенсификацию процесса последующей сушки (рис. 9) установлено, что наиболее эффективно сушка зерна протекает при предварительном озонировании с концентрацией озона 9 мг/м^3 . 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/м^3 , время уменьшилось на 90 минут или в 1,6 раза.



1 – контроль; 2 – проозонированные зерна с концентрацией озона 9 мг/м^3 ; 3 – проозонированные зерна с концентрацией озона 11 мг/м^3

Рисунок 9 – Динамика снижения влажности зерна кукурузы в зависимости от способа подготовки зерна кукурузы к сушке

В результате исследований по определению влияния предварительного озонирования влажных семян кукурузы перед сушкой на их посевные качества установлено, что данное воздействие перед термической обработкой при температуре 38°C положительно влияет на посевные качества, наилучшая эффективность достигается при часовой обработке озоном с концентрацией 9 мг/м^3 , способствуя повышению энергии прорастания (рис. 10) и лабораторной всхожести семян (рис. 11) на 5% и 4% соответственно, относительно традиционного метода сушки.

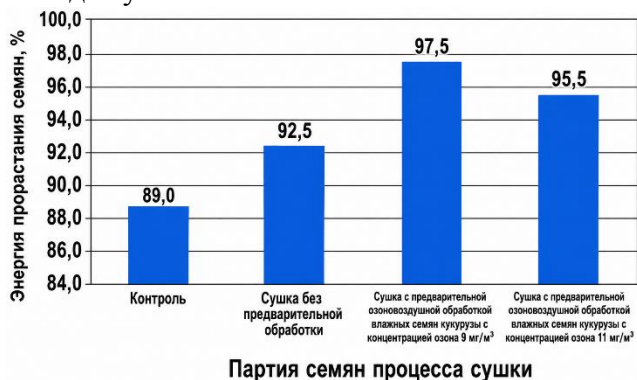


Рисунок 10 – Влияние предварительной озонозоудной обработки семян кукурузы перед сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке на энергию прорастания

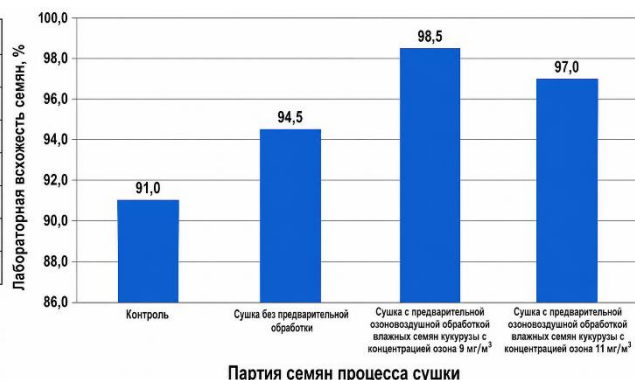


Рисунок 11 – Влияние предварительной озонозоудной обработки семян кукурузы перед сушкой в лабораторной шахтной зерносушилке на лабораторную всхожесть

На рисунке 12 приведено сопоставление расчетных кривых с экспериментальными точками для различных режимов. Результаты проверки адекватности разработанной модели подтверждают адекватность разработанной математической модели, включающей теоретические зависимости влагосодержания зерна от времени операции при конвективной сушке и коэффициента интенсификации влагопереноса с учетом предварительной озонозоудной обработки.

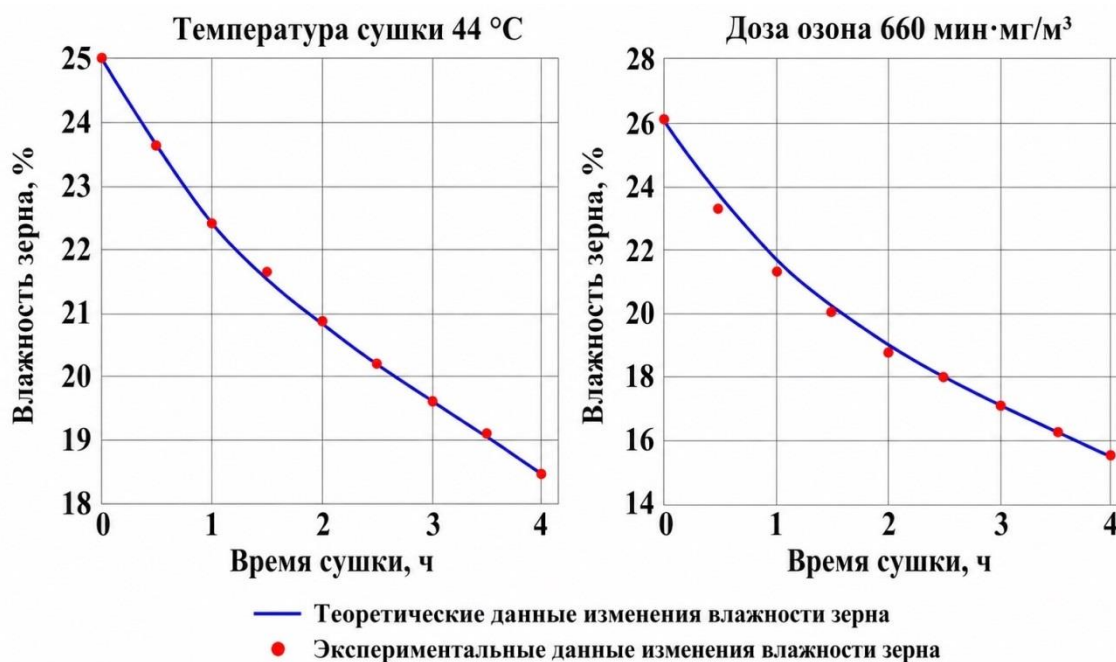


Рисунок 12 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных для сушки без предварительной озоновоздушной обработки и с её применением

Разработанная модель позволяет с высокой точностью (погрешность $<1,5\%$) прогнозировать динамику изменения влажности зерна кукурузы при различных температурах сушильного агента и доз озоновоздушной обработки. Полученная зависимость может быть использована для оптимизации режимов сушки и проектирования технологических линий с применением предварительной озоновоздушной обработки.

