

На правах рукописи



ГОЛОВИН Антон Дмитриевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХРАНЕНИЯ
СЕМЯН КОЛОСОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РЕГУЛИРУЕМОЙ
ОЗООНОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

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: **Саенко Юрий Васильевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», профессор инженерного факультета;
Латышенок Надежда Михайловна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», доцент кафедры «Организация транспортных процессов и безопасность жизнедеятельности».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

Защита состоится 29 января 2026 г. в 14 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=12780>.

Автореферат разослан 05 декабря 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Продовольственную безопасность государства обеспечивает сельское хозяйство, в котором зернопроизводство играет основную роль. Приоритетным направлением развития агропромышленного комплекса является широкое использование передовых технологий и технических средств, основанных на современном уровне развития науки и техники. В большинстве современных зернохранилищ наблюдаются повышенные потери зерна, вызванные отсутствием должного мониторинга за его состоянием и невозможностью влиять на газовую среду межзернового пространства. В случае неблагоприятных условий хранения происходит снижение качества зерна и семян зерновых культур. Поэтому в период хранения следует использовать современные технологии, которые способствуют поддержанию посевных качеств на должном уровне.

На сегодняшний день на первый план выходят экологически безопасные методы ведения сельского хозяйства, минимизирующие вредоносное воздействия на окружающую среду без снижения качественных и экономических показателей. К наиболее перспективному способу обработки семян зерновых культур при хранении относится процесс озонирования. Использование озона не приводит к загрязнению окружающей среды благодаря его бактерицидным, дезинфицирующим, обеззараживающим свойствам. Следует отметить, что современное состояние техники позволяет провести озонную обработку непосредственно в зернохранилище, что позволяет обеспечить регулируемую озоновоздушную среду. Данный метод минимизирует влияние вредных химических препаратов на экологию, при этом увеличивает сроки безопасного хранения семян зерновых культур. Поэтому совершенствование технологического процесса хранения семян зерновых культур за счет применения озоновоздушной смеси и разработка устройства для его реализации является актуальной темой исследования.

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», раздел «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. Анализ научных источников показывает, что проблема сохранения посевных качеств семян колосовых зерновых культур при хранении остаётся одной из актуальных и для её решения применяются различные методы обработки: химический, физический и биотехнологический. Среди них всё большее распространение получает озонная обработка, отличающаяся экологической безопасностью и высокой эффективностью воздействия. Процесс озонирования в сельскохозяйственной отрасли изучали такие ученые как, В.Н. Авдеева, И.В. Баскаков, Н.С. Васильчук, Ю.В. Саенко, Н.М. Латышенко, И.В. Горский, Г.А. Закладной, Д.А. Нормов, А.Н. Сорокин, Г.П. М.А. Сигачева, Стародубцева, Е.В. Тышкевич, А. Aboltins, S.A. Kells, F. Mendes, а также ряд других отечественных и зарубежных ученых. Однако исследование проводили в достаточно узкой проблематике. Поэтому эмпирической базы по влиянию процесса озонирования на качество хранящихся семян зерновых культур и безопасных сроков хранения недостаточно. Остаётся открытым вопрос о том, как озоновоздушная смесь распространяется в зерновом ворохе при разном времени обработки. Следовательно, существует необходимость в дальнейшем изучении процесса озонирования семян колосовых зерновых культур при хранении с целью определения режимов обработки, а также в разработке устройства, обеспечивающего поддержание регулируемой озоновоздушной среды внутри зернохранилища.

Объект исследования: процесс озонной обработки семян колосовых зерновых культур.

Предметом исследования являются взаимосвязи озонной обработки с посевными качествами семян колосовых зерновых культур.

Цель диссертационной работы: повышение сохранности посевных качеств семян колосовых зерновых культур за счёт применения озонной обработки.

Задачи исследования:

- установить закономерность изменения очага распространения озоновоздушной смеси в зерновом слое с течением времени;
- выявить зависимости количества форсунок, подающих озоновоздушную смесь в зернохранилище, и среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку от параметров пневмосистемы;
- усовершенствовать устройство для хранения семян колосовых зерновых культур с регулируемой озоновоздушной средой в межзерновом пространстве;
- оценить влияние озонной обработки семян колосовых зерновых культур при хранении на их посевные качества и заражённость грибковыми заболеваниями.

Научная новизна диссертационной работы:

- закономерность изменения очага распространения озоновоздушной смеси в зерновом слое с течением времени, отличающаяся тем, что размеры и форма очага определяются по регрессии на основе гауссовского процесса;
- зависимость количества форсунок, подающих озоновоздушную смесь в зернохранилище, отличающаяся учётом расходных характеристик пневматической системы, объёма зернохранилища, концентрации озона в озоновоздушной смеси и времени озонирования, а также процессов диффузии и разложения озона;
- зависимость среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку, отличающаяся учётом расстояния между форсунками, концентрации озона, скорости разложения озона и продолжительности обработки;
- устройство для хранения семян колосовых зерновых культур с регулируемой озоновоздушной средой в межзерновом пространстве, отличающееся тем, что управление процессом озонирования осуществляется по сигналам датчиков температуры и влажности.

Теоретическую значимость имеют: закономерности изменения формы и размера очага распространения озоновоздушной смеси внутри зернового вороха при различных режимах обработки; зависимость скорости изменения объёма распространения очага озоновоздушной смеси от времени обработки; зависимость количества форсунок, подающих озоновоздушную смесь в зернохранилище, от параметров пневматической системы, объёма зернохранилища, расстояния между форсунками, концентрации озона и времени озонирования; зависимость среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку от параметров пневмосистемы, констант диффузии и разложения озона, которые дополняют теорию взаимодействия озоновоздушной смеси с зерном.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что определены режимы озонной обработки, обеспечивающие максимальную скорость роста очага озоновоздушной смеси в зерновом ворохе; разработаны компьютерные программы, реализующие математические модели аэрации озоновоздушной смесью зернохранилища для установления конструктивных и режимных параметров системы озонирования, зоны распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования, для прогнозирования поведения озона внутри зернового вороха и управление процессом озонирования; усовершенствовано устройство для хранения семян колосовых зерновых культур с регулируемой озоновоздушной средой в межзерновом пространстве, позволяющее повысить сохранность посевных качеств и снизить заражённость грибковыми заболеваниями.

Методология и методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы использовали методы системного анализа, статистики и математического моделирования. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в соответствии с требованиями действующих стандартов и разработанными частными методиками. Обработка результатов исследований выполнена с использованием программ Microsoft Excel, КОМПАС 3D, MATLAB, Simulink, KompasFlow.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерность изменения очага распространения озонородной смеси в зерновом слое с течением времени, позволяющая определить размер и форму очага озонной обработки;
- зависимость количества форсунок, подающих озонородную смесь в зернохранилище, обеспечивающая равномерность озонной обработки хранящихся семян колосовых зерновых культур;
- зависимость среднего объёмного расхода озонородной смеси через форсунку, позволяющая определить параметры системы озонирования;
- устройство для хранения семян колосовых зерновых культур с регулируемой озонородной средой в межзерновом пространстве, позволяющее повысить сохранность посевных качеств и снизить заражённость грибковыми заболеваниями, а также результаты экспериментальной оценки влияния озонной обработки семян при хранении на их посевные качества и заражённость грибковыми заболеваниями.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты теоретических исследований согласуются с данными экспериментов. Достоверность результатов и выводов достигается использованием общенаучных приёмов и методов исследований. Эмпирическая база работы сформирована на основе опытных данных, полученных в ходе проведения исследований в лабораторных условиях.

