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

На правах рукописи

ГОЛОВИН Антон Дмитриевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХРАНЕНИЯ СЕМЯН КОЛОСОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РЕГУЛИРУЕМОЙ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук
Баскаков И.В.

Воронеж – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ЗЕРНА И СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР 12
1.1 Анализ современных конструкций зернохранилищ 12
1.2 Способы обработки зерна и семян зерновых культур при хранении 21
1.3 Патентный поиск технических средств, обеспечивающих озонную обработку зерна и семян зерновых культур 31
1.4 Анализ недостатков озонной обработки зерна и семян зерновых культур .. 37
1.5 Обзор теоретических исследований озонной обработки зерна и семян зерновых культур 39
1.6 Выводы по разделу 45
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ 46
2.1 Теоретическое определение формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе 46
2.2 Рационализация времени озонирования объёма зерна 55
2.3 Обоснование параметров системы аэрации зернового вороха в зернохранилищах 57
2.4 Имитационная модель пневматической системы аэрации озоновоздушной смесью зернохранилища 67
2.5 Выводы по разделу 79
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 81
3.1 Программа экспериментальных исследований 81
3.2 Экспериментальные установки по обработке зерна и семян зерновых культур озоновоздушной смесью 81
3.2.1 Экспериментальная установка по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе 81

3.2.2 Экспериментальные металлические конусные силосы с регулируемой озоновоздушной средой 83
3.3 Методика проведения экспериментальных исследований 85
3.3.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований при озонной обработке зерна и семян зерновых культур..... 85
3.3.2 Методика экспериментальных исследований по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе 86
3.3.3 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян озимой пшеницы..... 87
3.3.4 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание массовой доли белка в зерне озимой пшеницы 90
3.3.5 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание клейковины в зерне озимой пшеницы 92
3.3.6 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на стекловидность зерна озимой пшеницы 94
3.3.7 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микофлору семян озимой пшеницы 96
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА АЭРАЦИИ СИЛОСНЫХ ЗЕРНОХРАНИЛИЩ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗЕРНА И СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР 97
4.1 Результаты экспериментальных исследований по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе 97

4.2 Разработка устройства для хранения семян зерновых культур, обеспечивающего регулируемую озоновоздушную среду 102
4.3 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на качественные показатели семян озимой пшеницы при хранении 104
4.3.1 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян озимой пшеницы 104
4.3.2 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание массовой доли белка в зерне озимой пшеницы 112
4.3.3 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание клейковины в зерне озимой пшеницы 116
4.3.4 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на стекловидность зерна озимой пшеницы 119
4.3.5 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микофлору семян озимой пшеницы 123
4.4 Выводы по разделу 126
5 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА ОЗОНИРОВАНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР 127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 133
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 143
ПРИЛОЖЕНИЕ А 164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 167

ВВЕДЕНИЕ

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 [129]. 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 [22, 70, 121, 124, 130].

На сегодняшний день на первый план выходят экологически безопасные методы ведения сельского хозяйства, минимизирующие вредоносное воздействие на окружающую среду без снижения качественных и экономических показателей. К наиболее перспективному способу обработки семян зерновых культур при хранении относится процесс озонирования [19, 27, 44, 72, 82, 93]. Использование озона не приводит к загрязнению окружающей среды благодаря его бактерицидным, дезинфицирующими, обеззараживающим свойствам [51, 73, 83, 88, 141]. 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 [84, 92]. Поэтому совершенствование технологического процесса хранения семян колосовых 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. Латышенок, И.В. Горский, Г.А. Закладной, Д.А. Нормов, А.Н. Сорокин, Г.П. М.А. Сигачева, Стародубцева, Е.В. Тышкевич, A. 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, отличающая 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 озоновоздушной смеси в зерновом слое с течением времени, позволяющая определить размер и форму очага озонной обработки;

- зависимость количества форсунок, подающих озоновоздушную смесь в зернохранилище, обеспечивающая равномерность озонной обработки хранящихся семян колосовых зерновых культур;

- зависимость среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку, позволяющая определить параметры системы озонирования;

- устройство для хранения семян колосовых зерновых культур с регулируемой озоновоздушной 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.

Процесс озонной обработки семян зерновых культур в период хранения применяется в учебно-научно-технологическом центре «Агротехнология» ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Разработанные режимы озонной обработки семян зерновых культур внедрены в практическую деятельность КФХ «Виктория» Хлевенского района Липецкой области. Материалы и результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке магистров по направлению 35.04.06 «Агроинженерия».

Основные результаты исследований представлены, обсуждены и апробированы на научных конференциях:

- международная научно-практическая конференция «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Россия, Воронеж, 24–25 ноября 2020, 30 ноября 2023 года, 29 ноября 2024 года);

- международная научно-практическая конференция «Тенденции развития технических средств и технологий в АПК» (Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 года, 25 февраля 2022 года, 20 февраля 2023 года, 12 февраля 2024 года);

- национальная научно-практическая конференция «Молодёжный вектор развития аграрной науки» (Россия, Воронеж, 01 апреля–31 мая 2021 года, 01 апреля–31 мая 2022 года, 15 февраля–31 марта 2024 года);

- международная научно-практическая конференция «Развитие отраслей АПК на основе формирования эффективного механизма хозяйствования» (Россия, Киров, 17 ноября 2021 года);

- международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства для АПК» (Россия, Воронеж, 11–12 ноября 2021 года);

- национальная научно-практическая конференция «Теория и практика инновационных технологий в АПК» (Россия, Воронеж, 01 марта–28 апреля 2023, 01 апреля–31 мая 2024 года, 01 апреля–31 мая 2025 года);

- международная научно-практическая конференция «Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса» (25 сентября 2024 года).

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 озоновоздушной 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, полу-

чено 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.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ЗЕРНА И СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

1.1 Анализ современных конструкций зернохранилищ

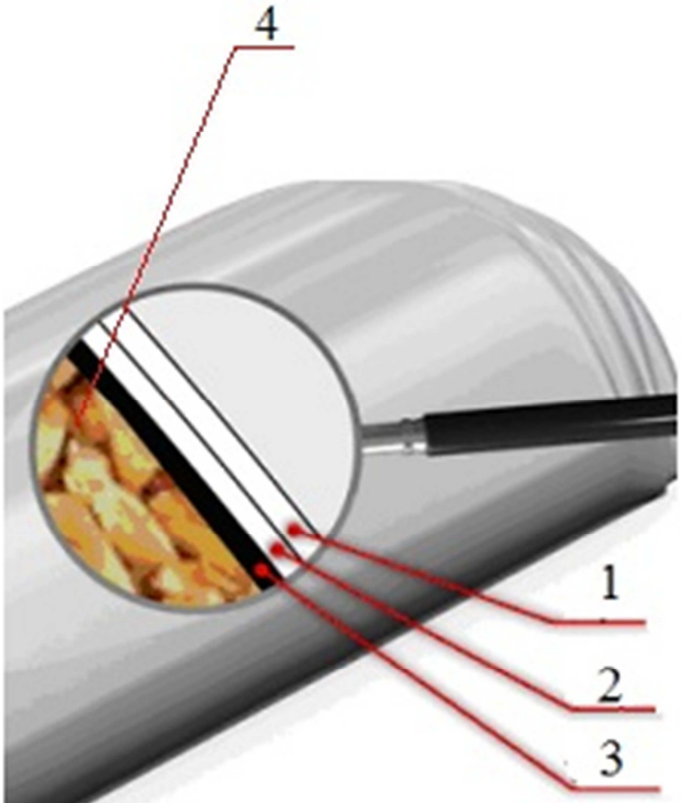
В Российской Федерации основным продуктом сельского хозяйства является зерно. Оно играет важную роль, определяя продовольственный запас страны. Перед аграриями всего мира стоит задача в получении качественного урожая. К одному из важных этапов в его переработке можно отнести процесс хранения. Он является сложным и энергоёмким. Немаловажным фактором при этом является выбор зернохранилища, в котором зерно будет заложено на хранение [25, 86, 89]. Правильное размещения убранного урожая зачастую определяет его качество. Своевременный сбор информации о состоянии зерна в зернохранилище позволяет разработать соответствующие меры безопасности от влияния нежелательных факторов [80]. Это, в свою очередь, позволяет избежать потерь, сохранить качество продукции на должном уровне. При хранении зерна и семян зерновых культур следует контролировать их влажность и температуру, а также засоренность и зараженность. Для достижения наилучших результатов необходимо ответственно подходить к выбору зернохранилища, внедрять и использовать современные системы автоматизации, термометрии и мониторинга контроля [23, 52]. Рассмотрим технологии хранения зерна и семян зерновых культур, применяемые в современных аграрных комплексах.

Известна [114] технология хранения зерна в полиэтиленовых рукавах (рис. 1.1), которую зачастую называют аргентинской.

Рисунок 1.1 – Общий вид полиэтиленовых рукавов для хранения зерна и семян зерновых культур

Суть данной технологии заключается в том, что собранный урожай плотно укладывают в так называемый рукав, после чего его тщательно герметизируют и оставляют на хранение непосредственно на поле или специальных площадках. За счет дыхания зерна происходит поглощение кислорода и повышение содержания углекислого газа, который выступает в роли консерванта. В результате внутри рукава создаются условия, которые угнетают развитие плесени, вредоносных бактерий и насекомых.

Полиэтиленовые рукава имеют трехслойную структуру (рис 1.2). Первые два слоя окрашены в белый цвет. Это необходимо для лучшего отражения солнечных лучей и теплового излучения. Третий слой окрашен в черный цвет. Он является внутренним, контактирующим с зерном. Его задача состоит в предотвращении попадания солнечных лучей в зерновой материал. Рукава бывают различной длины и диаметра, их вместимость достигает 250 тонн.



1 – первый белый слой; *2* – второй белый слой; *3* – черный слой; *4* – зерно

Рисунок 1.2 – Строение полиэтиленовых рукавов

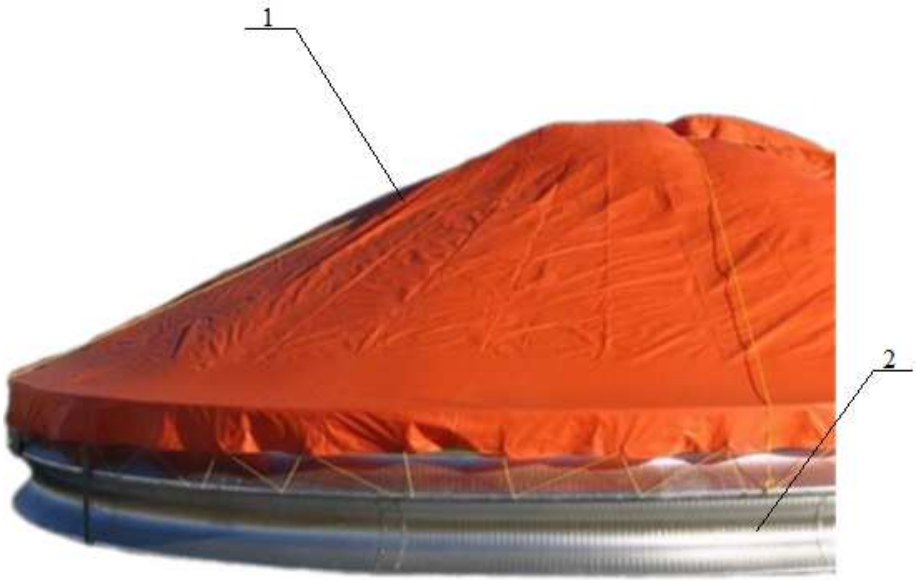
При низкой температуре окружающей среды и влажности зерна сроки безопасного хранения могут достигать 16 месяцев. Однако это возможно лишь в северных районах. Увеличение влажности зерна более 12% приводит к сокращению срока хранения, при низких температурах до 6-7 месяцев. При влажности зерна свыше 20% хранение возможно лишь непродолжительное время и то только при минусовых температурах и соблюдении всех рекомендуемых требований. Резкий перепад температур снижает сроки безопасного хранения в 1,5...2 раза [104].

Технология хранения зерна в рукавах является наиболее дешёвой, так как отсутствует необходимость в возведении стационарных конструкций зернохранилищ. Собранный урожай закладывается на хранение непосредственно на поле. При этом нет дополнительных затрат на транспортировку до элеватора.

Недостатками аргентинской технологии является то, что в процессе хранения зерно задыхается, что снижает их посевные качества. Кроме того, для загрузки и выгрузки зерна требуется применение специальной сельскохозяйственной техники – беггера и экстрактора [114]. Стоит отметить то, что использование данной техники ведет к повреждению зерна в ходе технологического процесса [71, 113]. При этом полиэтиленовые рукава склонны к порче, как естественным путём, так и за счет внешнего воздействия. Необходимость прокола рукава при контроле температуры и влажности зерна внутри хранилища также нежелательна. Следовательно, использование технологии хранения зерна в полиэтиленовых рукавах имеет слишком много недостатков. Возникает риск порчи сырья и дальнейшего ухудшения его качества.

Ещё один способ хранения зерна и семян зерновых культур –канадская технология [114] быстровозводимых шатровых зернохранилищ (рис. 1.3), в которых в роли крыши выступает тент. В центре конструкции для её жесткости используют металлические стойки с тросами. По периметру зернохранилищ смонтированы стальные оцинкованные кольца с ребрами жёсткости. Внутри хранилища на дне установлена армированная полимерная подложка, для защиты от попадания вредителей и влаги из почвы. В металлическом основании смонтированы окна, в ко-

торые устанавливают вентиляторы, это позволяет посредством активной аэрации изменять температуру и влажность зерна.



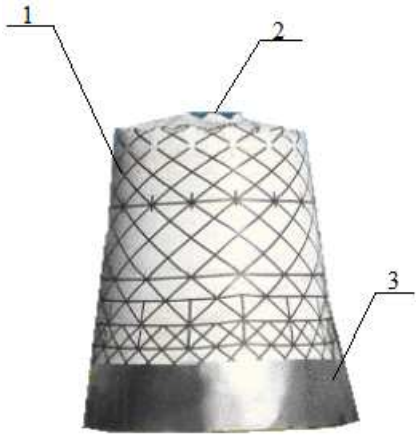
1 – тент; *2* – стальные оцинкованные кольца

Рисунок 1.3 – Общий вид хранилища зерна и семян зерновых культур по канадской технологии

Загрузка и разгрузка шатрового зернохранилища осуществляется при помощи шнекового или ленточного транспортера, а также вакуумного перегружателя. При влажности зерна до 15% зерно безопасно хранится до 10 месяцев. Вместимость таких сооружений достигает 3000 тонн. Данные хранилища быстровозводимые, с возможностью демонтажа. Поэтому нет необходимости в построении стационарных зернохранилищ. Для вентилирования внутри хранилища необходимо электричество. Соответственно, возвести его в любом месте невозможно без дополнительных затрат на покупку генераторов или ещё каких-либо источников электроэнергии. Осуществить мониторинг влажности и температуры зерна возможно только путем отбора проб через специальное отверстие в тенте. Частое проведение данной операции приводит к попаданию влаги и вредоносных бактерий к хранящемуся материалу, что в дальнейшем способствует ухудшению его состояния. Не исключается тот факт, что тентованная часть конструкции может повредиться. Стоит отметить то, что при загрузке и разгрузке зерна и семян происходит их травмирование, что создает риск заражения микроорганизмами,

ухудшающими качество сырья [71, 112]. Следовательно, использование быстровозводимых шатровых зернохранилищ имеет много недостатков, так как не гарантирует сохранности зерна в течении всего срока хранения.