На основе разработанной математической модели был проведен расчетный эксперимент с целью оценки влияния основных технологических параметров на кинетику сушки зерна кукурузы. Было установлено, что повышение температуры с 40 до 60 °C 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 озоновоздушной обработки зерна кукурузы.

В пятом разделе «Экономическая эффективность применения предварительной озоновоздушной обработки влажного зерна перед шахтной зерносушилкой» приведён расчёт экономической эффективности применения предварительной озоновоздушной обработки влажного зерна кукурузы в сравнении с классической сушкой на шахтной зерносушилке. В результате экономической оценки установлено, что при совершенствовании зерносушильного комплекса при капитальных вложениях 1442346 рублей при объеме производства 2500 т/год, срок окупаемости составит 1,67 года, а годовой экономический эффект порядка 1002971,8 рублей. Экономический эффект достигается за счёт повышения класса зерна, что позволяет реализовать его по более высокой цене, и за счёт интенсификации процесса сушки.

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 озонородушную 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 озонородушной 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 озонородушной 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 озонородушной обработки 500...600 мин·мг/м³, причем целесообразно применять зерносушилки с коробами, поскольку их эффективность по времени операции на 7,5...12,5 % выше, чем у зерносушилок с жалюзи.

6. Применение предварительного озонирования влажного зерна кукурузы перед шахтной зерносушилкой с концентрацией озона в озонородушной смеси 2...18 мг/м³ интенсифицирует процесс сушки, сокращая время операции при температуре агента от 33 °С 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 озонородушная 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 1442346 рублей и объеме производства 2500 т/год срок окупаемости составит 1,67 года при годовом экономическом эффекте 1002971,8 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 озонородушную обработку, основываясь на техническое решение, защищенное 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 учетом их разного состава, уточнение режимных параметров озонаторной установки при обработке различных культур.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. Целесообразность применения предварительного озонирования влажного зерна перед сушкой / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.В. Химченко, **В.Ю. Кирмасов**, О.В. Черно-

ва // Наука в центральной России. – 2024. – № 4(70). – С. 114-126. – DOI 10.35887/2305-2538-2024-4-114-126.

2. **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.

3. **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.

Патент на полезную модель

4. Патент на полезную модель № 226053 U1 РФ, МПК A01F 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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614948 РФ. 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. – Заявка № 2023614100; дата поступления 08.03.2023. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.03.2023. Бюл. №3.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026619507 РФ. Моделирование процесса конвективной сушки зерна с применением предварительной озоновоздушной обработки / **В.Ю. Кирмасов**, А.В. Химченко, И.В. Баскаков (РФ); правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Заявка №2026618957; дата поступления 03.04.2026. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.04.2026. Бюл. №4.

Публикации в материалах конференций, научных журналах и сборниках научных трудов

7. Оценка влияния процесса озонирования на состояние здоровья персонала / В.С. Пиляев, **В.Ю. Кирмасов**, Д.Б. Болотов [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.

8. Анализ эффективности предпосевого озонирования семян в сравнении с другими известными методами обработки / **В.Ю. Кирмасов**, Д.Б. Болотов, К.В. Голиков [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.

9. Озонирование, как способ предпосевной обработки зернового материала / А.С. Корнев, **В.Ю. Кирмасов**, Д.Б. Болотов, И.Е. Павловский // 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. 336-342.

10. Обзор конструктивных схем зерносушилок / **В.Ю. Кирмасов**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] // Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова): материалы национальной науч.-практ. конф. (Воронеж, 20 октября 2022 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 318-325.

11. Исследование процесса озонирования при сушке зерна / **В.Ю. Кирмасов**, И.В. Баскаков, Д.Б. Болотов [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.

12. **Кирмасов В.Ю.** Анализ способов сушки семян и зерна / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков** // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Воронеж, 01-28 марта 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 286-290.
13. **Кирмасов В.Ю.** Техника безопасности при эксплуатации зерносушилок / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков** // Современные научно-практические решения в АПК: материалы международной студенческой науч.-практ. конф. (Воронеж, 23 октября 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 61-65.
14. **Кирмасов В.Ю.** Обзор устройств и способов для обработки и сушки семян зерновых культур / **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, 30 ноября 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 174-180.
15. **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.
16. **Кирмасов В.Ю.** Классификация зерносушильных установок / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков** // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 75-й национальной науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Воронеж, 15 февраля-31 марта 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 421-425.
17. **Кирмасов В.Ю.** Использование озона при сушке овса / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков** // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 сентября 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 141-146.
18. **Кирмасов В.Ю.** Обзор конструкций для сушки зерна / **В.Ю. Кирмасов, В.О. Рамазанова, А.В. Чернышов** // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 сентября 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 146-152.
19. **Кирмасов В.Ю.** Перспективы применения озона в сельском хозяйстве / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков, Е.А. Кондобарова** // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 31 января 2025 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2025. – С. 261-266.
20. **Кирмасов В.Ю.** Механизм удаления влаги из зерна при конвективной сушке / **В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков** // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 26 сентября 2025 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2025. – С. 223-229.

Просим принять участие в работе диссертационного совета 35.2.008.01 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю Д.Н. Афоницеву Телефон (473) 224-39-39 (доб. 3320); e-mail: et@agroeng.vsau.ru.