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и задач исследования, анализе степени разработанности темы, выборе методов исследования, проведении экспериментов и анализе полученных результатов, формулировке выводов, выполненных лично автором; в проведении теоретических исследований, моделировании процесса распространения озонородной смеси в зерновом ворохе, выявлении закономерностей влияния озонной обработки на посевные качества семян колосовых зерновых культур при хранении и степень заражённости грибковыми заболеваниями, усовершенствовании устройства для хранения семян колосовых зерновых культур, выполненных при участии автора; подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе четыре статьи в российских журналах, включенных в перечень ВАК, получено два патента Российской Федерации на полезные модели и четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 148 источников, списка условных сокращений и приложений. Диссертация изложена на 167 страницах, включает 51 рисунок, 10 таблиц и два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе «Анализ состояния технологии хранения семян зерновых культур» представлен обзор современных конструкций и способов обработки семян зерновых культур во время хранения. Проведен патентный поиск технических средств, обеспечивающих озонную обработку семян зерновых культур. Проанализированы теоретические исследования процесса озонирования семян зерновых культур.

В результате анализа установлено, что наиболее перспективными являются металлические хранилища силосного типа с конусным дном, в которых обеспечивается полноценный контроль за состоянием семян и минимальны механические повреждения хранящегося сырья, а также есть возможность дальнейшего совершенствования путем создания регулируемой озонородной среды. Среди современных способов обработки семян зерновых культур озонирование является экологически безопасным, так как озон имеет мощные окислительные, дезинфицирующие, фунгицидные и бактерицидные свойства, которые позволяют

уничтожать различные грибковые заболевания, а также способствуют поддержанию посевных качеств семян зерновых культур. Современное техническое оборудование при соблюдении техники безопасности позволит обеспечить озонную обработку без нанесения вреда жизни и здоровью человека экологически безопасным способом. В ходе анализа теоретических исследований был выявлен недостаток информации о поведении озоновоздушной смеси в зерновом слое.

Во втором разделе «Теоретические основы распределения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе» представлено теоретическое обоснование определения формы, размера и объема очага распространения озона в зерновом ворохе, получена зависимость скорости изменения объема распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе от времени обработки, а также зависимости количества подающих озоновоздушную смесь форсунок в зернохранилище и среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку от параметров пневмосистемы.

Применение процесса озонирования зерна в хранилище требует понимания процессов распространения озона в зерновом ворохе. Эти достаточно сложные гидродинамические процессы описываются уравнениями гидродинамики для сжимаемых жидкостей. Поэтому исследование данного вопроса проводилось с помощью численных экспериментов, построенных на моделях цифровой гидродинамики. В настоящее время это позволяют сделать отечественные программные продукты Flow Vision, KompasFlow, входящие в состав пакета Компас 3D.

Для проведения экспериментов в программе Компас 3D была создана модель ёмкости, аналогичная экспериментальной, в которую были добавлены частицы, по размеру соответствующие среднему диаметру семени. Модель позволила получить распределение скоростей потока озоновоздушной смеси в слое зерна в векторной форме. Установлено, что на начальном этапе распространения озона внутри зернового вороха газ движется за счёт давления воздуха, создаваемого компрессором. Поэтому при выходе из сопла озоновоздушная смесь направлена параллельно оси газовода. Газ, попадающий в зерновой ворох, пронизывает его через межзерновое воздушное пространство. При этом меньшая часть озона абсорбируется в зерне через межклеточные мембраны, а оставшаяся часть озоновоздушной смеси по законам диффузии по наименьшему сопротивлению движется в зерновом слое. По мере удаления от сопла до некоторого момента зона распространения озона увеличивается. Создаётся эпицентр с максимальной концентрацией. Затем за счёт возрастающего сопротивления зернового материала, уменьшающейся скорости озоновоздушного потока, самораспада озона и протеканию ряда химических реакций действие газа ослабевает и в конечном итоге исчезает. Поэтому, при вертикальной подаче озоновоздушной смеси и равномерном сопротивлении зернового вороха форма распространения озона близка к эллипсоиду. При этом из-за малого объёма межзернового пространства и, как следствие, большого сопротивления озоновоздуш-

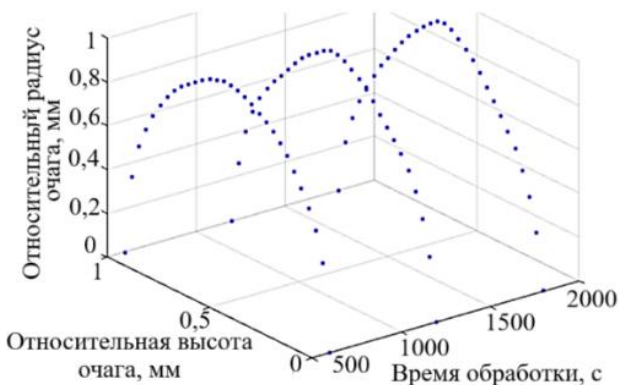
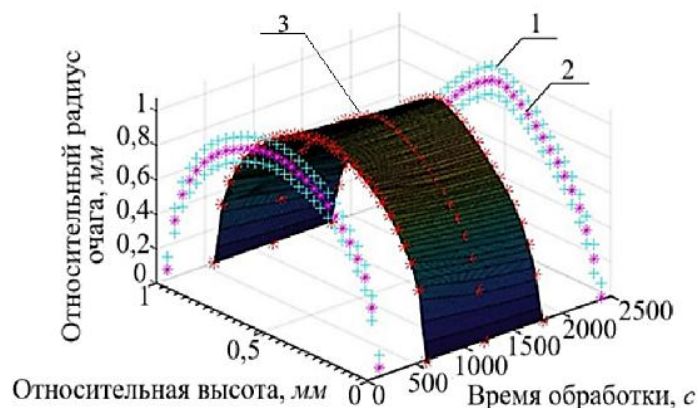


Рисунок 1 – Закономерность изменения относительного радиуса озонной обработки от относительной высоты и времени обработки

ному потоку эллипсоид со временем операции будет в большей степени увеличиваться в диаметре, нежели в высоту. Для определения формы объема обработанного зернового вороха из программы KompasFlow взяли исходные данные, которые перевели в относительные величины для нормирования радиуса обработки и высоты озонного эллипсоида путем деления фактического размера на максимальный параметр. Закономерности изменения относительного радиуса озонной обработки от относительной высоты и времени проведения операции представлены на рисунке 1. Поскольку процесс распространения озона в ворохе имеет случайные составляющие,

было принято решения о поиске модели описания формы обработанного объема на основе гауссовых процессов. При этом важно сделать правильный выбор в отношении видов функций ядра и их взаимосвязи.