Известна система «Регас-Изок» [114], предусматривающая хранение зерна или семян сельскохозяйственных культур в регулируемой газовой среде в полимерных мешках ЕСР-115 вместимостью до 135 тонн (рис 1.4). В роли консерватора служит углекислый газ, который принудительно закачивается в ёмкость. Срок эксплуатации хранилища не превышает 5 лет. В данном случае возможен контроль влажности и температуры зерна как с помощью датчиков, так и пробоотборников.



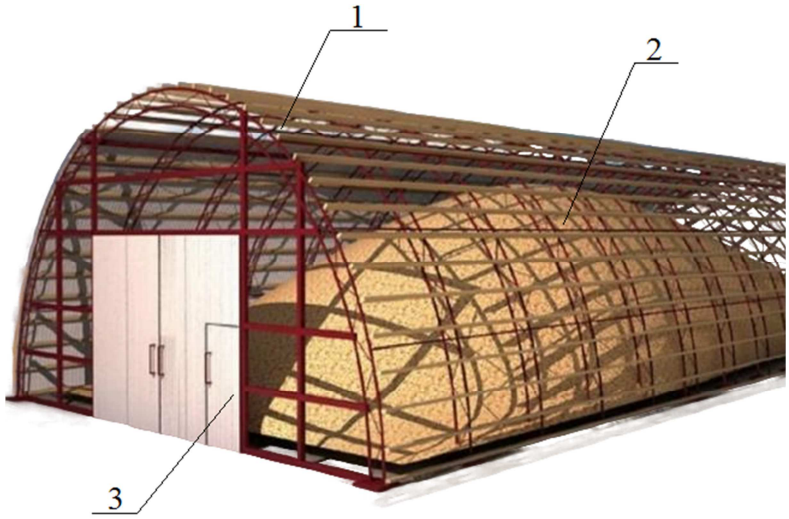
1 – армированный гибкий гидронепроницаемый полимер;
2 – загрузочное верхнее отверстие; *3* – стальной лист

Рисунок 1.4 – Общий вид полимерной ёмкости для хранения зерна по технологии «Регас-Изок»

Конструкция состоит из армированного гибкого гидронепроницаемого полимера *1* (рис. 1.4), позволяющего изолировать хранящийся материал от окружающей среды. Нижняя часть её укреплена стальным листом *3*. Он предназначен для дополнительной защиты от механических повреждений. Днище защищено геополотном. Оно используется для того, чтобы влага с почвы, сорняки и вредоносные насекомые не смогли попасть внутрь ёмкости. Днище оборудовано каналами вентиляции и диффузорами. Загрузка зерна осуществляется через верхнее отверстие *2* при помощи шнекового транспортера, нории и зернопровода. По мере

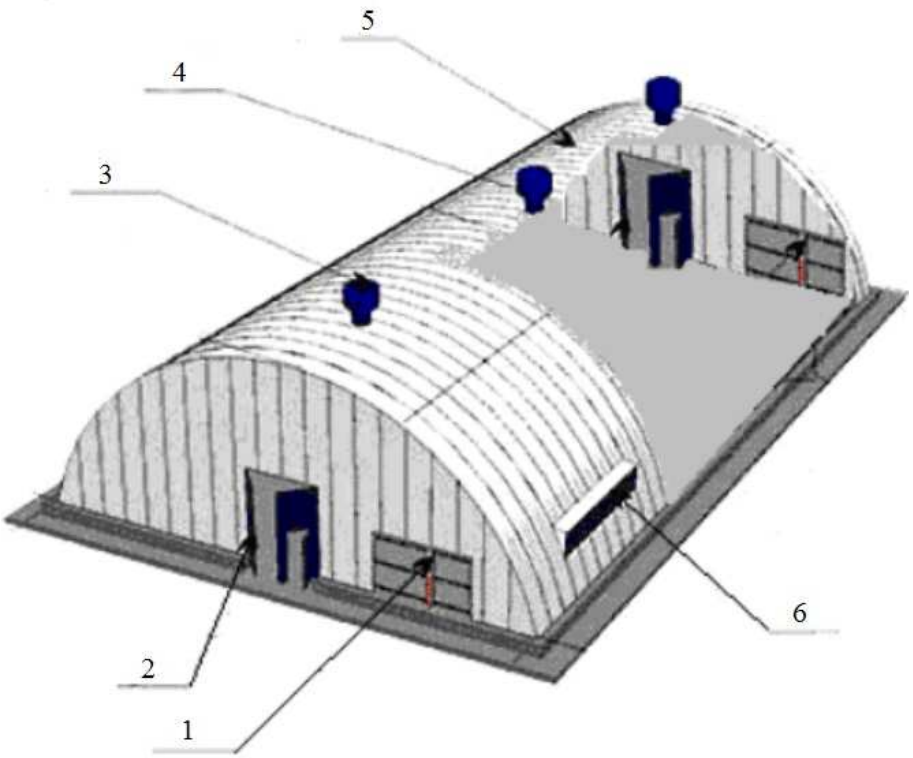
заполняемости гибкий мешок поднимают вверх. Выгрузка происходит посредством шнекового разгрузочного устройства. Вентилирование хранящегося материала осуществляется с использованием вентилятора высокого давления, комплекта воздуховодов и охладительной машины. Недостатками данной системы хранения является то, что требуется дополнительная электрическая установка, которая будет давать необходимое питание для загрузки и разгрузки материала, создание газовой среды, а также его вентилирования и охлаждения. При поведении контроля влаги и температуры зерна с использованием пробоотборников необходима разгерметизация ёмкости. Это может привести к утечке углекислого газа, а это не только нарушит технологию хранения, что приведет к порче хранящегося материала, но может нанести вред здоровью человека при контакте с ядовитым газом. При загрузке и выгрузке происходит механическое повреждение зерна, что негативно отражается на его качестве. Следовательно, использование системы «Регас-Изок» при хранении семян сельскохозяйственных культур является нецелесообразным, так как не обеспечивает его сохранность.

Альтернативным способом хранения [104] зерна и семян является использование зернохранилищ арочного типа. Они бывают каркасные (рис. 1.5), бескаркасные (рис. 1.6) и бескаркасные с бетонными стенками в основании (рис.1.7).



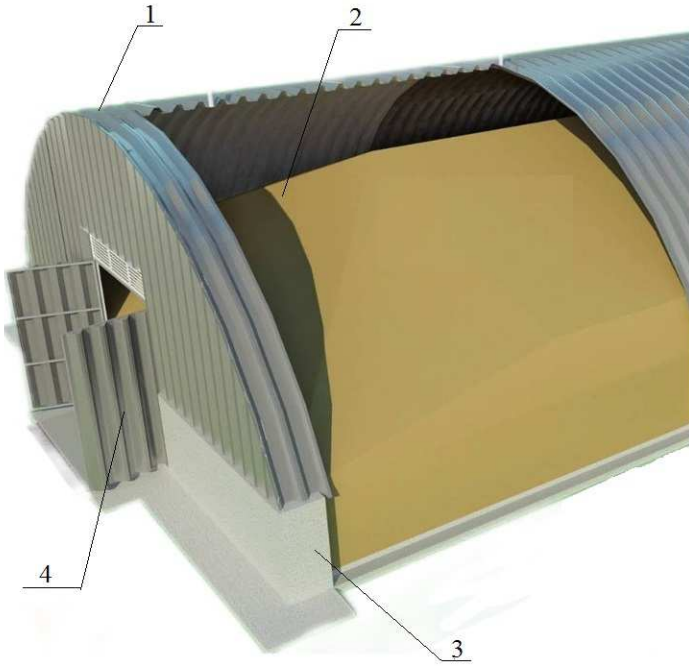
1 – каркас конструкции; *2* – зерно; *3* – ворота с дверьми

Рисунок 1.5 – Общий вид каркасного зернохранилища арочного типа



1 – торцевые стойки; *2* – ворота с дверьми; *3* – система вентиляции; *4* – арки; *5* – оцинкованный металлический профнастил; *6* – оконные проёмы

Рисунок 1.6 – Общий вид бескаркасного зернохранилища арочного типа



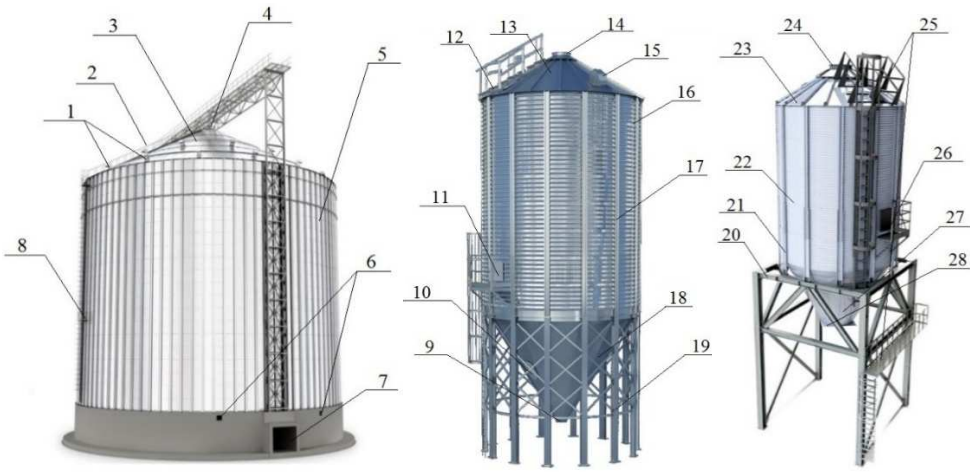
1 – металлический профиль; *2* – опорная стенка; *3* – зерно; *4* – ворота с дверью

Рисунок 1.7 – Общий вид бескаркасного зернохранилища арочного типа с бетонными стенками в основании

Бескаркасное хранилище состоит из арок, изготовленных из рулонной оцинкованной стали. Толщина стенки колеблется в диапазоне от 0,8 до 1,5 *мм*. Высота данной конструкции зависит от ширины арки. Обычно пролет делается шириной 10…30 *м*. Длина хранилища может быть любой. Между собой арки закрепляются прочным фланцевым швом и устанавливаются на заранее подготовленный фундамент. Полы могут быть бетонные, асфальтобетонные, наливные эпоксидные или полиуретановые. Последние наиболее практичны в использовании, так как изготовлены по современным технологиям строительства. Арочные зернохранилища оснащены вентиляцией, системой контроля состояния хранящегося зерна и семян, а также оконными проёмами. Чтобы хранящийся материал не переохлаждался зимой и не перегревался в летнее время года, на стены ангара наносят теплоизоляционный материал. В таких ангарах зерно можно хранить как на полу, так и в мешках. Максимальная высота хранящегося материала не должна превышать 2,5 *м*. Монтаж хранилища осуществляется достаточно быстро. Они способны выдерживать силу ветра до 200 км/ч и давление снега до 240 *кг/м*^{2}. Бескаркасный ангар площадью 450 *м*^{2} вмещает 1 тысячу тонн зерна и семян зерновых культур. Срок службы хранилищ составляет минимум 30 лет. Бескаркасный вариант сооружения стоит дешевле аналогичного каркасного. Данное сооружение универсально. Его можно использовать не только в качестве хранилища зерна и семян, но и в других производственных целях. К недостаткам арочных хранилищ следует отнести отсутствие автоматизации рабочего процесса при загрузке и выгрузке зерна. Приходится использовать транспортёры или фронтальные погрузчики, которые механически воздействуют на зерно и семена, тем самым нанося непоправимый вред их качеству. Стоит отметить тот факт, что при неправильной стыковке профилей образуются зазоры, через которые внутрь хранилища поступает влага, атмосферный воздух и вредоносные микроорганизмы, которые также снижают качество хранящегося сырья. Из этого следует, что использование арочных зернохранилищ не гарантирует сохранности качества зерна.

На современном этапе развития технологии хранения зерна и семян зерновых культур наиболее распространённым видом конструкций являются сборно-

металлические силосные зернохранилища. Они представляют собой цилиндрические стальные конструкции, имеющие рёбра жёсткости, смотровые люки, загрузочное и разгрузочное отверстия, лестницу, а также внутри оснащены системами контроля качества хранящегося сырья, гидро- и теплоизоляцией, вентиляцией [25]. Известны плоскодонные (рис. 1.8,*а*), с коническим дном (рис. 1.8,*б*) и экспедиторские силосные зернохранилища (рис. 1.8,*в*). Плоскодонные силосы способны вмещать до 6000 тонн зерна. Конусные силосные зернохранилища рассчитаны на загрузку до 1000 тонн, в зависимости от угла конического дна и диаметра. Конечно, срок службы любой конструкции зависит от качества материала, из которого он собран. Зернохранилища размещены под открытым небом и поэтому подвержены воздействию агрессивных факторов окружающей среды.



а *б* *в*

а – плоскодонный силос; *б* – конусный силос; *в* – экспедиторский силос;
1 и *15* – дыхательные клапаны; *2*, *12* и *25* – лестница; *3*, *13* и *23* – коническая крыша;
4, *14* и *24* – загрузочное отверстие *5*, *16* и *22* – металлические листы перфарированные листы корпуса зернохранилища; *6* – отверстия для аэрации зерохранилища; *7*, *9* и *28* – выгрузное отверстие; *8*, *11* и *26* – инспекционная дверь; *10* – ревизионный люк; *17* и *21* – рёбра жесткости; *18* и *27* – конусное дно; *19* и *20* – опорная конструкция

Рисунок 1.8 – Варианты зернохранилищ силосного типа

Сталь, из которой собраны силосы, должна быть оцинкованной, способной выдерживать воздействие неблагоприятных погодных условий. Её толщина выбирается исходя из вместимости и природных условий. Минимальная снеговая нагрузка, которую выдерживает крыша зернохранилища, составляет 180 *кг/м*^{2}.

Использование современных систем термометрии позволяет бесперебойно контролировать состояние хранящегося сырьевого материала на разных слоях в реальном времени [55]. Конструкция оснащена системой вентилирования. Стоит отметить, что силосные зернохранилища возводятся вертикально, что экономически более выгодно, так как занимаемая площадь меньше в сравнении с горизонтальными конструкциями [103, 125]. Загрузка и выгрузка зерна осуществляется с помощью шнековых транспортёров и норий через технологические люки. Их использование позволяет провести этот процесс быстрее и удобнее, чем в альтернативных способах.

Опираясь на исследования учёных, можно отметить то, что при хранении зерна или семян зерновых культур в силосном хранилище с влажностью не более 14% не выявлено существенного снижения их качества. Срок безопасного хранения при таких условиях превышает 6 месяцев [13, 54].

Таким образом, проведя обзор конструкций зернохранилищ, можно сделать вывод, что наиболее перспективными являются металлические хранилища силосного типа с конусным дном. Благодаря системе мониторинга обеспечивается полноценный контроль за состоянием, находящегося в нем сырьевого материала, что гарантирует его сохранность. Если рассматривать данные зернохранилища с точки зрения экономики, то их можно считать конкурентоспособными, учитывая, что сроки их возведения не велики.

1.2 Способы обработки зерна и семян зерновых культур при хранении

Главной задачей в процессе хранения зерна и семян сельскохозяйственных культур является сохранение их качества и своевременная защита от влияния неблагоприятных факторов. В зерновом или семенном материале, как и в любом другом живом организме, происходят химические и биологические процессы. К одному из них относится дыхание, которое зависит от влажности и температуры вороха. При повышении данных показателей создаются условия, в которых зерно или семена чувствуют себя дискомфортно. Происходит развитие микроорганизмов и бактерий, появляются вредоносные насекомые, что снижает сроки безопас-

ного хранения [40, 60]. Поэтому урожай, поступающий на хранение, необходимо своевременно обрабатывать и следить за его качеством с применением современных технологий.

К одному из способов обработки зерна и семян зерновых культур при хранении относится охлаждение. Данная процедура проводится в зернохранилищах, в которых предусмотрена вентиляция хранящегося материала. При этом охлаждение зерна проводят до температуры от -5 до +10 °С, когда жизнедеятельность насекомых, микроорганизмов и основного сырья снижается [13, 25, 43]. Обработку данным способом возможно осуществить при использовании специального оборудования «Granifrigor» (рис. 1.9).

1 – механизм перемещения установки; *2* – вентилятор высокого давления; *3* – металлический силос; *4* – охладительная установка «Granifrigor»; *5* – воздуховод; *6* – передвижные колеса

Рисунок 1.9 – Технологический процесс обработки зерна и семян зерновых культур методом охлаждения установкой «Granifrigor»

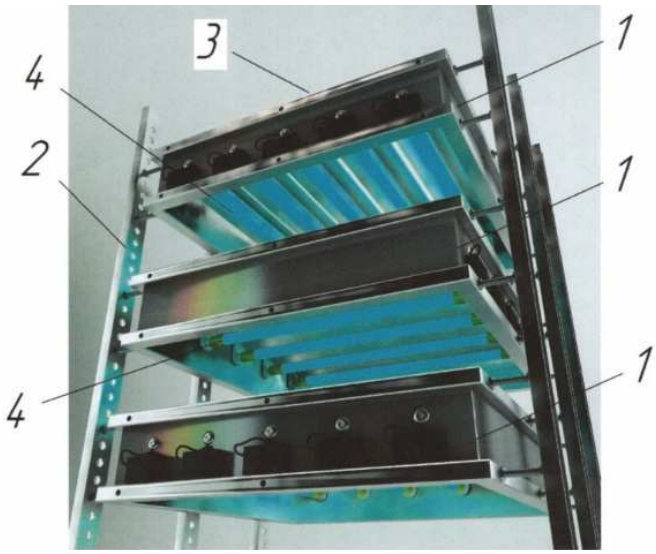
Технологический процесс происходит следующим образом. В установку через фильтр поступает атмосферный воздух, который охлаждается до необходимой температуры, при этом происходит его обезвоживание. Влага, выделяющаяся на протяжении всего процесса, оседает в конденсаторе. На выходе получается холодный, сухой воздух, который подается в систему вентилирования зернохранилища через воздуховод и пронизывает хранящийся материал. Далее, через дыха-

тельные клапаны отработанный воздушный поток поступает в атмосферу, забирая с собой тепло и влагу из зерна. Конструкция позволяет контролировать температуру воздуха, подаваемого в зернохранилище. Охлаждение способствует увеличению срока безопасного хранения. Однако для этого требуется, чтобы зернохранилища были герметичны и оборудованы системой вентилирования. Данный способ является энергозатратным. Это связано с тем, что зерно имеет низкую теплопроводность, поэтому в летнее время затраты на электроэнергию увеличиваются в несколько раз. Отметим то, что микроорганизмы не уничтожаются, а лишь на некоторое время снижают свою активность. Даже малейшая разгерметизация или несоответствие температурного режима при обработке приводит к активизации процессов, способствующих развитию вредителей и порче зерна. Охлаждение не предусматривает возможность поддержания или повышения качественных показателей зерна и семян зерновых культур. Такая технология позволяет лишь на некоторое время предотвратить порчу хранящегося материала. Следовательно, консервация зерна посредством охлаждения имеет массу недостатков, что не обеспечивает сохранность его посевных и товарных качеств.

Известна технология хранения зерна без доступа кислорода [43]. Данный процесс осуществляется естественным путём за счет дыхания зерен. В результате происходит снижение содержания кислорода и повышение концентрации углекислого газа, который выступает в роли консерватора в замкнутом пространстве. Для более быстрого достижения бескислородного состояния необходимо, чтобы зернохранилище было максимально плотно закрыто, иначе процесс дыхания не успеет заместить весь кислород углекислым газом. Такой же эффект можно получить искусственно, путем принудительного закачивания в сырьевой материал консерванта. При этом в качестве вводимого элемента может быть азот, углекислый газ, а также их смесь и фумиганты. Ещё один способ создания бескислородной среды – создание вакуума посредством откачки кислорода вакуумным насосом. В результате таких обработок жизнедеятельность микроорганизмов снижается.

Недостатком способа обработки зерна и семян зерновых культур при помощи замены кислорода в межзерновом пространстве на другой газ является то, что процесс достаточно длительный. В данный период могут развиться микроорганизмы и вредители, следовательно, возрастает риск порчи зерна. В случае разгерметизации зернохранилища внутрь него поступит атмосферный воздух, соответственно, активизируется жизнедеятельность вредоносных насекомых, микроорганизмов. При этом повысится интенсивность дыхания зерна или семян, что приведёт к повышению их температуры и влажности, что негативно отразится на качестве убранного урожая. Поэтому применение способа консервации в бескислородной среде зерна и семян зерновых культур в процессе их хранения является ненадёжным, так как может привести к снижению их качества.

Известен способ обработки зерна и семян зерновых культур ультрафиолетовым излучением [26, 109]. Его используют для обеззараживания и дезинфекции от вредных микроорганизмов, а также повышения энергии прорастания и лабораторной всхожести семян [57 ,59, 67, 94, 110, 118]. Для осуществления данной обработки необходима специальная установка по выработке ультрафиолетового излучения (рис.1.10).



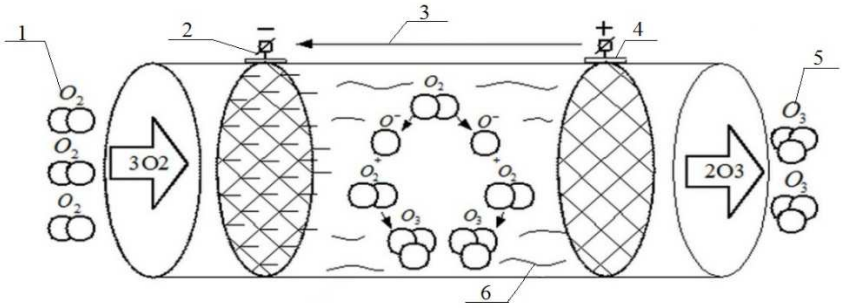
1 – модуль; *2* – стойка; *3* – корпус модуля; *4* – ультрафиолетовая лампа

Рисунок 1.10 – Модульная установка для обработки зерна и семян зерновых культур ультрафиолетовым излучением

Технологический процесс обработки зерна и семян ультрафиолетовым излучением осуществляется следующим образом. Установку подключают к источнику электрического тока. Затем осуществляют запуск вибрационного механизма. Затем зерно или семена зерновых культур засыпают на самый верхний модуль, откуда они под действием силы тяжести падают на защитные щитки и от вибрации скатываются в зазоры между соседними щитками. При этом ультрафиолетовое излучение от ламп облучает зерно или семена зерновых культур. Данный процесс обработки происходит в каждом модуле сверху вниз.

Недостатком ультрафиолетового способа обработки зерна и семян зерновых культур является то, что лучи распространяются только прямолинейно с малой энергией излучения и слабой проникающей способностью. Следовательно, они могут действовать только на поверхность зерна или семян зерновых культур. Поэтому для должного эффекта необходимо, чтобы обрабатываемый материал находился строго под прямым воздействием ультрафиолетового луча [59].

На сегодняшний день современным и экологически безопасным способом обработки зерна и семян зерновых культур можно отнести процесс озонирования [18, 48, 91, 96, 144, 146]. Озон – разновидность кислорода, состоящая из трех атомов и обозначаемая молекулярной формулой O_3 (рис 1.11).



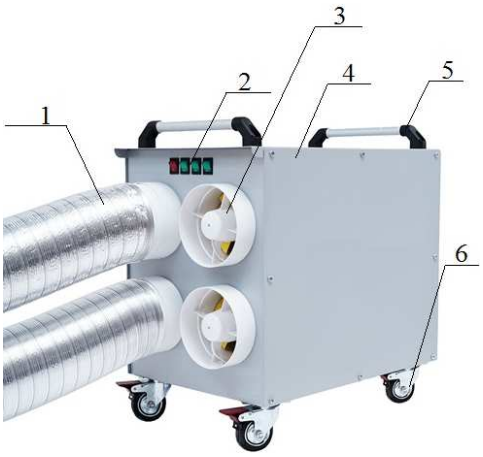
1 – молекулы кислорода; *2* – отрицательный электрод; *3* – питание;
4 – положительный электрод; *5* – озон; *6* – электрическое поле

Рисунок 1.11 – Способ получения озона посредством электрического разряда

Греческое слово «όζον» переводится как «пахнуть». Из-за специфического запаха немецкий ученый Шейнбейн в 1785 году дал такое название этому химическому элементу. Озон имеет ряд преимуществ. Одним из положительных ка-

честв газа является его обеззараживающие свойства [105, 119, 138, 136, 140]. Он хорошо растворяется в воде, обладает мощными окислительными, дезинфицирующими, фунгицидными и бактерицидными свойствами, которые позволяют уничтожать множество бактерий, вирусов и грибов [6, 9, 17, 62, 107, 147]. Кроме того, озон способен восстанавливать чистоту воздуха и не оставляет токсинов в обрабатываемом материале.

Несмотря на то, что первое оборудование для производства озона было изобретено в 1857 году немецким изобретателем Эрнстом Вернером Фон Сименсом и запатентовано в 1896 году Николой Теслой, широкое практическое применение озона в сельском хозяйстве началось только в начале XXI века. Технический прогресс позволил создать более доступные и компактные устройства для получения озона [56, 64, 108], называемые озонаторы (рис. 1.12). Их производство расширило возможности использования газа в различных сферах деятельности.



1 – газоводы; *2* – кнопки управления установкой; *3* – нагнетатель воздуха; *4* – корпус установки; *5* – упоры для передвижения установки; *6* – передвижные колеса

Рисунок 1.12 – Общий вид озонатора

Преимущество озона перед другими веществами состоит в возможности его получении непосредственно из воздуха, что позволяет избежать необходимости хранения или запасания газа [10, 16, 31, 131]. Использование процесса озонирования в агропромышленном комплексе сокращает объёмы производства, различных химических препаратов, вредных для здоровья людей [20, 32]. Кроме того, применение озона в сельском хозяйстве способствует снижению загрязнения окру-

жающей среды, обеспечению чистоты продуктов питания, снижению затрат на обработку сельскохозяйственной продукции [4, 49]. Озон используется при сушке зерна, обработке семян перед посевом, хранении сельскохозяйственной продукции, дезинфекции помещений и оборудования, борьбе с вредителями и болезнями растений [2, 5, 14, 132].

В последние время многие российские ученые занимались исследованием процесса озонирования в сельском хозяйстве. В их числе В.Н. Авдеева, И.В. Баскаков, С.В. Вербицкая, Ю.В. Саенко, Н.М. Латышенок, И.В. Горский, Г.А. Закладной, Н.В. Ксенз, Д.А. Нормов, Е.К.М. Саеед, М.А. Сигачева, А.Н. Сорокин, Г.П. Стародубцева, В.Ф. Сторчевой, И.В. Шестерин, Р.И. Штанько, Р.С. Шхалахов и другие. Наибольшее количество научных исследований посвящены предпосевной обработке семян с использованием озонирования. Достаточно хорошо было изучено влияние обработки озоном на прорастание семян, их всхожесть, силу роста, урожайность растений, а также на уничтожение вредителей, борьбу с грибными инфекциями и т.д.

Исследования А.А. Гавриловой, О.А. Шабараевой, Г.Ю. Ткаченко и А.В. Чурмасова, проведённые с целью выявления влияния предпосевной озонной обработки семян ячменя сорта «Зазерский» на их энергию прорастания. Причем срок хранения посевного материала составил 1 и 11 лет. Учёные пришли к выводу, что обработка озоном в диапазоне дозы от 283,8 до 471,3 *мг мин/м*^{3} при сроке хранения 11 лет приводит к увеличению энергии прорастания с 26,7% до 33,8%. Однако, обработка семян сроком хранения 1 год практически не влияет на этот показатель [68].

Учёные Кубанского ГАУ провели эксперимент по влиянию предпосевного озонирования семян кукурузы на их энергию прорастания. В результате исследования было установлено, что увеличение данного показателя составило около 2% при времени обработки 3 минуты, концентрации озоновоздушной смеси 24 *мг/м*^{3} и отлёжке 1 день. Наиболее положительное влияние озона на энергию прорастания семян наблюдалось при 7 минутах воздействия озоновоздушной смеси при концентрации озона 24 *мг/м*^{3} и отлёжке 20 дней. При данном режиме наблюдается

повышение энергии прорастания семян на 10%. Однако увеличение времени воздействия озоновоздушной смеси на семенной материал до 9 минут приводит к снижению положительного эффекта [126].

Результаты исследования А.А. Шевченко показали, что оптимальная концентрация озоновоздушной смеси для повышения лабораторной всхожести семян кукурузы находится в пределах от 20 до 40 *мг/м*^{3}. При такой обработке исследуемый показатель увеличился с 60 до 85% [126].