Поэтому необходимо определиться с гиперпараметрами модели. Подбор параметров модели осуществлялся на основе оптимизации Байеса. Следовательно, тогда для понимания, с какой точностью модель будет предсказывать то, как меняется форма очага распространения озона при разном времени обработки, необходимо определить доверительный интервал для предсказанных значений (рис. 2).



1 – 95% доверительный интервал; 2 – прогноз; 3 – очаг распространения

Рисунок 2 – Общий вид формы распространения очага озона в зерновом ворохе с предсказаниями и доверительным интервалом

Анализ полученных результатов показывает, что вероятность ошибки в предсказаниях зоны распространения озона в зерновом ворохе невелика, о чем свидетельствует узкий доверительный интервал.

Таким образом, на данном этапе исследования получена закономерность изменения очага распространения озона в зависимости от времени обработки, которая приближена к эллипсоиду, но имеет другое математическое описание в виде регрессии на основе гауссовых процессов. Получена модель, позволяющая прогнозировать зону распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования. По результатам теоретических исследований получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024614311, позволяющее прогнозировать зону распространения очага озоновоздушной смеси в зерновом ворохе.

Объем (V_o) обработанной поверхности зернового материала определяется интегрированием, которое можно представить в цилиндрической системе координат в виде следующего выражения:

$$V_o = \int_0^h \int_0^{2\pi} r(\varphi, h) d\varphi dh, \quad (1)$$

где V_o – объем проозонированного зернового материала, $мм^3$; $r(\varphi, h)$ – зависимость радиуса очага распространения озона в зерне от высоты h при угле φ поворота радиус-вектора точки или границы обработанной поверхности, $мм$.

С учетом полученных моделей зависимостей формы и размера очага от времени обработки выражение примет следующий вид:

$$V(t) = \int_0^{h_{max}(t)} 2\pi \frac{(r_{max}(t) \cdot r_{отн}(h_{отн}, t))^2}{2} dh, \quad (2)$$

где t – время обработки, $с$, $r_{max}(t)$ – изменение максимального радиуса от времени, $мм$; $r_{отн}(h_{отн}, t)$ – изменение относительного радиуса и относительной высоты от времени; $h_{max}(t)$ – изменение максимальной высоты от времени, $мм$.

В результате численного интегрирования получена графическая закономерность изменения объёма обработанного озонем зерна от времени озонирования, представленная на рисунке 3.

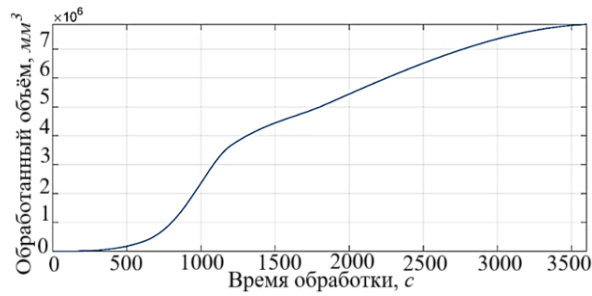


Рисунок 3 – Изменение объёма очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки

Анализ полученных результатов показывает, что данная закономерность имеет некоторые точки перегиба. Следовательно, скорость изменения объёма обработанного озонем зерна в этих точках меняется, поэтому она может быть критерием оптимизации. Скорость изменения обработанного объёма зерна озонородушной смесью вычисляется по формуле

$$v_V(t) = dV_o(t)/dt, \quad (3)$$

где v_V – скорость озонной обработки объёма зерна, $мм^3/с$.

Скорость озонной обработки единицы объёма зерна, рассчитанная численными методами, показана на рисунке 4.

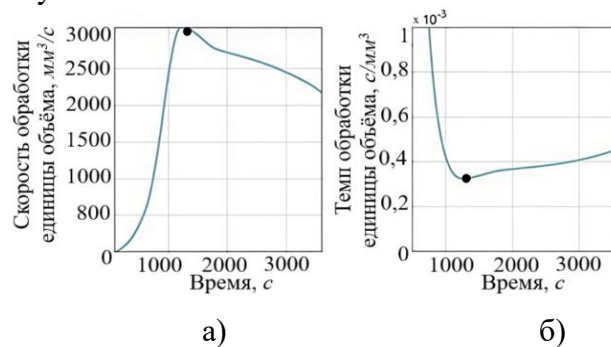


Рисунок 4 – Скорость изменения обработанного объёма зерна озонородушной смесью (а) и темп обработки объёма зерна (б) в зависимости от времени озонирования

Анализ результатов исследований показывает, что скорость обработки озонородушной смеси в зерновом ворохе растёт и в некоторый момент времени достигает максимума (рис. 4,а). Это означает, что в данный момент время озонной обработки единицы объёма зерна, в который поступила озонородушная смесь, рациональное (рис. 4,б).

Дальнейшее увеличение объёма происходит (рис. 3), но не так интенсивно. Поэтому, очевидно, нет необходимости в продолжении процесса озонирования.

В результате получена зависимость проозонированного объёма зерна от времени обработки, позволяющая установить рациональное время озонирования 1270 с, при котором озонирование протекает с наибольшей скоростью изменения обработанного объёма $3059 мм^3/с$.

Для обеспечения желаемых параметров обработки был рассмотрен процесс подачи газа с учетом расположения форсунок и изменяющейся концентрации озона в озонородушной смеси.

Процесс разложения озона описывается уравнением

$$\frac{dC_{озп}}{dt} = - \left(C_{озп}(t) \cdot \frac{(1 - e^{-K_{озп}(t_0+t)})}{t_1} + v_{кор} \right), \quad (4)$$

где $C_{\text{озр}}(t)$ – изменение концентрации озона (мг/мм^3) в момент времени t (с); $K_{\text{ор}}$ – константа разложения озона, с^{-1} ; t_0 – время начала разложения, с; t_1 – размерный коэффициент времени, равный 1 с; $v_{\text{кор}}$ – скорость разложения озона при окончании процесса озонирования, $\text{мг}/(\text{мм}^3 \cdot \text{с})$.

С учетом закона сохранения массы озона, считая, что средняя концентрация озона на входе в процессе подачи озоновоздушной смеси постоянна, подача осуществляется в заданный объем, определяемый размещением форсунок и формой очага распространения газа, процесс разложения озона начинается с момента начала подачи, а процесс перемешивания заканчивается, когда скорость диффузии равна скорости разложения, получено уравнение следующего вида:

$$\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{l^2 \cdot h_0 \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \left(\frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_k}}}{2 \cdot t_k} + \frac{l \cdot (1 - e^{-K_{\text{ор}} \cdot t_k})}{t_1} \right) - v_{\Gamma} + v_{\text{кор}} \cdot l = 0, \quad (5)$$

где $C_{\text{озпод}}$ – средняя концентрации озона на подаче, мг/мм^3 ; $V_{\text{п}}$ – объем поданной озоновоздушной смеси, мм^3 ; l – расстояние между форсунками, мм ; h_0 – высота объема, в который поступает озоновоздушная смесь из двух форсунок, мм ; $k_{\text{скв}}$ – коэффициент скважистости зерна, %; D – константа диффузии, $\text{мм}^2/\text{с}$; t_k – время выравнивания концентраций, с; v_{Γ} – скорость гидравлического перемешивания, $\text{мм}^3/\text{с}$.

Численное решение уравнения (5) относительно l позволяет определить расстояние между форсунками при реальных значениях подачи озоновоздушной смеси, обеспечиваемых компрессором. Исходя из того, что объем, обрабатываемый одной форсункой, может быть известен, для объема силоса $V_{\text{сил}}$ можно определить их количество для всего зернохранилища:

$$N_{\text{ф}} = \frac{V_{\text{сил}} \cdot (v_{\Gamma} - l \cdot v_{\text{кор}})}{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}} \cdot \left(\frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_k}}}{2 \cdot t_k} - \frac{l \cdot (e^{K_{\text{ор}}(t_0 + t_k)} - 1)}{t_1} \right)}, \quad (6)$$

где $N_{\text{ф}}$ – количество форсунок, шт; $V_{\text{сил}}$ – объем зернохранилища, м^3 .

Таким образом, получена зависимость определения количества форсунок, подающих озоновоздушную смесь в зернохранилище, позволяющая равномерно распределить газ в зерновом ворохе, учитывая при этом расходные характеристики пневматической системы, объем зернохранилища, расстояние между форсунками, концентрацию озона в поданной озоновоздушной смеси и время озонирования, а также процессы диффузии и разложения озона.

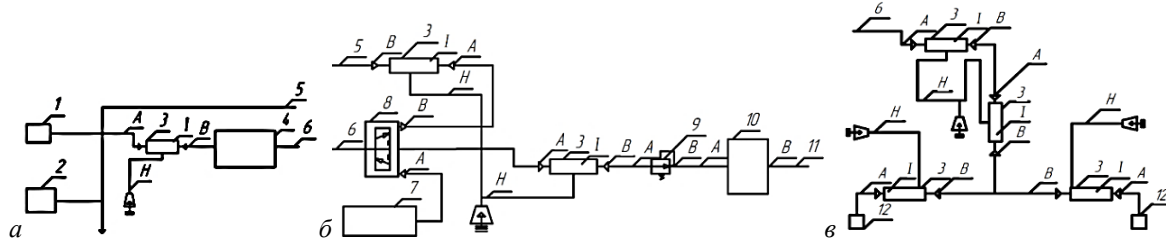
При попадании озона в зерновой ворох распространение по объему происходит согласно случайному расположению зерен. Поэтому важно подать строго необходимую дозу озона в замкнутое пространство зернохранилища. Исходя из этого разработали имитационную модель пневматической системы аэрации зернохранилища озоновоздушной смесью, которая состоит из подсистем подачи озоновоздушной смеси, управления и распределения (рис. 5).

Моделирование потока озоновоздушной смеси в газопроводе осуществлялось согласно теории механики газов. Для решения применялись численные методы решения дифференциальных и алгебраических уравнений.

Основное уравнение описывает закон сохранения массы и связывает массовый расход с динамикой давления и температуры внутри трубопровода для части, представляющей объем газа:

$$\frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{dp_I}{dt} + \frac{\partial M}{\partial T} \cdot \frac{dT_I}{dt} = \dot{m}_A + \dot{m}_B, \quad (7)$$

где $\partial M / \partial p$ – частная производная массы газа по давлению при постоянных температуре и объеме; $\partial M / \partial T$ – частная производная массы газа по температуре при постоянных давлении и объеме; p_I – давление газа, Па; T_I – температура объема газа, К; $\dot{m}_A$ и $\dot{m}_B$ – массовые расходы в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озонозвоздушной смеси из газоведа, кг/с. Расход принимает положительное значение, как только он поступит в газовед.



а – подсистема подачи; б – подсистема управления; в – подсистема распределения; А – место входа воздуха или озонозвоздушной смеси в газовед; В – место выхода воздуха или озонозвоздушной смеси из газоведа; Н – место присоединения сети моделирования теплообмена в газоведах; I – внутренняя полость газоведа; 1 – блок, описывающий свойство газа; 2 – конфигурация решателя; 3 – газовед; 4 – компрессор; 5 – канал сброса; 6 – канал подачи; 7 – управление золотником; 8 – золотник; 9 – редукционный клапан; 10 – озонатор; 11 – распределение озонозвоздушной смеси по газоведам; 12 – форсунка

Рисунок 5 – Упрощенная схема пневматической системы азрации озонозвоздушной смесью зернохранилища

Второе базовое уравнение – это закон сохранения энергии, который связывает скорости потока энергии и тепла с динамикой давления и температуры внутреннего объема газа в газоведе:

$$\frac{\partial U}{\partial p} \cdot \frac{dp_I}{dt} + \frac{\partial U}{\partial T} \cdot \frac{dT_I}{dt} = \Phi_A + \Phi_B + Q_H, \quad (8)$$

где $\partial U / \partial p$ – частная производная внутренней энергии объема газа по давлению при постоянных температуре и объеме Дж/м³; $\partial U / \partial T$ – частная производная внутренней энергии объема газа по температуре при постоянных давлении и объеме Дж/К; Φ_A и Φ_B – скорости потока энергии в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озонозвоздушной смеси из газоведа, Дж/с; Q_H – тепловой поток в месте присоединения сети моделирования теплообмена в газоведах Н, Дж/с.

При моделировании использовались модели совершенного и полуйдеального газа. Частные производные массы М и внутренней энергии U объема газа по давлению и температуре при постоянном объеме зависят от модели свойств газа. Для моделей идеального и полуйдеального газа уравнения следующие:

$$\frac{\partial M}{\partial p} = V_r \cdot \frac{\rho_I}{p_I}, \quad \frac{\partial M}{\partial T} = -V_r \cdot \frac{\rho_I}{T_I}, \quad \frac{\partial U}{\partial p} = V_r \cdot \left(\frac{h_I}{Z \cdot R \cdot T_I} - 1 \right), \quad \frac{\partial U}{\partial T} = V_r \cdot \rho_I \cdot \left(c_{pI} - \frac{h_I}{T_I} \right), \quad (9)$$

где ρ_I – плотность объема газа кг/м³; V_r – объем газа, м³; h_I – удельная энтальпия объема газа, Дж/кг; Z – коэффициент сжимаемости; R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); c_{pI} – удельная теплоемкость при постоянном давлении объема газа, Дж/(кг·К).

Падение давления из-за вязкого трения и передачи импульса для каждой части газоведа моделируется с помощью уравнения баланса импульса:

$$\left. \begin{aligned} p_A - p_I &= \left(\frac{\dot{m}_A}{S} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_I} - \frac{1}{\rho_A} \right) + \Delta p_{AI} \\ p_B - p_I &= \left(\frac{\dot{m}_B}{S} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_I} - \frac{1}{\rho_B} \right) + \Delta p_{BI} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где p – давление газа в местах входа (А) и выхода (В) воздуха или озонородушной смеси из газовода или во внутреннем узле I , Па; ρ – плотность в местах входа (А) и выхода (В) воздуха или озонородушной смеси из газовода или во внутренней полости газовода I , кг/м³; S – площадь поперечного сечения трубы, мм²; Δp_{AI} , Δp_{BI} – потери давления из-за вязкого трения, Па.