В Воронежском ГАУ проводили исследования по выявлению влияния озоновоздушной смеси на качественные показатели семян кукурузы в период их хранения. Выявили, что за три месяца наблюдений энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян повысились соответственно на 5 и 4% в сравнении с контрольным вариантом, не подвергавшемся воздействию газа [11].

Исследования Т.М. Морозовой показали, что предпосевное озонирование положительно влияет на посевные качества семян яровой пшеницы. Их энергия прорастания увеличилась на 6…9,5%, а лабораторная всхожесть – на 2…6,8% [61]. Е.В. Тышкевич также зафиксировал повышение энергии прорастания на 7,1% и лабораторной всхожести на 7,3% семян яровой пшеницы сорта Дарья при концентрации озоновоздушной смеси 2,8 *мг/м*^{3} и времени обработки 20 минут [120].

А.А. Дубцова и А.В. Чурмасов в своих исследованиях зафиксировали положительный эффект от озонной обработки семян льна при дозе воздействия газа 90…750 *мг ·мин/м*^{3}. Это приводит к повышению их энергии прорастания до 14% [42].

Эксперименты ученых С.А. Бекузаровой и И.А. Шабановой на семенах клевера лугового сортов "Владикавказский", "Дарьял" и "Алан" показали, что обработка семенного материала озонированной глиной приводит к повышению полевой всхожести. Без озонирования исходный показатель составлял соответственно 55, 48 и 42%, в зависимости от сорта. После обработки полевая всхожесть семян повысилась соответственно до 62, 52 и 48% [12].

Подобные исследования на семенах сои проводили В.Н. Халецкий, А.Д. Кравчук и А.М. Миронов. В результате было установлено, что озонная обработка способствовала увеличению их полевой всхожести до 80…82%, в то время как в контроле она составляла 77%. Также стоит отметить, что было зафиксировано формирование большого количества клубеньков, что свидетельствует о более интенсивном азотном питании [123]. Следовательно, полевая всхожесть семян сои в среднем увеличивается на 5,5%.

Многие учёные занимались исследованием влияния озонирования зерна на его качество. В.Н. Авдеева не смогла выявить влияние процесса озонирования в диапазоне доз от 29 до 376 $г \cdot с/м^3$ на содержание клейковины [1]. И.В. Шестерин установил, что содержание клейковины после озонирования практически не изменяется по сравнению с контрольными значениями [128].

В своих исследованиях Е.К.М. Саеед не обнаружил влияния озонной обработки в течении девяти часов с концентрацией озона 0,8 $г/м^3$ на содержание белка [95]. Однако Т.М. Сигачева определила положительное влияние от озонной обработки семян яровой пшеницы сорта «Мариинка». По результатам исследований выявлено, что озонирование способствует увеличению содержания белка в зерне на 5…15% при концентрации озона 85 $мг/м^3$ в течении 45 минут [101]. Следовательно, озонирование положительно влияет на содержание массовой доли белка в семени. Увеличение данного показателя в среднем составляет 10%.

Учёными установлено, что озонирование позволяет снизить токсичность зерна и семян [46, 53], а также способствует уменьшению развития на зерновках грибной инфекции [7, 41]. Обработка зерна в течение 60 минут способствовала снижению содержания токсичных веществ на 9% [65]. Следовательно, озонная обработка положительно влияет на микрофлору семени и способствует угнетению токсичных веществ.

Установлено, что озонирование способствует более эффективному накоплению аминокислот, углеводов и белков растениями, что положительно отражается на будущем урожае [101].

Выявлено, что озонная обработка положительно влияет на электропроводность зерна, что, в свою очередь улучшает состояние клеточных мембран [3].

Исследования М.А. Сигачёвой показали, что озонирование приводит к увеличению урожайности яровой мягкой пшеницы на 3…27% [102]. В Воронежском ГАУ в ходе исследований также установили, что при использования озонной обработки увеличение урожайности семян кукурузы составляет 13,4%. Также предпосевная обработка семян озоновоздушной смесью при концентрации озона 0,8 *мг/м*^{3} повлияла на увеличение урожайности клевера лугового на 14,6% [106]. Следовательно, озонирование положительно влияет на урожайность различных сельскохозяйственных растений. Предпосевная озонная обработка способствует увеличение урожайности различных сельскохозяйственных растений в среднем на 14%.

Доказана экономическая эффективность от применения озона в технологическом процессе предпосевной и послеуборочной обработки зерна и семян зерновых культур в сравнении с традиционными химическими препаратами [30, 127]. Обработка семян перед посевом озоновоздушной смесью позволила получить рост прибыли на 275 *руб/га* [128]. При обработке одной тонны семян, использование установки по выработке озона обходится на 9,46 рублей дешевле, чем применение ядохимикатов [95].

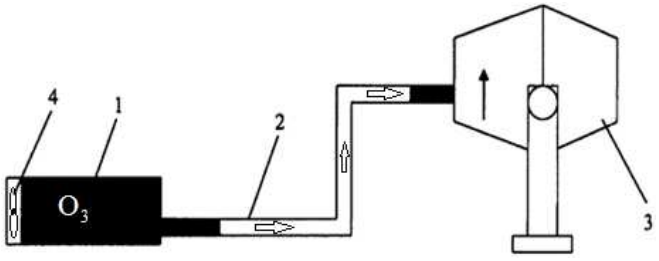
Таким образом, озонная обработка оказывает положительное влияние на энергию прорастания семян. Её увеличение в среднем составляет 9%. Также происходит повышение лабораторной всхожести семян в среднем на 10%. Полевая всхожесть семян в среднем увеличивается на 5,5%. Озонирование положительно влияет на содержание массовой доли белка в зерне. Ее прибавка в среднем составляет 10%. На содержание клейковины озонная обработка никакого влияния не оказывает. Также использование озонных технологий положительно влияет на снижение вредителей микрофлоры семени. Озонирование способствует более эффективному накоплению аминокислот, углеводов и белков растениями, положительно влияет на электропроводность зерна, что, в свою очередь, улучшает состояние клеточных мембран. При озонной обработке происходит увеличение уро-

жайности различных сельскохозяйственных растений в среднем на 14%. Также доказана экономическая эффективность применения процесса озонирования. Следовательно, озонная обработка является эффективным методом улучшения посевных качеств семян сельскохозяйственных культур. Стоит отметить, что научных трудов, посвящённых изучению влияния озона при хранении семенного материала недостаточно для того, чтобы использовать его в технологическом процессе и давать практические рекомендации производству. Соответственно, возникает необходимость в проведении дальнейших исследований.

1.3 Патентный поиск технических средств, обеспечивающих озонную обработку зерна и семян зерновых культур

Для поиска наиболее близкого технического решения, которое могло бы послужить прототипом для разработки зернохранилища с регулируемой озоновоздушной средой, был проведен патентный поиск [28, 66].

Существует ряд конструкций, которые могут проводить операции по обработке зерна и семян зерновых культур озоном. Например, изобретение РФ, запатентованное под номером 2248111 [76], для повышения качественных показателей сельскохозяйственных семян за счет применения озонной предпосевной обработки. Оборудование состоит из озоногенератора *1* (рис. 1.13), газопровода *2*, вращающегося бункера *3* и нагнетательного устройства *4*.



1 – озоногенератор; *2* – газопровод; *3* – вращающаяся ёмкость; *4* – нагнетательное устройство

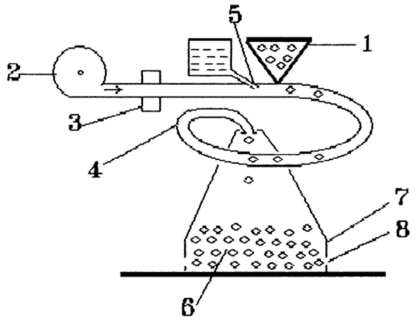
Рисунок 1.13 – Схема устройства для обработки семян озоном, защищённая патентом РФ на изобретение № 2248111

Принцип работы данной установки следующий. Семенной материал загружается в ёмкость *3*, и закрывается крышкой. В неё вмонтирован патрубок для по-

дачи озоновоздушной смеси. После подачи напряжения на электродвигатель приводится в движение ёмкость *3*. При этом включается генератор озона *1* и нагнетающее устройство *4*. Происходит перемешивание семян в ёмкости, которая вращается со скоростью 120-150 *об/мин*. Время обработки составляет 5-7 минут, а концентрация озона в озоновоздушной смеси находится в пределах от 10 до 80 $мг/м^3$. Также внутри ёмкости размещены лопасти, которые тщательно перемешивают семена. По окончании обработки семенной материал отгружают в специальный резервуар. Особенностью изобретения является то, что обработка семян озоновоздушной смесью перед посевом происходит во вращающейся ёмкости, что способствует равномерному взаимодействию газа с посевным материалом, обеспечивая одинаковую дозу за счёт перемешивания.

Недостатком данного устройства является то, что при перемешивании на семена воздействуют внешние силы, которые травмируют их, при этом время взаимодействия с озоновоздушной смесью слишком мало, что не гарантирует качество их обработки и повышение будущей урожайности.

Известно изобретение РФ № 2341924 [77], которое позволяет обработать семена зерновых культур озоновоздушной смесью, тем самым повысив их будущую урожайность. Устройство включает в себя бункер *1* (рис. 1.14), вентилятор *2*, озонатор *3*, спиральную камеру *4*, форсунку *5*, резервуар *6*, воздухонепроницаемый материал *7*, прорези *8*.



1 – бункер; 2 – вентилятор; 3 – озонатор; 4 – рабочая камера; 5 – форсунка; 6 – обрабатываемый семенной материал; 7 – резервуар из воздухонепроницаемого материала; 8 – прорези

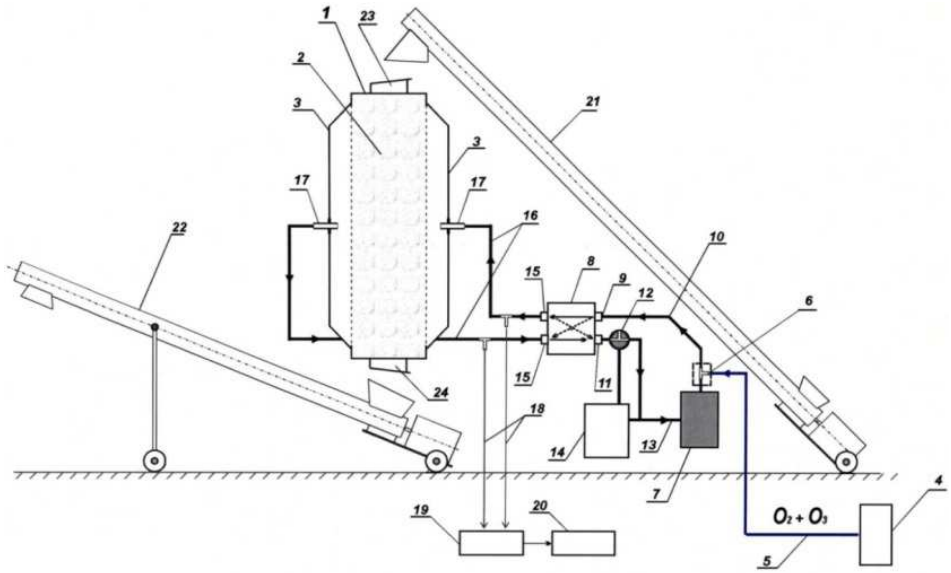
Рисунок 1.14 – Схема устройства для обработки семян озоном, защищённая патентом РФ на изобретение № 2341924

Работает данная конструкция следующим образом. Обрабатываемые семена загружаются в ёмкость *1* и из неё подаются в рабочую камеру *4*. Воздух из вентилятора *2* поступает в озонатор *3*, откуда озоновоздушная смесь с концентрацией озона в пределах от 10 до 20 *мг/м*^{3} нагнетается в рабочую камеру *4*. При воздействии на семенной материал потока воздуха они перемещаются по спирали, одновременно увлажняются посредством форсунки *5*. Затем газ с семенным материалом поступает в резервуар *7* из воздухонепроницаемого материала, в котором они выдерживаются в озоновоздушной смеси в течение 30 минут. Избыточное давление уходит через прорези *8*.

Особенностью этой конструкции является спиральная рабочая камера, в которую вмонтирована форсунка для подачи воды. Недостаток установки состоит в том, что увлажнение материала будет повышать вероятность забивания. Впоследствии влажные семена надо сушить, а иначе они начнут плесневеть и гнить. Кроме того, объём резервуара ограничен, что не позволяет обрабатывать большие объёмы семян.

Известно изобретение РФ, запатентованное под номером 2556703 [78], направленное на улучшение эффективности озонной обработки и повышение качественных показателей семян сельскохозяйственных культур. Устройство состоит из бункера *1* (рис. 1.15), центральной ёмкости *2*, боковых камер *3*, озонаторной установки *4*, газопровода *5*, устройства смешивания *6*, вентилятора *7*, блока коммутации *8*, штуцеров *9*, *11*, *15*, *17*, магистралей нагнетания и всасывания *10*, *13*, трёхходового крана *12*, деструктора *14*, трубопровода *16*, шлангов *18*, измерителя концентрации озона *19*, вычислительного блока *20*, шнековых конвейеров *21*, *22*, люков *23*, *24*. Принцип действия установки следующий. В центральную ёмкость *2* (рис. 1.15) бункера *1* по шнеку *21* через загрузочный люк *23* производится загрузка семенного материала. При полном наполнении ёмкости подачу семян прекращают. Затем закрывают загрузочный люк *23*, включают вентилятор *7*, озонатор *4*, измеритель концентрации озона *19* и вычислительный блок *20*. Положение трёхходового крана *12* устанавливают таким образом, чтобы выходной штуцер блока коммутации *8* был подключен напрямую к магистрали всасывания *10*.

Далее подают озон по газопроводу *5* в устройство смешивания *6*. Тем самым образуется озоновоздушная смесь, которой проводят обработку семян.