Тепло, переданное стенке газовода через место присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах H , добавляется к энергии объема газа, представленного внутренним узлом, через уравнение сохранения энергии (8). Поэтому балансы импульса для каждой половины газовода, между местом входа (А) воздуха или озонородушной смеси в газвод и внутренней полости газовода (I) и между местом выхода (В) воздуха или озонородушной смеси из газовода и внутренней полости газовода (I), предполагаются адиабатными процессами, тогда

$$\left. \begin{aligned} h_A + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_A}{\rho_A \cdot S} \right)^2 &= h_I + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_A}{\rho_I \cdot S} \right)^2 \\ h_B + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_B}{\rho_B \cdot S} \right)^2 &= h_I + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_B}{\rho_I \cdot S} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где h – удельная энтальпия в местах входа (А) и выхода (В) воздуха или озонородушной смеси из газовода или внутренней полости газовода I , Дж/кг.

Для отладки моделирования и определения параметров пневмосистемы аэрации зернохранилища необходимо знать при каких расходах будет работать система. Учитывая, что подача осуществляется через площадь поперечного сечения обрабатываемого объема, который равен l^2 , то получим скорость гидравлического смешивания v_Γ (мм³/с):

$$v_\Gamma = \frac{V_\Pi}{l^2 \cdot t_k \cdot (1 - k_{\text{СКВ}})} \quad (12)$$

Из формул (5 и 12) получен средний объемный расход через одну форсунку:

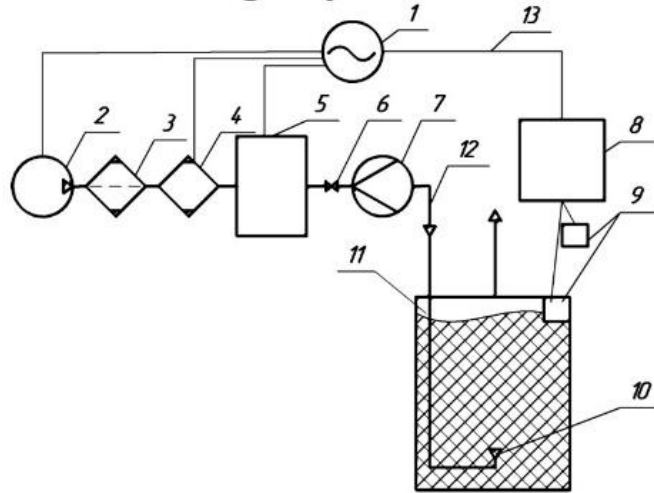
$$Q_{\text{пс}} = \frac{l \cdot v_{\text{кор}}}{t_k \cdot \left(\frac{1}{l^2 \cdot (1 - k_{\text{СКВ}})} + \frac{C_{\text{озпод}} \cdot \left(\frac{l \cdot (e^{K_{\text{оп}}(t_0 + t_k)} - 1)}{t_1} - \frac{l^2 \cdot e^{\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_k}}}{2 \cdot t_k} \right)}{V_{\text{обр}}} \right)} \quad (13)$$

где $Q_{\text{пс}}$ – средний объемный расход, м³/с, $V_{\text{обр}}$ – объем, обрабатываемый одной форсункой, мм³.

Величина среднего объемного расхода озонородушной смеси через форсунку посредством имитационной модели пневматической системы зернохранилища позволила определить реальные параметры системы подачи озонородушной смеси, которые обеспечивают этот расход. Она позволяет определить такие параметры, как диаметры трубопроводов, характеристики компрессора, размеры сопел форсунок, параметры клапанов и др. По результатам представленных теоретических исследований разработаны программы для ЭВМ (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024690908, № 2025683661, № 2025685253).

Таким образом, получена зависимость среднего объемного расхода озонородушной смеси через форсунку, учитывающая расстояние между форсунками, концентрацию озона в озонородушной смеси и время озонирования, а также процессы диффузии и разложения озона, позволяющая посредством имитационного моделирования определить рациональные параметры системы озонирования исходя из режимов работы проектируемой системы озонирования.

В третьем разделе описана методика проведения экспериментальных исследований, лабораторные установки и методы статистической обработки опытных данных. Для подтверждения теоретических исследований по определению зоны распространения озонородушной смеси в зерновом ворохе в ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ была разработана лабораторная установка, схема которой представлена на рисунке 6.

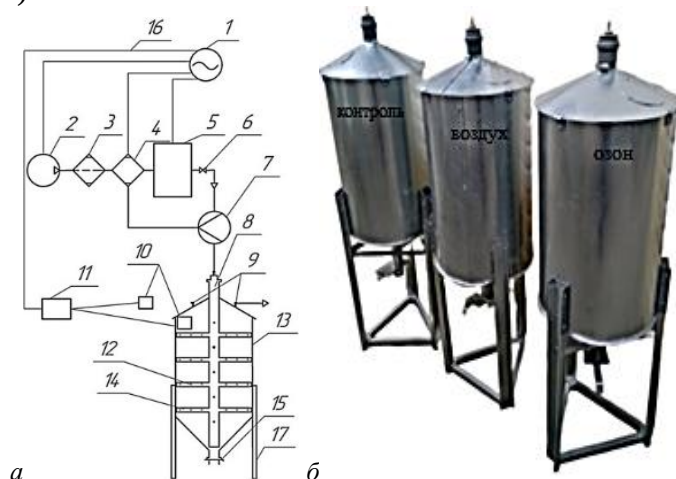


1 – источник переменного тока; 2 – компрессор; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – запорный вентиль; 7 – расходомер; 8 – газоанализатор; 9 – датчики концентрации газа; 10 – форсунка; 11 – ёмкость; 12 – газопроводы, 13 – электрические линии

Рисунок 6 – Схема лабораторной установки по озонной обработке семян зерновых культур

Для эксперимента по определению очага распространения озона в зерновом ворохе подготовили раствор крахмала с калием йодидом, которым обрабатывали зерно. Пропитанный зерновой материал помещали в экспериментальную ёмкость, в которую подавали озонородушную смесь. По истечении определённого времени подачу газа прекращали. Далее извлекали зерно послойно и определяли зону распространения озона по окрасившемуся зерну. Область воздействия озонородушной смеси оценивали по самому крайнему зерну, которое изменило цвет.

Для выявления целесообразности озонирования зерна и семян зерновых культур во время хранения были спроектированы и изготовлены экспериментальные металлические конусные силосы (рис. 7).

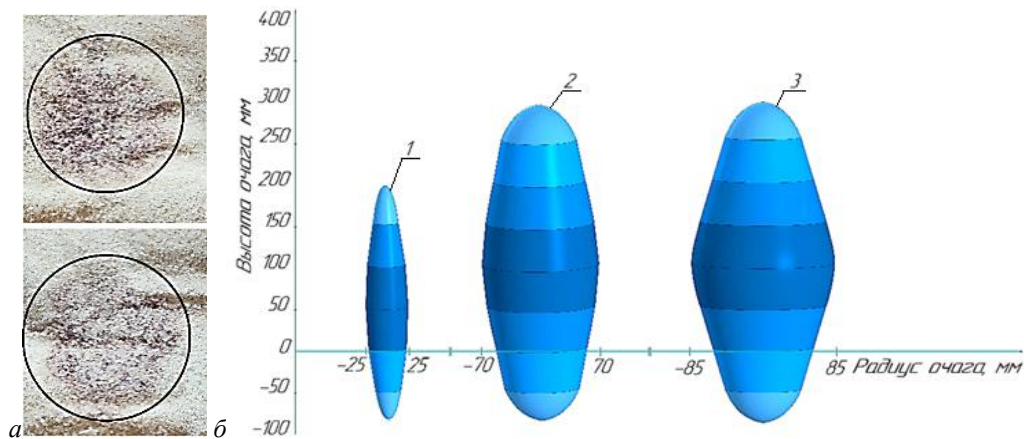


а – технологическая схема; б – внешний вид; 1 – источник переменного тока; 2 – компрессор; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – запорный вентиль; 7 – расходомер; 8 – газопровод; 9 – дыхательные клапаны; 10 – датчики концентрации озона; 11 – газоанализатор; 12 – форсунка; 13 – корпус хранилища; 14 – отводы; 15 – шиберная задвижка; 16 – электролинии; 17 – опора

Рисунок 7 – Схема лабораторной установки по озонированию зернохранилищ силосного типа

Всего было изготовлено три конических силоса (рис. 7,б). В первом хранилище обработку не проводили. Во втором силосе вентиляция происходила атмосферным воздухом. В третьем хранилище обработку осуществляли озоновоздушной смесью. Затем посевной материал исследовали в лаборатории массовых анализов лаборатории Воронежского ГАУ, где определяли энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян согласно ГОСТ 12036-85, заражённость семян определяли согласно ГОСТ 12044-93.

В четвертом разделе приведены результаты проведенных экспериментальных исследований. Посредством программы КОМПАС 3D и результатов экспериментов получили визуализированные 3D модели расхождения газа в слое зерна при разных режимах озонирования, представленных на рисунке 8.



а – зоны распространения озоновоздушной смеси в слое зерна при экспериментах; б – 3D модель распространения очага озона в слое зерна при разном времени обработки; 1 – 10 минут озонной обработки; 2 – 20 минут озонной обработки; 3 – 30 минут озонной обработки

Рисунок 8 – Распространения очага озона в зерновом ворохе при разных режимах озонирования

Полученная 3D модель распространения очага озона в зерновом ворохе по форме похожа на эллипсоид разных размеров. При этом интенсивность окрасившихся зерен по слоям отличалась. Более темные слои получили большую концентрацию газа, а светлые – меньшую. Это явление говорит о том, что в ходе эксперимента концентрация озоновоздушной смеси в разных слоях была различной. Максимальное расхождение зоны распространения озона по ширине наблюдается в эпицентре, где наибольшая его концентрация. Однако с необходимой точностью описать закономерность распределения озоновоздушной смеси уравнениями эллипсоида не удалось. Поэтому была проведена аппроксимация взаимосвязи радиуса очага озона от его высоты (рис. 9) с максимальным соблюдением формы по методу кусочно-кубического сплайна Эрмита.

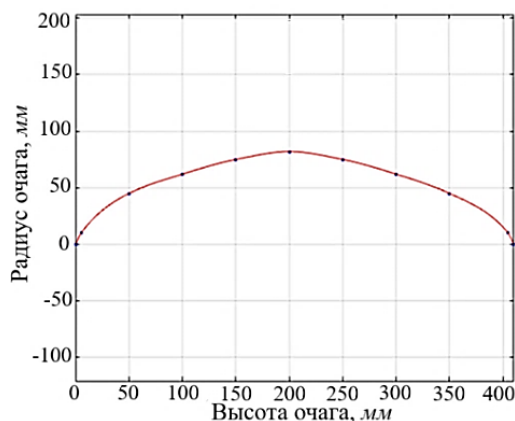
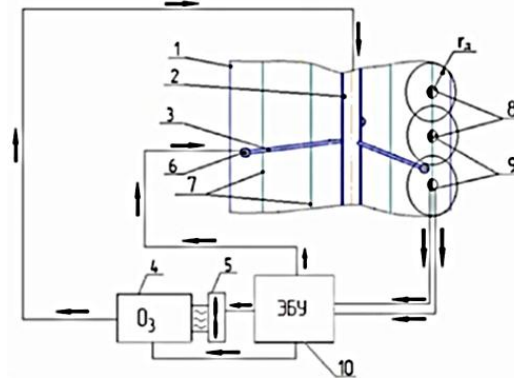


Рисунок 9 – Результат взаимосвязи радиуса озонного эллипсоида от его высоты, полученный методом кусочно-кубического сплайна Эрмита

Анализируя данную зависимость, можно сказать, что экспериментальные значения, отмеченные точками, лежат на одной кривой с теоретическими. Используемый метод аппроксимирует данные эксперимента не на всём заданном интервале, а по отдельности на каждом частичном интервале между соседними точками, поэтому наиболее точно позволяет получить закономерность изменения высоты эллипсоида от его радиуса.

С учетом недостатков современных конструкций зернохранилищ и способов обработки семян зерновых культур было предложено техническое решение, запатентованное на уровне полезной модели РФ № 219336 «Устройство для хранения зерна», позволяющее поддерживать регулируемую озоновоздушную среду в межзерновом пространстве. Принципиальная схема работы представлена на рисунке 10.



1 – цилиндрический корпус; 2 – газопровод; 3 – отвод; 4 – озонатор; 5 – нагнетатель воздуха; 6 – электромагнитные форсунки; 7 – термоподвеска; 8 – датчик температуры; 9 – датчик влажности; 10 – электронный блок управления

Рисунок 10 – Устройство для хранения зерна, защищенное патентом РФ на полезную модель № 219336

Создание на основе данного патента лабораторной установки позволило провести эксперимент по определению влияния озоновоздушной обработки на посевные качества семян зерновых культур. Установлено, что данная обработка положительно влияет на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян зерновых культур (рис. 11). Поскольку озонная обработка проводится с целью поддержания посевных качеств семян, то концентрация озона в озоновоздушной смеси не превышала 5 мг/м^3 .