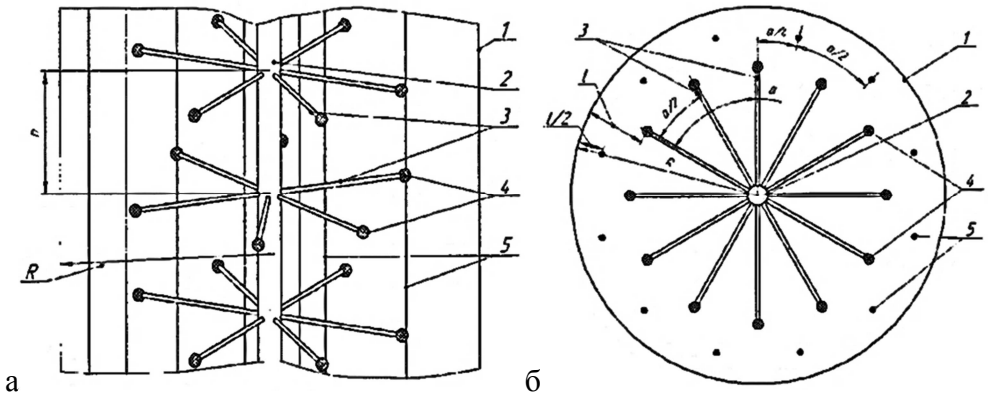
1 – бункер; *2* – центральная камера; *3* – перфорированные стенки; *4* – озонаторная установка; *5* – озонопровод; *6* – устройство смешивания; *7* – вентилятор; *8* – блок коммутации потоков озоносодержащей газовой смеси; *9*, *11*, *15* и *17* – штуцеры; *10* и *13* – магистрали нагнетания и всасывания; *14* – деструктор остаточного озона; *16* – трубопровод; *18* – шланги; *19* – измеритель концентрации озона; *20* – вычислительный блок; *21* и *22* – загрузочный и выгрузной шнековые конвейеры; *23* и *24* – выгрузной и загрузочный люки

Рисунок 1.15 – Схема оборудования для обработки семян озоном, защищённая патентом РФ на изобретение № 2556703

Устройство позволяет изменять направления продувки при помощи блока коммутации потоков озона *8* (рис. 1.15) по сигналу от вычислительного блока *20*, который также отвечает за определение количества газа, поглощенного слоем семян. Измеритель концентрации озона *19* контролирует параметры озоновоздушной смеси на входе и выходе из бункера *1*. После окончания обработки выключают озонатор *4*. Далее переводят трёхходовой кран *12* в положение, при котором выход деструктора остаточного озона *14* подключается к магистрали всасывания *13* нагнетательного вентилятора *7*, тем самым осуществляют разложение остаточного газа. После завершения процесса выключают вентилятор *7*, открывают разгрузочный люк *24* и выгружают обработанные семена с помощью разгрузочного конвейера *22*.

Отличительной особенностью этого изобретения является то, что оно имеет трёхкамерный герметичный бункер, центральная часть которого отделена от боковых перфорированными стенками. Боковые камеры и возможность обработки со сменой направления продувки позволяют повысить равномерность распределения озоновоздушной смеси в семенной массе. К недостаткам данного изобретения можно отнести то, что при загрузке и выгрузке зерна используют шнеки, которые его травмируют, также отсутствуют датчики контроля важности и температуры семян. Кроме того, не ясно, как газ движется из озонатора и поступает в устройство смешивания. Несмотря на то, что подача газа идет с двух сторон, в центре ёмкости зерно будет получать меньшую дозу, чем у перфорированных стенок.

Известно изобретение РФ № 2659904 «Хранилище зерна» [79], позволяющее поддерживать качественные показатели зерна за счёт применения озоновоздушной смеси. Конструкция включает в себя корпус *1* (рис. 1.16) с размещенными внутри датчиками температуры *5* и воздуховодом *2* с отводами *3*, на концах которых установлены форсунки *4* для подачи озоновоздушной смеси в зерно.



а – фрагмент прямоугольной диметрической проекции продольного разреза; б – поперечный разрез; *1* – цилиндрический корпус; *2* – воздуховод; *3* – отводы; *4* – форсунки; *5* – датчики температуры; *l* – расстояние между форсункой и корпусом; *l*/*2* – расстояние между датчиком температуры и стенкой корпуса; R – радиус цилиндрического корпуса; *α* – расстояние между форсунками; *α*/*2* – угол смещения форсунки относительно отвода в последующих ярусах; *h* – шаг размещения отводов по высоте

Рисунок 1.16 – Хранилище семян, защищённое патентом РФ на изобретение № 2659904

Принцип действия изобретения заключается в следующем. Озонаторная установка генерирует озоновоздушную смесь и подаёт её в вод *2* (рис. 1.16), оттуда газ по отводам *3* при помощи форсунок *4* поступает в насыпь семян. Встроенные электромагнитные клапаны нормально-закрытые, что позволяет подавать озоновоздушную смесь в зону, где повышена влажность или температура зерна. Обработку осуществляют до тех пор, пока показания датчиков не нормализуются. Отработанную озоновоздушную смесь с неразложившимся остаточным газом направляют повторно в хранилище после прохода через фильтрующие элементы, осушитель воздуха и устройство смешивания. Это позволяет поддерживать постоянную концентрацию озона в озоновоздушной смеси, которая подается в хранилище семян. Отличается данное хранилище от аналогов тем, что в корпусе имеются отводы, размещенные с определенным шагом, образующие ярусы, тем самым обеспечивается равномерность обработки. Недостатком изобретения является то, что отсутствуют датчики контроля влажности семян и не обосновано расстояние между форсунками.

Таким образом, проведя обзор устройств и способов для проведения обработки семян зерновых культур озоновоздушной смесью, можно сделать вывод о, что схожи они только в том, что используют озон в качестве газа-реагента. При этом конструкция оборудования и принцип их работы отличны друг от друга. Общим недостатком является отсутствие контроля за влажностью и температурой зерна. Кроме того, нет систем автоматизации. Имеет смысл внедрять электронные программы, которые отслеживали бы состояние зерна, и в случае превышения допустимых параметров посредством специализированного оборудования изменяли режим обработки. Это позволит обеспечить сохранность убранного урожая без снижения его качественных показателей.

Следовательно, для того чтобы сохранить качество семян во время их консервации или предпосевной обработки, необходимо совершенствовать используемое оборудование, а также изучать и внедрять современные системы термометрии и вентилирования. Следует создать условия, при которых семена будут как можно меньше травмироваться. При этом их качественные показатели не будут

угнетаться, а при правильном хранении и своевременной обработке в перспективе дадут прибавку в урожайности сельскохозяйственных культур.

Таким образом, наиболее совершенной конструкцией, обеспечивающей регулируемую озоновоздушную среду, является изобретение РФ № 2659904, которое необходимо принять за прототип разрабатываемого технического средства.

1.4 Анализ недостатков озонной обработки зерна и семян зерновых культур

Несмотря на то, что процесс озонирования во многом превосходит традиционный химический метод обработки посредством пестицидов, он имеет и недостатки. Основной проблемой при использовании озонной обработки в производстве является негативное последствие высоких концентраций озона на живые организмы [50, 87]. Люди чувствуют запах газа при его содержании в воздухе 0,01 *мг/м*^{3} [22]. Предельно допустимая концентрация озона в окружающей среде для человека составляет 0,1 *мг/м*^{3} [74]. Люди и животные без вреда для здоровья могут находиться в озоновоздушной среде с содержанием озона до 0,2 *мг/м*^{3} [29]. Наивысшая разовая концентрация озона в воздухе населенных пунктов не должна превышать 0,16 *мг/м*^{3}, а среднесуточная максимальная концентрация озона составлять 0,03 *мг/м*^{3}.

Стоит отметить, что при содержании 1 *мг/м*^{3} озона в воздухе в человеческом организме уже начинают происходить изменения, которые негативно сказываются на его здоровье. Если концентрация газа достигла 2 *мг/м*^{3} и человек долгое время находится в этой воздушной среде, то у него начинает ухудшаться состояние. Это проявляется в виде головной боли, раздражения дыхательных путей, болей в горле, кашля, а также возрастает активность аллергенов. Стоит отметить, что при высоких концентрациях озон способен негативно влиять и на окружающую среду. Это может привести к снижению процесса фотосинтеза растений, что в дальнейшем их угнетает.

В ГОСТ Р 51706-2001 [38] прописана техника безопасности на производстве, где установлено озонаторное оборудование. В стандарте указано, что места, где размещены данные установки, должны быть обеспечены мощной вентиляци-

онной системой, бесперебойным контролем концентрации озона в воздухе, световой и звуковой сигнализацией в случае утечки газа. Озонаторы должны находиться в отдельном помещении, которое должно быть изолировано. Рабочий персонал, осуществляющий рабочий процесс озонирования, должен быть обеспечен необходимыми средствами индивидуальной защиты. К ним относятся противогазы с фильтрующим компонентом из йодистого калия и натронной известью, защитные очки, хлопчатобумажные халаты, перчатки и др. При работе с озоном следует давать организму дополнительную физическую нагрузку, которая повышает работоспособность дыхательной системы человека. Также рабочие должны получать специальное питание, содержащее большее количество жиров и витамина Е. Запрещается осуществлять рабочий процесс с использованием озона людям, имеющим хронические заболевания почек, сердечно-легочной и дыхательной систем, а также беременным и кормящим женщинам.

Наиболее часто неисправностью системы озонирования является её разгерметизация. При утечках газа необходимо немедленно остановить рабочий процесс. Вывести людей из зоны воздействия и устранить неисправность. В случае несоблюдения требуемых норм безопасности при работе с озоном возникает риск нанесения вреда здоровью людей.

Таким образом, на современном этапе развития аграрной отрасли применение озонной обработки в сельском хозяйстве является перспективным решением. Стоит отметить, что в настоящее время уровень развития техники позволяет снизить утечки озона в атмосферу до уровня предельно допустимых концентраций. При соблюдении техники безопасности при работе с газом можно избежать негативных последствий его влияния на живой организм. Поэтому следует проводить дальнейшие исследования по разработке и внедрению озонных технологий в различные технологические процессы агропромышленного комплекса, а выявленные недостатки можно нивелировать улучшением системы мониторинга и контроля.

1.5 Обзор теоретических исследований озонной обработки зерна и семян зерновых культур

Несмотря на то, что применение озонных технологий в сельском хозяйстве началось относительно недавно, благодаря совместным усилиям учёных уже известны теоретические работы о взаимодействии озона с зерном или семенами. Если заметить, что аналитические исследования достаточно разобщены, но все же можно провести их анализ.

А.Д. Нормов предполагает [47], что скорость поглощения озона семенами зависит от их поглощения, концентрации газа в воздухе и обрабатываемого объёма. Данную зависимость процесса можно представить в виде уравнения

$$\frac{dC}{dt} = -K_{\text{с}} \cdot C_{\text{озон}} \cdot S_{\text{оз}}, \tag{1.1}$$

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

$C_{\text{озон}}$ – концентрация озона в озоновоздушной смеси, *мг/м*^{3};

$K_{\text{С}}$ – константа скорости поглощения озона единицей объёма семян, *мг/*(*м*^{3}·*с*);

$S_{\text{оз}}$ – площадь обрабатываемого зернового материала, *м*^{2}.

Путем преобразования данное выражение можно представить в следующем виде:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S_{\text{оз}}}{V_{\text{осм}}} \cdot [v \cdot (C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}) - K_c \cdot C_{\text{вых}} \cdot V_{\text{осм}}], \tag{1.2}$$

где $V_{\text{осм}}$ – объём обрабатываемого семенного материала, *м*^{3};

v – скорость движения озоновоздушной смеси, *м/с*;

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

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

В конечном итоге концентрацию озона на входе из семенного материала можно найти по уравнению

$$C_{\text{вых}} = \frac{C_{\text{вх}} \cdot v}{v + K_c \cdot S_{\text{оз}} \cdot V_{\text{осм}}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{v + K_c \cdot S_{\text{оз}} \cdot V_{\text{осм}}}{V_{\text{осм}}}\right)\right] \cdot t, \tag{1.3}$$

где t – время обработки, *с*.

Поскольку данное уравнение является трансцендентным, следовательно, получить его решение элементарными функциями невозможно. Поэтому необходимо использовать метод итераций посредством ЭВМ. Д.А. Нормов отметил, что ориентировочное значение константы поглощения озона можно определить опытным путём, измеряя при этом скорость озоновоздушного потока, концентрацию газа на входе и на выходе из семенного материала, а также площадь и объём.

Интересны теоретические исследования по выявлению распространения озоновоздушного потока в слое зерна [47]. Д.А. Нормов предполагает, что распределение озона в слое зерна может основываться на его движении в виде плоского фронта. Тогда это можно представить в виде уравнения

$$\frac{dC}{dX} = \frac{K_c \cdot S(X) \cdot \mathrm{C_{озон}}}{v}, \tag{1.4}$$

где $\frac{dC}{dX}$ – скорость распространения озона по глубине слоя;

$S(X)$ – площадь взаимодействия поверхности семян с озоном в фронте распространения озоновоздушной смеси, $м^2$.

Также Д.А. Нормов предположил, что константа скорости поглощения озона семенами изменяется по экспоненциальной зависимости и может быть представлена следующим выражением:

$$K_c = -K_o \cdot \exp[-\beta \cdot C], \tag{1.5}$$

где K_O – величина константы скорости поглощения озона зерном при концентрации озона равной нулю;

β – константа, характеризующая зависимость скорости поглощения озона от концентрации озона.

Следовательно, решение уравнения (1.6) с учётом (1.3) можно представить в следующем виде:

$$\int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} \frac{e^{\beta} - \text{Созон}}{\text{Созон}} \cdot d\mathrm{C_{озон}} = -\frac{K_o}{v} \int_o^{h_{\text{сл}}} S(X)dX, \tag{1.6}$$

где $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя зерна, *мм*.

Данное уравнения имеет следующее решение:

$$\int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} \frac{e^{\beta} - \text{Созон}}{\text{Созон}} \cdot dC = \int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} \frac{1}{C} \left(1 + \frac{\beta \text{Созон}}{1} + \frac{\beta^2 \text{С}_{\text{озон}}^2}{2} + \frac{\beta^3 \text{С}_{\text{озон}}^3}{6}\right) d\text{С}_{\text{озон}} =$$

$$\ln|\text{С}_{\text{озон}}| \, 1_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} + \frac{\beta^2 \text{С}_{\text{озон}}^3}{6} \, 1_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} + \frac{\beta^3 \text{С}_{\text{озон}}^4}{24} \, 1_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вых}}} = \ln C_{\text{вых}} - \ln C_{\text{вх}} - C_K C_{\text{вх}} +$$

$$+ b(C_{\text{вых}} - \text{С}_{\text{вх}}) + \frac{\beta^2}{6} (\text{С}_{\text{вых}}^3 - \text{С}_{\text{вх}}^3 + \frac{\beta^3}{24} (C_{\text{вых}}^4 - C_{\text{вх}}^4), \qquad (1.7)$$

где b – коэффициент.

Отсюда,

$$\frac{K_o}{v} \cdot \int_o^{h_{\text{сл}}} S(\text{X}) d\text{X} = \frac{K_o}{v} \cdot S(X) \cdot h_{\text{сл}}. \qquad (1.8)$$

Дальнейшее преобразование позволили получить следующее уравнение:

$$\ln \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} = -\frac{1}{v} K_o \cdot S(\text{X}) \cdot h_{\text{сл}}. \qquad (1.9)$$

Тогда концентрацию озона на выходе из семенного материала можно определить по формуле

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} \cdot \exp[-\frac{K_o}{v} \cdot S(\text{X}) \cdot h_{\text{сл}}] \, . \qquad (1.10)$$

Интересны исследования по определению необходимой производительности озонаторной установки, которую можно определить по следующему выражению

$$\Phi = N_v \cdot C_{\text{вх}} = K_{t\varphi} \left(N_v \cdot \frac{C_{\text{вых}}}{exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h_{\text{сл}} \cdot \lambda \cdot \rho_{\text{оз}}}{\sqrt[4]{\frac{S(X)}{\pi}}} \cdot \frac{1}{R_{\text{зс}}} \right]} \right), \qquad (1.11)$$

где Ф – производительность озонаторной установки, *мг/ч*;

N_v – производительность вентилятора, $м^3/ч$;

λ – коэффициент сопротивления трения;

$\rho_{\text{оз}}$ – плотность озоновоздушной смеси, $кг/м^3$;

$R_{\text{зс}}$ – сопротивление зернового слоя, зависящее от морфологических свойств семян, *Па*;

L_0 и π – константы;

$K_{t\varphi}$ – эмпирический коэффициент.

Тогда эмпирический коэффициент, учитывающий снижение производительности озонатора при изменении температуры и влажности воздуха $K_{t\varphi}$, можно определить по формуле

$$K_{t\varphi} = (1 - 0{,}0077 \cdot T_{\text{воз}} - 0{,}008 \cdot \varphi_{\text{вп}}), \quad (1.12)$$

где $T_{\text{воз}}$ – температура воздушного потока, °С;

$\varphi_{\text{вп}}$ – влажность воздушного потока, %.

Стоит отметить, что нет конкретизации размерности большинства переменных, численных значений коэффициентов и констант. Следовательно, практическое применение данных зависимостей невозможно и требует дальнейших исследований о поведении озона в слое зерна.

Интересны теоретические исследования, направленные на распространение озона в слое зерна при его дезинфекции. Учёные Кубанского ГАУ предположили, что газ, поступающий в зерновой ворох, условно можно поделить на четыре части и представить в виде следующего уравнения баланса [63]:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (1.13)$$

где Q_0 – общее количество озона, подаваемого в ёмкость, *мг*;

Q_1 – количество озона, поглощаемого зерном, *мг*;

Q_2 – количество разлагаемого озона, *мг*;

Q_3 – количество озона, направленное на разложение токсинов, содержащихся в зерновом ворохе, *мг*;

Q_4 – остаточное количество озона, *мг*.

Для подтверждения теоретических предпосылок были проведены эксперименты, в которых измеряли концентрацию озона на входе и на выходе в зерновой материал. В результате исследований были получены аналитические зависимости, позволившие установить, что озоновоздушная смесь, проходя через слой зерна, меняет свои параметры. На входе концентрация озона больше, чем на выходе.

Следовательно, какое-то количество газа абсорбируется в зерне. Посредством программы «Advanced Grapher» для аппроксимации данных удалось определить приближённые значения баланса. В результате установлено, что для

насыщения одного килограмма озимой пшеницы озоном требуется 25,63 *мг* газа и еще 23,96 *мг* – для разложения токсинов. При этом рациональное время обработки составило 25 минут. Для насыщения озоном одного килограмма кукурузы требуется 10,59 *мг* озона, а для разложения токсинов – 8,96 мг газа при том же времени воздействия газа на зерно [63].

Исследования по изучению проникновения озона сквозь зерновой слой проводили учёные в Литовском сельскохозяйственном университете [140]. В результате установлено, что для продвижения озона по слою зерна требуется определённое время. Оно зависит от концентрации газа, времени обработки, скорости озоновоздушного потока, а также влажности зерна. С увеличением последнего взаимодействие озона с зерновкой становится продолжительнее. Происходит его поглощение. Стоит отметить тот факт, что чем дольше озон контактирует с зерном, тем активнее угнетается и сходит на нет жизнедеятельность неблагоприятных микроорганизмов и насекомых, находящихся на нём [140].

Была получена математическая модель, позволяющая определить влияние факторов на изменение концентрации озона в слое зерна, которое описывается уравнениями [140]:

$$C_{оз} = f(\mathrm{t}), \tag{1.14}$$

$$C = f(h), \tag{1.15}$$

$$C = f(C_0), \tag{1.16}$$

$$C = f(w_0), \tag{1.17}$$

где $C_{оз}$ – концентрация озона в насыпи зерна, *ppb*;

$f(t)$ – функция концентрации озона от времени, *ч*;

$f(h)$ – функция концентрации озона от высоты насыпи зерна, *см*;

$f(C_0)$ – функция концентрации озона от концентрации озона в приточном воздухе, *ppb*;

$f(w_0)$ – функция концентрации озона от влажности зерна перед сушкой, %.

Из вышеперечисленных факторов было составлено уравнение регрессии с четырьмя переменными факторами и двадцатью коэффициентами регрессии. Оно имело следующий вид:

$$C_{\text{оз.мод.}} = b_0 + b_1 t + b_2 h + b_3 C_0 + b_4 w_0 + b_5 (t \cdot h) + b_6 (t \cdot C_0) + b_7 (t \cdot w_0) + b_8 (h \cdot C_0) + b_9 (h \cdot w_0) + b_{10} (C_0 \cdot w_0) + b_{11} (t \cdot h \cdot C_0) + b_{12} (t \cdot h \cdot w_0) + b_{13} (t \cdot C_0 \cdot w_0) + b_{14} (h \cdot C_0 \cdot w_0) + b_{15} (t \cdot h \cdot C_0 \cdot w_0) + b_{16} t^2 + b_{17} h^2 + b_{18} C_0^2 + b_{19} w_0^2, \quad (1.18)$$

где $C_{\text{оз.мод.}}$ – концентрация озона модифицированная, *мг/м*^{3};

$b_0 \ldots b_{19}$ – коэффициенты регрессии.

Проверка значимости коэффициентов модели показала, что двенадцать из них являются незначительными. Поскольку коэффициенты уравнения регрессии не определены независимо друг от друга, а нерелевантные отсеиваются, значения остальных коэффициентов определяются повторно. Таким образом, был получен конечный вид уравнения регрессии с восьмью коэффициентами, которое имеет следующий вид:

$$C_{\text{оз.мод.}} = 543{,}8 + 0{,}92\, C_0 + 18{,}65\, \text{t} - 36{,}61\, w_0 - 11{,}27\, h - 0{,}185\, t^2 + 0{,}074\, t \cdot w_0 + 0{,}036\, h^2. \quad (1.19)$$

Анализ зависимости показал, что концентрация газа в любом месте зернового вороха увеличивается, если повышается время обработки и концентрация озона в приточном озоновоздушном потоке. С помощью данного выражения можно определить содержание озона при озонной обработке, а также влияние на данный параметр влажности зерна.

Таким образом, аналитические исследования позволили установить, что значение константы поглощения озона зависит от скорости озоновоздушного потока, концентрации газа на входе и на выходе из семенного материала, а также его площади и объёма. Также было выявлено, что для насыщения одного килограмма зерна озимой пшеницы озоном требуется 25,63 *мг* газа и еще 23,96 *мг* – для разложения токсинов. При этом рациональное время обработки составляет 25 минут. Для насыщения озоном одного килограмма зерна кукурузы требуется 10,59 *мг*

озона, а для разложения токсинов – 8,96 *мг* газа при том же времени воздействия газа. Установлено, что концентрация озона в любом месте зерновой насыпи увеличивается при увеличении времени обработки и концентрации газа в приточном озоновоздушном потоке. Однако остается неясным, как изменяется форма и размер очага распространения озона в зерновом слое при различном времени обработки. Следовательно, возникает необходимость дальнейших теоретических исследований о поведении озона в слое зерна.

1.6 Выводы по разделу

В результате аналитических исследований установлено, что:

- наиболее перспективным зернохранилищем являются металлические хранилища силосного типа с конусным дном, в которых обеспечивается полноценный контроль за состоянием семян и минимальные механические повреждения хранящегося зерна, а также есть возможность дальнейшего совершенствования путем создания регулируемой озоновоздушной среды, гарантирующей его сохранность.

- озонирование имеет ряд преимуществ, которые позволяют повысить энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян в среднем соответственно на 9 и 10%, увеличить содержание массовой доли белка зерна в среднем на 10%, а также положительно влияет на ряд других показателей качества зерна и семян различных сельскохозяйственных культур, что способствует увеличению урожайности до 14%;

- современное техническое оборудование позволит при проведении операции озонирования обеспечить предельно допустимый уровень концентрации озона (0,1 *мг/м*^{3}) без нанесения вреда жизни и здоровью человека при соблюдении техники безопасности при работе с газом;

- обзор теоретических исследований позволил выявить недостаток аналитических данных о распространении озона в зерновом слое, при этом остаются неизвестны размер и форма очага распространения озона в зерновом слое в зависимости от времени обработки.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ

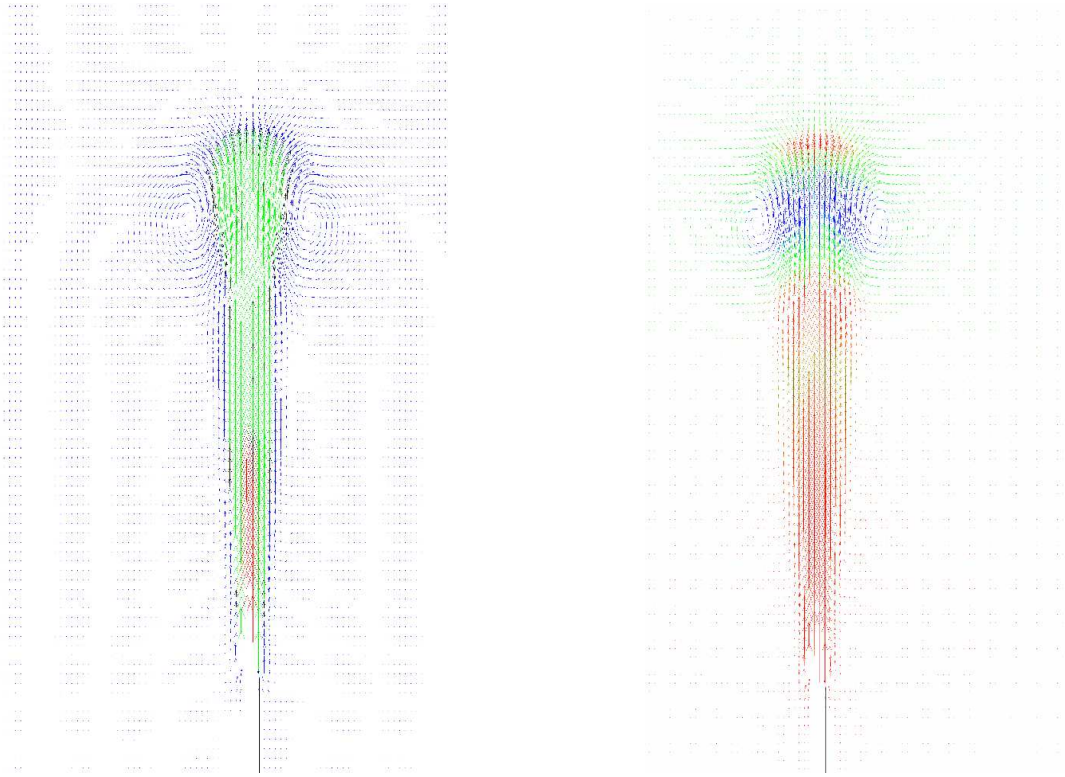
2.1 Теоретическое определение формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе

В последние годы в России наблюдается стабильной рост урожайности зерновых культур. Из-за этого увеличивается давление на отрасль сельского хозяйства, поскольку требуется большее количество современных зернохранилищ. Для того чтобы зерно при хранении не теряло своих свойств, необходимо своевременно и равномерно проводить его обработку. Совершенствование технологии 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, в том числе, на моделях цифровой гидродинамики. В настоящее время это позволяют сделать отечественное программные продукты FlowVision и его упрощённый аналог KompasFlow, входящие в состав пакета Компас 3D.

На начальном этапе исследовалось поведение озоновоздушной смеси при попадании в ёмкость с неподвижным воздухом. Момент начального распространения очага смеси позволяет получить понимание о форме и направлениях распространения озона с учётом сопротивления покоящегося воздуха. Наличие зерна или других частиц будет усугублять данный процесс.

Для проведения экспериментов в программе КОМПАС 3D была создана модель ёмкости, аналогичная экспериментальной, с размерами 300 х 300 х 400*мм*. Размеры были выбраны исходя из возможности дальнейшего экспериментального подтверждения и на основе предварительного анализа о возможности распространения смеси. В ёмкости был смоделирован трубопровод для подачи озона. Избыточное давление на входе было установлено 0,05 *МПа*. Это соответствует примерным значениям при проведении озонирования, которые в озонаторе и должны

превышать 0,15 *МПа*, а на входе в ёмкость для хранения, наиболее вероятно будут колебаться в пределах 0,05-0,15 *МПа*. Верхняя поверхность была свободной и создавала возможность выхода воздуха или озоновоздушной смеси при абсолютном давлении, соответствующем давлению окружающей среды. Графическое представление в векторной форме направлений и скорости завихрения озоновоздушной смеси при перемешивании с воздухом по результатам моделирования начального момента времени приведено на рис. 2.1.



а *б*

а – векторы скоростей потока, окрашенные в соответствии с изменением модуля скорости, *б* – векторы скоростей потока, окрашенные в соответствии с изменением давления

Рисунок 2.1 – Распространение озоновоздушной смеси в воздухе в начальный момент времени, полученное методами цифровой гидродинамики с использованием KompasFlow

При распространении озоновоздушной смеси в начальный момент времени создаётся зона повышенного давления, которая способствует разгону неподвижного воздуха. При этом движение воздуха осуществляется как в направлении движения смеси, так и по бокам очага. После начала движения картина постепен-

но меняется. Максимальная скорость наблюдается на выходе из подающего устройства, например форсунки, а по краям зоны распространения присутствуют завихрения с небольшими скоростями. В дальнейшем картина несколько меняется (рис. 2.1,*а*). Максимальная скорость наблюдается только в самом начале очага распространения, при этом, как видно на рисунке 2.1,*б*, происходит разрыв между зонами высокого давления. Давление в верхней части очага постепенно снижается, а средняя часть из-за наличия повышенного давления начинает расширяться. Появление дополнительного сопротивления, создаваемого зерновым ворохом, будет способствовать расширению средней части и движению воздуха в боковых направлениях.