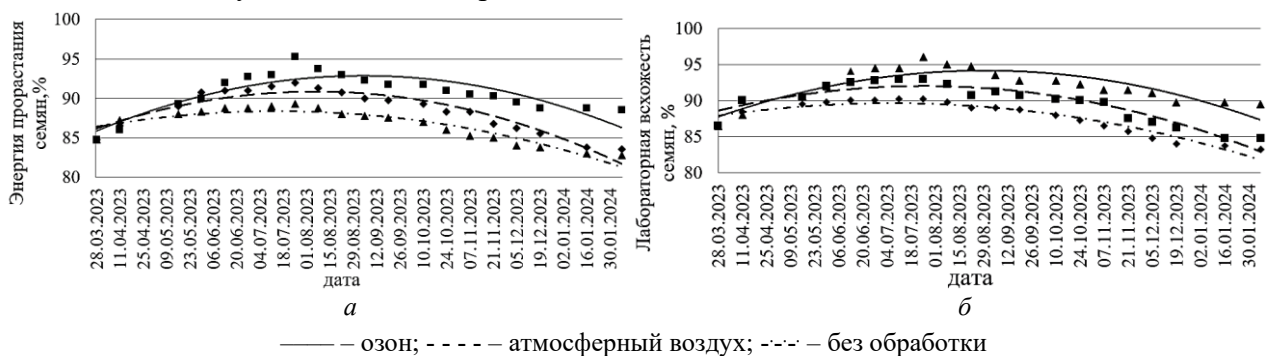


Рисунок 11 – Зависимость энергии прорастания (а) и лабораторной всхожести (б) семян озимой пшеницы от срока хранения и способа аэрации

Анализ рисунка 11 показал, что в варианте зернохранилища с озонной обработкой энергия прорастания повысилась на 3,75%, а лабораторная всхожесть семян – на 3%. При этом в вентилируемом воздухе силосе энергия прорастания снизилась на 1,25%, а лабораторная всхожесть семян на 1,75%. В варианте хранилища, где обработку не проводили, наблюдается уменьшение энергии прорастания на 2%, а лабораторной всхожести семян на 3,25%, относительно исходного значения, при закладывании на хранение.

Для определения рационального режима озонной обработки посевного материала при хранении провели статистическую обработку результатов исследований. Изменение показателя

телей энергии прорастания и лабораторной всхожести семян озимой пшеницы в зависимости от дозы озонной обработки представлено на рисунке 12.

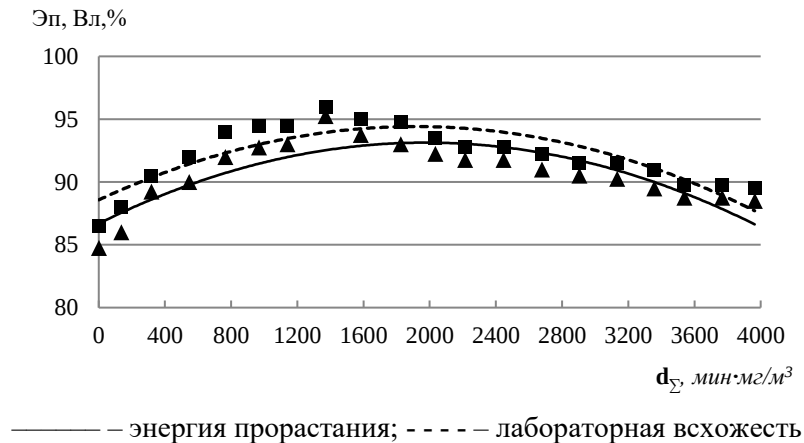


Рисунок 12 – Зависимость энергии прорастания и лабораторной всхожести семян озимой пшеницы от дозы озонной обработки

В результате установлено, что энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян в зависимости от дозы озонной обработки подчиняются полиномиальной зависимости II степени:

$$V_{\text{л}} = -0,000002 d_{\Sigma}^2 + 0,0061 d_{\Sigma} + 88,574, \quad (14)$$

$$\mathcal{E}_{\text{п}} = -0,000002 d_{\Sigma}^2 + 0,0065 d_{\Sigma} + 86,697, \quad (15)$$

где $V_{\text{л}}$ – лабораторная всхожесть семян озимой пшеницы, %; $\mathcal{E}_{\text{п}}$ – энергия прорастания семян озимой пшеницы, %; d_{Σ} – суммарная доза озонной обработки за весь эксперимент, мин·мг/м³.

Проанализировав данную зависимость, удалось установить, что наилучший результат энергии прорастания и лабораторной всхожести семян равен соответственно 92 и 93% при дозе озонирования в диапазоне от 950 до 2100 мин·мг/м³. Стоит отметить, что данная доза достигнута периодической озонной обработкой, имеющей накопительный эффект.

На основе экспериментальных данных разработана программа для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации № 2023611103), позволяющая определить рациональную дозу озонной обработки, обеспечивающую наивысшую лабораторную всхожесть семян зерновых культур.

Озонирование оказало положительное воздействие на снижение заражённости семян озимой пшеницы грибковыми заболеваниями. При дозе озонной обработки 7200 мин·мг/м³ наличие грибов рода *Alternaria* снизилось на 6,95%, рода *Fusarium* – на 3,25% и рода *Helminthosporium* – 5,5% (рис. 13).

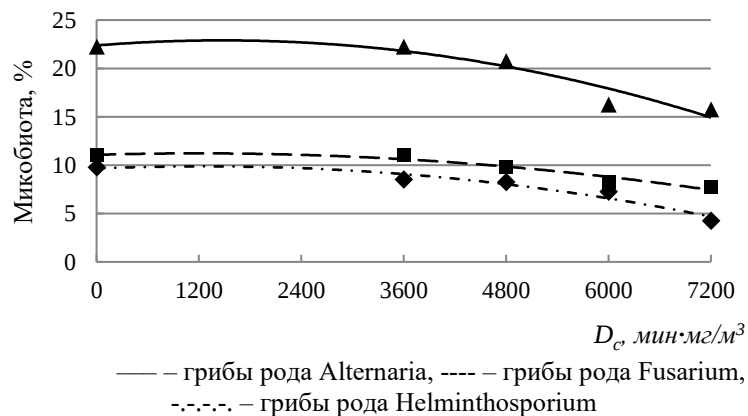


Рисунок 13 – Зараженность семян озимой пшеницы возбудителями болезней в зависимости от дозы озонной обработки

Статистическая обработка результатов эксперимента показала, что снижение зараженности семян озимой пшеницы грибковыми заболеваниями в зависимости от дозы озонной обработки подчиняется полиномиальной зависимости II степени:

$$Z_{Alt} = -0,0000002 \cdot D_c^2 + 0,0006 \cdot D_c + 22,623, \quad (16)$$

$$Z_{Fus} = -0,0000001 \cdot D_c^2 + 0,0002 \cdot D_c + 11,071, \quad (17)$$

$$Z_{Hel} = -0,0000001 \cdot D_c^2 + 0,0004 \cdot D_c + 9,6499, \quad (18)$$

где Z_{Alt} – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Alternaria*, %; Z_{Fus} – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Fusarium*, %; Z_{Hel} – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Helminthosporium*, %. D_c – доза озонной обработки, мин·мг/м³.

Показатель достоверности аппроксимации данных зависимостей составляет $R^2_{Alt} = 0,9086$; $R^2_{Fus} = 0,9385$; $R^2_{Hel} = 0,9398$. Это говорит о том, что уравнения достаточно точно описывают процесс. Проанализировав данные зависимости, можно сказать, что полное уничтожение патогенов достигается при дозе озонирования свыше 12200 мин·мг/м³.