Для более детального изучения этого вопроса в модель, имитирующую некоторую часть объёма бункера, были добавлены частицы, равные среднему диаметру зерна. Зёрна располагались на минимальном расстоянии без пересечения поверхностей. Это упростило возможность создания геометрии пространства, по которому протекает озоновоздушная смесь. Массив зерен был получен копированием и распространением по объёму, как показано на рисунке 2.2.

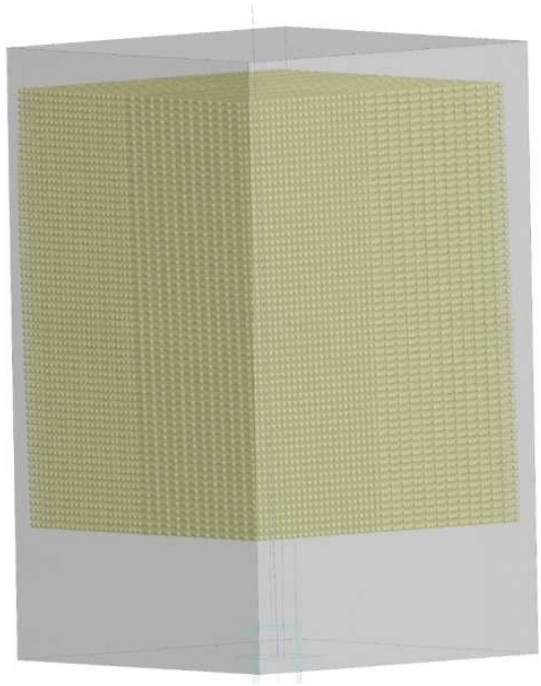


Рисунок 2.2 – 3D модель заполнения семенами бункера хранения в зоне распространения озона

Модель позволила получить распределение скоростей потока озоновоздушной смеси в слое зерна в векторной форме (рис. 2.3).

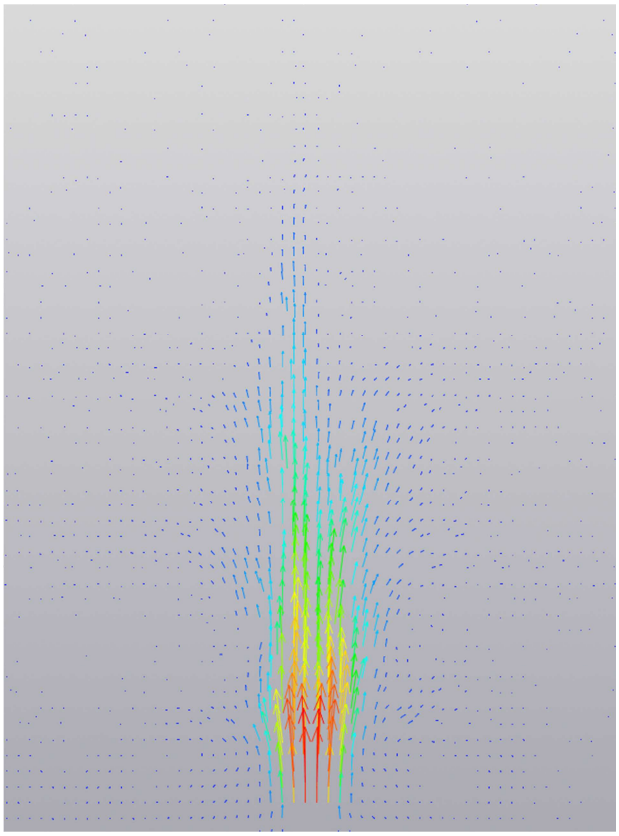


Рисунок 2.3 – Распределение скоростей потока озоновоздушной смеси в заполненном семенами бункере хранения

При распространении озона внутри зернового вороха газ движется за счёт давления воздуха, создаваемого компрессором. Поэтому при выходе из сопла озоновоздушная смесь в начальный момент времени направлена параллельно оси газовода. Газ, попадая в зерновой ворох, начинает его пронизывать через межзерновое воздушное пространство. При этом меньшая часть озона абсорбируется в зерне через межклеточные мембраны, а оставшаяся часть озоновоздушной смеси по законам диффузии ищет наименьшее сопротивление в зерновом слое и движется дальше. Причём газ распространяется как в направлении его подачи, так и за счёт обтекания зёрен расходится в стороны. 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 до молекул кислорода и протекания ряда химических реакций действие газа ослабевает. По мере дальнейшего отдаления от сопла зона распространения озона уменьшается и в конечном итоге исчезает. Следовательно, при вертикальной подаче озоновоздушной смеси и равномерном сопротивлении зернового вороха форма распространения озона должна быть близка к эллипсоиду. Несомненно, расположение зёрен хаотическое, поэтому межзерновое воздушное пространство формируется случайным образом. Однако при небольшом времени озонирования отклонение от оси подачи озоновоздушной смеси будет не столь значительным. Поэтому упрощенно можно принять зону расхождения газа в виде эллипсоида. Также стоит учесть, что озон образуется в озонаторе посредством электрического разряда и в процессе подачи воздуха нагревается компрессор. Это способствует повышению температуры озоновоздушной смеси, т.е. она теплее, чем окружающая среда. При подаче нагретого газа в зерновой ворох он будет стремиться вверх. Тем более в большинстве зернохранилищах имеются крышные воздухоотводы для удаления избыточного давления, что также способствует движению воздушных потоков снизу вверх.

Логично предположить, что при вертикальной подаче озоновоздушной смеси в зерновой ворох её скорость движения максимальна. Поэтому газ будет быстро проходить вверх через межзерновое пространство, лишь немногим увеличиваясь в диаметре. Максимальное расхождение зоны распространения озона по ширине будет наблюдаться в эпицентре, где его наибольшая концентрация. Чем большее время подаётся газ при неизменных параметрах озоновоздушной смеси, тем больше будет эллипсоид. Это слишком мало, чтобы изменить характер движения газового потока. Следовательно, озон будет двигаться в зерновой массе вместе с воздухом, практически так же, как двигался бы чистый воздух. Поэтому из-за малого объёма межзернового пространства и, как следствие, большого сопротивления озоновоздушному потоку эллипсоид со временем операции будет в большей степени увеличиваться в диаметре, нежели в высоту.

С целью получения модели, описывающей закономерность распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонной обработки, были проведены соответствующие теоретические исследования [90, 117]. Для определения объёма 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 относительного радиуса озонной обработки от относительной высоты и времени проведения операции представлены на рисунке 2.4.

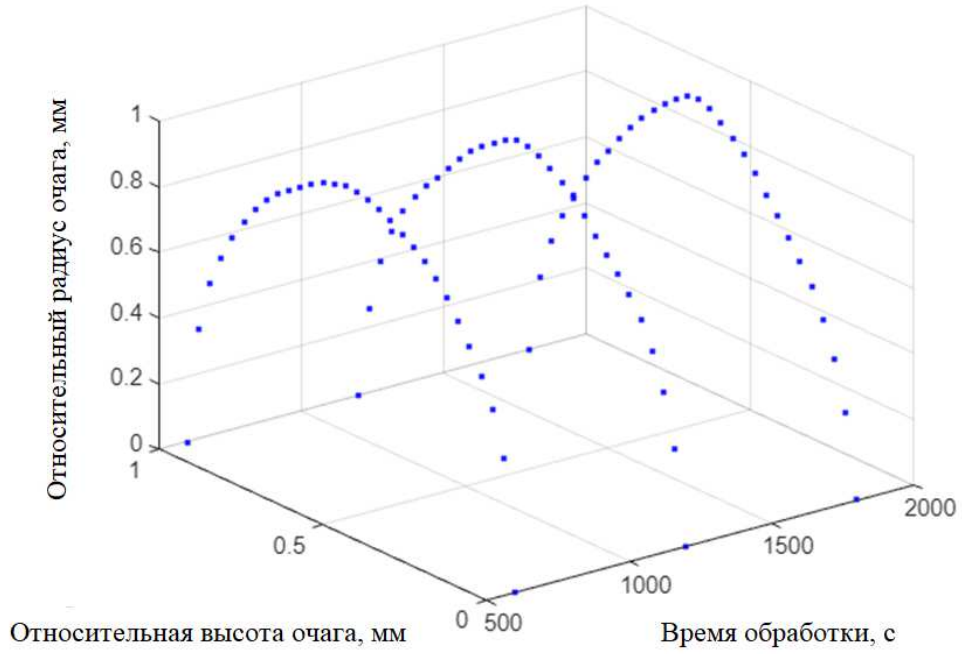


Рисунок 2.4 – Закономерность изменения относительного радиуса озонной обработки от относительной высоты и времени обработки

Для определения скорости озонирования необходимо знать зависимость объёма очага распространения озона от продолжительности озонирования. Удобно, если она будет описана как зависимость относительного радиуса от относительной высоты и времени обработки.

На основе неудачного поиска подходящих уравнений линейной и нелинейной регрессии было принято решения о поиске модели описания формы обработанного объема на основе Гауссовых процессов [143]. Однако данная методология

достаточно обширна и важно сделать правильный выбор в отношении видов функций ядра и их взаимосвязи. Следовательно, необходимо определиться с гиперпараметрами модели.

Подбор параметров модели осуществлялся на основе оптимизации Байеса в приложении Regression Learner из Statistics and Machine Learning Toolbox прикладного программного пакета Matlab [145]. По умолчанию приложение Регрессия Learner может выполнять настройку гиперпараметров с помощью байесовской оптимизации [142]. Цель байесовской оптимизации и оптимизации в целом – найти точку, которая минимизирует целевую функцию. В контексте настройки гиперпараметров в приложении точка представляет собой набор значений гиперпараметров, а целевая функция – это функция потерь или среднеквадратическая ошибка (MSE). В результате оптимизации было получено, наилучшее решение на основе экспоненциального ядра с автоматическим определением релевантности, описываемой зависимостью:

$$k\left(x_{i,}x_j\,|\theta\right) = \sigma_f^2 e^{-r}, \tag{2.1}$$

где k – ядро / ковариационной функции;

x_i, x_j – переменные;

θ – вектор параметризации;

$\sigma_f{}^2$ – дисперсия данных;

e – основание натурального логарифма;

r – показатель степени.

При этом показатель степени r рассчитывается по формуле

$$r = \sqrt{\sum_{m=1}^{d} \frac{(x_{jm} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}, \tag{2.2}$$

где d – количество описываемых участков;

m – номер точки на участке данных;

σ_m^2 – дисперсия данных на участке.

Тогда в общем виде функция ковариации будет выглядеть следующим образом:

$$k(x_{i,}x_j\,|\theta) = \sigma_f^2 e^{-\sqrt{\sum_{m=1}^{d}\frac{(x_{jm}-x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}}. \quad (2.3)$$

Полученные значения гиперпараметров позволили получить достаточно точную математическую модель регрессии на основе процессов Гаусса.

Для проверки корреляции предсказаний модели и исходных точек был проведен анализ на основе линейной регрессии целей и откликов модели, представленной на рисунке 2.5.

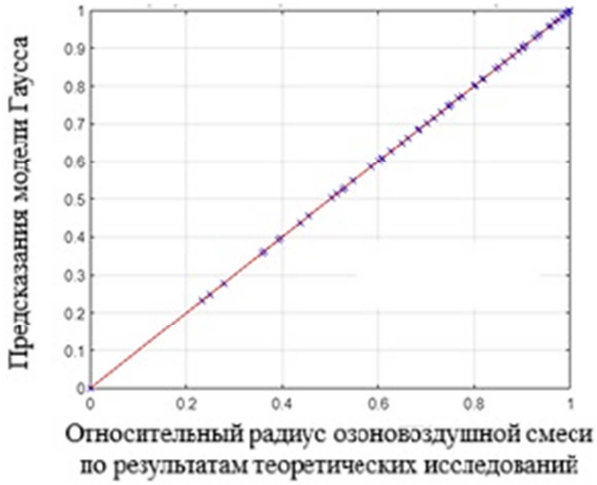
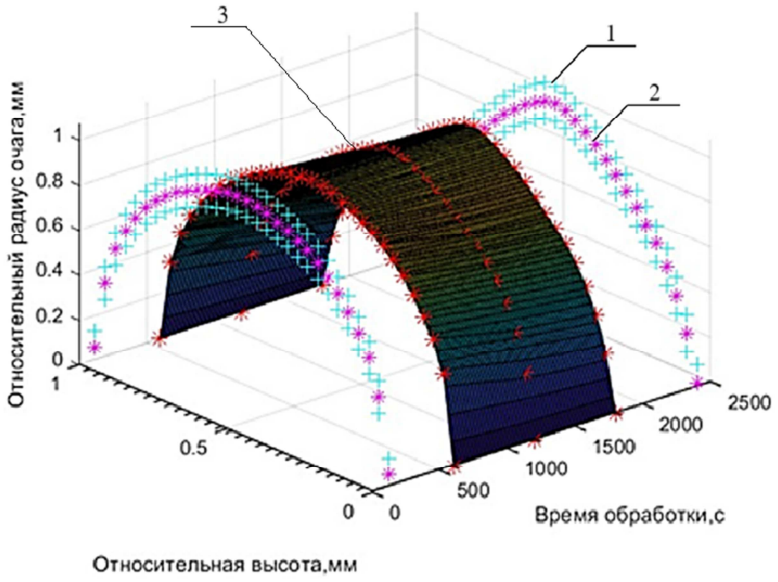


Рисунок 2.5 – Линейная регрессия, связывающая предсказания модели Гаусса и результатов теоретических исследований

Анализ рисунка 2.5 показал, что почти все точки лежат на одной прямой. Об этом свидетельствует и коэффициент детерминации R^2, который составил 0,99998. Полученная математическая модель позволяет в любом диапазоне значений оценить объём очага распространения озона в нормированных величинах в зависимости от времени обработки.

Полученная в MATLAB модель позволяет предсказывать значения и определять доверительный интервал в точке прогнозирования. Поверхность с точками на рисунке 2.6 позволяет оценить точность прогнозирования изменения объёма очага распространения озона при разном времени обработки. На графике приве-

дены результаты предсказаний при относительных величинах зоны расхождения озона до 40 минут обработки.



1 – 95% границы доверительного интервала; *2* – прогноз; *3* – форма очага распространения озона

Рисунок 2.6 – Общий вид формы распространения очага озона в зерновом ворохе с предсказаниями и доверительным интервалом

Анализ рисунка 2.6 показал, что вероятность ошибки в предсказаниях при озонной обработке зоны распространения озона в зерновом ворохе невелика, о чем свидетельствует узкий доверительный интервал. Следовательно, данная модель может быть использована для исследований по прогнозированию размера и объема очага воздействия газа на зерно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на данном этапе поставленная цель достигнута. Получена закономерность изменения очага распространения озона в зависимости от времени обработки, форма которого приближена к эллипсоиду, но имеет другое математическое описание в виде регрессии на основе гауссовых процессов. Полученная модель позволяет прогнозировать зону распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования. По результатам теоретических исследований получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614311, позволяющая прогнозировать зону распространения очага озоновоздушной смеси в зерновом ворохе [97].