В пятом разделе «Экономическое обоснование применения процесса озонирования в период хранения семян зерновых культур» проведен расчёт эффективности применения процесса озонирования в сравнении с химической обработкой. При модернизации зернохранилища вместимостью 10000 тонн семян при капитальных вложениях 2342280 рублей срок окупаемости применения озонной обработки семян зерновых культур составит 2,3 года, а годовой экономический эффект 1308929,24 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наиболее перспективными зернохранилищами являются металлические хранилища силосного типа с конусным дном, позволяющие провести их усовершенствование путем создания внутри них регулируемой озонородной среды, которую целесообразно реализовать на основе патента на полезную модель № 219336 РФ.

2. Выявленная закономерность изменения очага распространения озона в зависимости от времени обработки имеет математическое описание в виде регрессии на основе гауссовского процесса, что позволяет получить математическую модель зоны распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614311 РФ).

3. Установленная зависимость для определения количества форсунок, подающих озонородную смесь в зернохранилище, учитывающая расходные характеристики пневматической системы, объём зернохранилища, концентрацию озона в озонородной смеси и время озонирования, дает возможность на стадии разработки системы озонирования зернохранилища гарантировать равномерность озонной обработки.

4. Полученная зависимость для расчета среднего объёмного расхода озонородной смеси через форсунку учитывает расстояние между форсунками, концентрацию озона в озонородной смеси и время озонирования, а также константы диффузии и разложения озона, что позволяет определить параметры системы озонирования (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024690908, № 2025683661 и № 2025685253).

5. Периодическое озонирование семян озимой пшеницы в зернохранилище силосного типа способствует повышению сохранности посевных качеств, в частности, энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян увеличиваются соответственно на 5 и 4,75% по сравнению аэрацией воздухом, и соответственно на 5,75 и 6,25% относительно варианта хранения без обработки, при этом рациональная накопительная доза озонной обработки находится в диапазоне от 950 до 2100 мин·мг/м³.

6. Озонирование при дозе озонной обработки 7200 мин·мг/м³ снижает заражённость семян озимой пшеницы грибковым заболеванием рода *Alternaria* на 6,95 %, рода *Fusarium* – на 3,25% и рода *Helminthosporium* – на 5,5%, при этом для подавления всех патогенов необходима доза озонной обработки свыше 12200 мин·мг/м³.

7. Расчет экономической эффективности применения предложенного технологического процесса озонной обработки зернохранилища вместимостью 10000 тонн семян показал,

что при капитальных вложениях 2342280 рублей срок окупаемости составит 2,3 года, а годовой экономический эффект – 1308929,24 рублей.

8. Полученные результаты диссертационной работы внедрены в производство, используются в учебном процессе и позволяют рекомендовать для зернохранилищ силосного типа с конусным дном создание регулируемой озонозооной среды внутри хранилища с автоматическим режимом озонной обработки (патент № 219336 РФ) при дозе от 950 до 2100 мин·мг/м³ для обеспечения требуемых посевных качеств хранящихся семян зерновых культур, и при дозе 12200 мин·мг/м³ для снижения заражённости грибковыми заболеваниями.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в изучении влияния озонной обработки на различные компоненты семян, уточнении режимных параметров озонаторной установки при обработке семян различных сельскохозяйственных культур.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. Влияние озонной обработки на заражённость зерна озимой пшеницы микофлорой / И.В. Баскаков, **А.Д. Головин**, И.А. Пожидаев [и др.] // Наука в Центральной России. – 2024. – Т. 72, № 6. – С. 7- 18. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-6-7-18.

2. Влияние фракционного состава зернового вороха на уровень травмирования и посевные качества семян / В.И. Оробинский, А.В. Ворохобин, А.С. Корнев, **А.Д. Головин** [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14, № 3(70). – С. 12-17. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_12.

3. Теоретические предпосылки определения размера и объёма распространения очага в зерновом ворохе и оптимизации времени озонирования / **А.Д. Головин**, И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – Т. 68, № 2. – С. 26-32. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-26-32.

4. Теоретические предпосылки определения формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе / **А.Д. Головин**, И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в Центральной России. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 76-89. – DOI:10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

Патенты на полезные модели

и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Патент РФ на полезную модель № 219336 U1, МПК A01F 25/14 (2006.01). Устройство для хранения зерна / **А.Д. Головин**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2023109316; заявлено 12.04.2023; опубл. 12.07.2023. – Бюл. № 20. – 5 с.

6. Патент РФ на полезную модель № 223519 U1, МПК A01D 41/12, A01F 12/60 (2006.01). Бункер зернового комбайна / **А.Д. Головин**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2023128000; заявлено 31.10.2023; опубл. 22.02.2024. – Бюл. № 6. – 5 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611103. Расчет лабораторной всхожести семян при озонной обработке и рациональной дозы озонирования / **А.Д. Головин**, А.В. Химченко, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2023610411; заявлено 17.01.2023; опубл. 17.01.2023. – Бюл. № 1. – 1 с.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2024614311. Расчёт формы очага обработки зернового вороха при озонировании / **А.Д. Головин**, А.В. Химченко, И.В. Баскаков [и др.] (РФ); правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024613287; заявлено 21.02.2024; опубл. 21.02.2024. – Бюл. № 3. – 1 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2024690908. Имитационная модель пневматической системы устройства для озонирования семян в бун-

кере / **А.Д. Головин**, А.В. Химченко, И.В. Баскаков [и др.] (РФ); правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024690849; заявлено 18.12.2024; опубл. 18.12.2024. – Бюл. №12. – 1 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2025683661. Имитационная модель пневматической системы озонирования силосного конусного зернохранилища СМК.37/45 / А.В. Химченко, И.В. Баскаков, **А.Д. Головин** [и др.] (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2025683100; заявлено 05.09.2025; опубл. 05.09.2025 – Бюл. № 9. – 1 с.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2025685253. Имитационная модель управления системой озонирования силосного конусного зернохранилища СМК.37/45 / А.В. Химченко, И.В. Баскаков, **А.Д. Головин** [и др.] (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2025684791; заявлено 22.09.2025. опубл. 22.09.2025. Бюл. № 10. – 1 с.

Публикации в материалах конференций и сборниках научных трудов

12. Влияние озона на посевные качества зерна / **А.Д. Головин**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 55-60.

13. **Головин А.Д.** Влияние предпосевного озонирования семян нута на их энергию прорастания и лабораторную всхожесть / **А.Д. Головин**, В.И. Оробинский, И.В. Баскаков // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.) – Ч. I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 29-37.

14. **Головин А.Д.** Обзор способов и устройств для обработки семян зерновых культур озоновоздушной смесью / **А.Д. Головин**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 55-66.

15. К вопросу безопасности применения озонных технологий в сельском хозяйстве // И.А. Пожидаев, **А.Д. Головин**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 1 апреля – 31 мая 2025 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 386-390.

16. Определение зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе / **А.Д. Головин**, И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков [и др.] // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 1 апреля – 31 мая 2024 г.). – Ч. IV. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 115-119.

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 Афоничеву Д.Н. Телефон (473) 224-39-39 (доб. 3320); e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 21.11.2025 г. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 27901.

Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.