2.2 Рационализация времени озонирования объёма зерна

Проведенные теоретические исследования с целью определения размера очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования позволили установить [117], что зона расхождения газа в зерне по форме приближена к эллипсоиду, но имеет несколько иное математическое описание, которое можно представить моделями на основе регрессии гауссовых процессов [143]. Однако интересна не только форма, но и реальный размер очага и его скорость распространения. Исходя из ранее полученных результатов как математических моделей в неявном виде, объём (V_o) обработанной поверхности зернового материала определяется интегрированием, которое можно представить в цилиндрической системе координат в виде следующего выражения:

$$V_o = \int_0^h \int_0^{2\pi} r(\varphi, h) \cdot d\varphi \cdot dh, \tag{2.4}$$

где V_o – объём 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:

$$V_o(t) = \int_0^{h_{max}(t)} 2 \cdot \pi \cdot \frac{\left(r_{max}(t) \cdot r_{отн}(h_{отн}, t)\right)^2}{2} dh, \tag{2.5}$$

где $r_{max}(t)$ – 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 [139] получена графическая зависимость изменения объёма обработанного озоном зерна от времени озонирования (рис. 2.7).

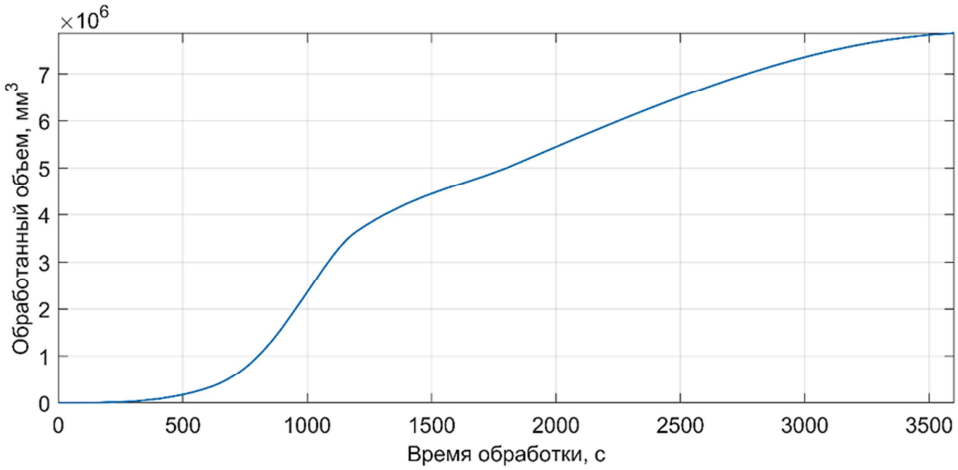


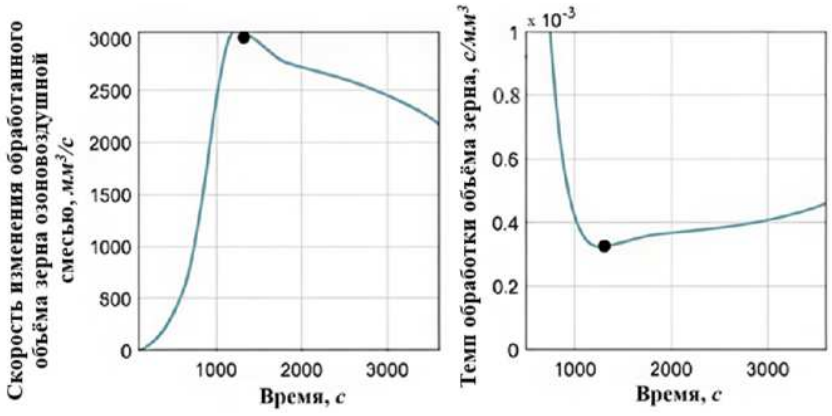
Рисунок 2.7 – Изменение объёма очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки

Анализ рисунка 2.7 показал, что он имеет точки перегиба. Следовательно, скорость изменения объёма обработанного озоном зерна в этих точках меняется. Поэтому она может быть критерием оптимизации.

Скорость изменения обработанного объёма зерна озоновоздушной смесью ν_V ($мм^3/с$) можно найти по формуле

$$\nu_V(t) = \frac{dV_o(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Изменение скорости и темпа обработки от времени, рассчитанная численными методами, показано на рисунке 2.8.



а *б*

Рисунок 2.8 – Скорость изменения обработанного объёма зерна озоновоздушной смесью (*а*) и темп обработки объёма зерна (*б*) в зависимости от времени озонирования

Как и ожидалось, на рисунке 2.8 видна точка максимальной скорости озонной обработки. Определение времени обработки зерна озоном с точки зрения наибольшей скорости изменения проозонированного объёма получено с помощью численных методов оптимизации [133]. Они в основном сводятся к поиску минимума. Максимум является обратной функцией. Эта методология позволяет определить локальные минимумы. Реализация предложенного алгоритма в соответствующей программе ЭВМ [97] позволила найти рациональный режим озонирования для конкретных условий.

Анализ результатов исследований показывает, что скорость обработки озоновоздушной смеси в зерновом ворохе растёт и в момент времени 1270 *с* достигает максимума – 3059 $мм^3/с$. Это означает, что в данный момент время обработки объёма зерна, в который поступила озоновоздушная смесь, рациональное. Далее он начинает постепенно снижаться. Увеличение объёма будет происходить, но не так интенсивно (рис. 3). Стоит отметить, что данное время обработки рационально для этого эксперимента. Можно предположить, что спад скорости роста объёма связан с тем, что происходит поглощение газа зерном в средних слоях. Нельзя утверждать, что распространение озона в зерновом ворохе будет происходить равномерно. ведь ближайшие к месту подачи слои получат большие дозы озонной обработки, чем более удалённые горизонты. Поэтому, вероятно, нет необходимости в дальнейшем увеличении обработанного объёма за счет повышения времени озонирования.

Таким образом, предложенный алгоритм оптимизации времени озонирования позволяет проводить обработку максимального объема зернового вороха за рациональное время 1270 *с*, обеспечивая наибольшую скоростью обработки – 3059 $мм^3/с$.

2.3 Обоснование параметров системы аэрации зернового вороха в зернохранилищах

Известны [115] исследования по изучению процесса поглощения озона зерновым ворохом. Однако для определения необходимой дозы обработки в случае,

если обработка проводится насыщением озоном бункера, а не проточным способом, необходимы уточнения с учетом условий протекания процессов.

Рассмотрим процесс озонирования в бункере при следующих условиях:

– при озонировании в бункере за некоторое время подается объём озоновоздушной смеси;

– в течение некоторого времени происходит распространение озоновоздушной смеси и её перемешивание с воздухом в бункере;

– одновременно с процессом озонирования происходит разложение озона.

Как показали эксперименты [15], время разложения озона в замкнутой ёмкости от концентрации 3,7 *мг/м*^{3} до 0,5 *мг/м*^{3} составляет около 9000 *с* или 2,5 *ч*. Максимальная скорость озонирования единицы объёма наблюдалась при времени обработки 1270 *с*. Это в 7 раз меньше времени разложения. Падение концентрации за это время составляет до 10%. В таких условиях процесс подачи можно считать достаточно быстрым с учетом разложения поступающего объема. На этапе подачи расчет конечной концентрации озона возможно выполнить, рассмотрев процесс поступления при наличии разложения газа. С одной стороны, уравнение имеет вид

$$\frac{dC_{\text{озр}}}{dt} = -\left(C_{\text{озр}}(t) \cdot \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} + v_{\text{кор}} \right), \qquad (2.7)$$

где $C_{\text{озр}}(t)$ – изменение концентрации (*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 при окончании процесса, *мг*/(*мм*^{3}·*с*).

С другой стороны, должен выполняться закон сохранения массы озона, который в дифференциальной форме выглядит в следующем виде

$$\frac{dm_{\text{озV}}}{dt} = \frac{dm_{\text{озр}}}{dt} + \frac{dm_{\text{озпод}}}{dt}, \qquad (2.8)$$

где $m_{озV}$ – масса озона в озонируемом объеме, *мг*;

$m_{озр}$ – масса разложившегося озона, *мг*;

$m_{озпод}$ – масса озона в поданной смеси, *мг*.

Производная по времени означает скорость процесса.

В качестве начального объема $V_б$ после насыщения имеет смысл рассматривать объем, полученный за время *t* [116].

В работе [122] было введено понятие коэффициента скважистости:

$$k_{скв} = V_{зм}/V_б, \quad (2.9)$$

где $k_{скв}$ – коэффициент скважистости зерна, %;

$V_{зм}$ – объем зерновой массы, *мм*^{3};

$V_б$ – объем бункера, *мм*^{3}.

Озонируемый объем межзернового пространства *V* (*мм*^{3}) в бункере связан с объемом бункера и коэффициентом скважистости:

$$V=V_б - V_{зм}, \quad (2.10)$$

учитывая (2.9), получим

$$V=V_б - k_{скв} \cdot V_б, \quad (2.11)$$

следовательно,

$$V=V_б \cdot (1-k_{скв}). \quad (2.12)$$

Если уравнение (2.8) разделит на *V*, то получим следующее уравнение:

$$\frac{dC_{озV}}{dt} = \frac{dC_{озр}}{dt} + \frac{dm_{озпод}}{V \cdot dt} = \frac{dC_{озр}}{dt} + \frac{dm_{озпод}}{V_б \cdot (1 - k_{скв})dt}, \quad (2.13)$$

где $C_{озV}$ – средняя концентрация по объему в процессе смешивания *мг/мм*^{3};

$C_{озр}$ – средняя концентрация по объёму озона при разложении, *мг/мм*^{3}.

Объем постоянен, так как является принятой конечной величиной, и в первых двух слагаемых *m/V* отражает концентрацию озона, а в третьем – скорость

наполнения объема. Если средняя концентрация на подаче известна $C_{\text{озпод}}$, то масса поданного озона

$$m_{\text{озпод}} = C_{\text{озпод}} \cdot Q_{\text{под}} \cdot t\,, \tag{2.14}$$

где $C_{\text{озпод}}$ – средняя концентрации озона на подаче, *мг/мм*^{3};

$Q_{\text{под}}$ – объемный расход озоновоздушной смеси, *м*^{3}*/с*.

Тогда за элементарный промежуток времени *dt* получим

$$dm_{\text{озпод}} = d \cdot \left(C_{\text{озпод}}(t) \cdot Q_{\text{под}}(t)t \right). \tag{2.15}$$

Если расход на подаче постоянен, при незначительных изменениях можно оперировать средним расходом за время наполнения, уравнение может быть упрощено, но в общем случае примет вид

$$\frac{dC_{\text{оз}V}}{dt} = \frac{dC_{\text{озр}}}{dt} + \frac{d \cdot \left(C_{\text{озпод}} \cdot Q_{\text{под}} t \right)}{V \cdot dt}, \tag{2.16}$$

и

$$\frac{dC_{\text{оз}V}}{dt} = \frac{dC_{\text{озр}}}{dt} + \frac{(C_{\text{озпод}} \cdot Q_{\text{под}}) + (C_{\text{озпод}} \cdot dQ_{\text{под}}) + (Q_{\text{под}} \cdot dC_{\text{озпод}})}{V}. \tag{2.17}$$

Параметр $\frac{dC_{\text{озр}}}{dt}$ может быть определен решением уравнения (2.7).

Последние два слагаемых достаточно малы, а при уменьшении шага интегрирования будут стремиться к 0. Следовательно, получаем следующий вид уравнения:

$$\frac{dC_{\text{оз}V}}{dt} = \frac{dC_{\text{озр}}}{dt} + \frac{C_{\text{озпод}} \cdot Q_{\text{под}}}{V}. \tag{2.18}$$

Тогда это соответствует квазипостоянной скорости наполнения в данный момент времени, но все величины, кроме *V*, в уравнении (2.17) меняются во времени.

Таким образом, имеем систему следующего вида:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dC_{озV}(t)}{dt} &= \frac{dC_{озр}(t)}{dt} + \frac{C_{озпод}(t)\cdot Q_{под}(t)}{V} \\ \frac{dC_{озр}(t)}{dt} &= -\left(C_{озр}(t)\cdot \frac{\left(1-e^{-K_{ор}(t_0+t)}\right)}{t_1} + v_{кор} \right) \end{aligned}\right\} \qquad (2.19)$$

или

$$\frac{dC_{озV}(t)}{dt} = -C_{озр}(t)\cdot \frac{\left(1-e^{-K_{ор}(t_0+t)}\right)}{t_1} - v_{кор} + \frac{C_{озпод}(t)\cdot Q_{под}(t)}{V_б\cdot(1-k_{скв})}. \qquad (2.20)$$

Решение данного уравнения для заданного времени наполнения, позволит найти концентрацию озона $C_{озV}$ в объеме *V*. Такая задача вполне решается численными методами.

Дальнейший процесс озонирования можно рассмотреть исходя из одновременной диффузии озона в зерновую массу и в прилегающие объемы. Исходными условиями будет концентрация озона $C_{озV}$ в объеме *V* и скорость диффузии в воздухе, то есть скорость распространения озона. В этом случае мы можем говорить о расширении объема и изменении концентрации.

Исходя из второго закона Фика, который имеет ту же математическую форму, что и уравнение теплопроводности, а его фундаментальное решение такое же, как у теплового ядра, за исключением переключения теплопроводности *k* с коэффициентом диффузии *D* ($м^2/с$), можно записать

$$C(x,t) = \frac{\rho_o \cdot \frac{V}{S_{пз}}}{\sqrt{4\cdot\pi\cdot D\cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4\cdot D\cdot t}}, \qquad (2.21)$$

где $S_{пз}$ – площадь поверхности зерновки, $мм^3$;

ρ_o – парциальная плотность озона, $мг/м^3$.

Тогда концентрация в месте подачи озоновоздушной смеси при $x = 0$ будет получена из следующего уравнения:

$$C(t) = \frac{\rho_{\text{о}} \cdot \frac{V}{S_{\text{пз}}}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D \cdot t}}. \qquad (2.22)$$

Следовательно, скорость распространения озона, скорость изменения концентрации озона в воздухе вдоль координаты *x*, если процесс квазистационарный имеют вид

$$v_{\text{д}} = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}, \qquad (2.23)$$

где $v_{\text{д}}$ – скорость диффузии озона, *мг/(см*^{2}*)*.

Если

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{V \cdot \rho \cdot x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{4 \cdot D \cdot S_{\text{пз}} \cdot t \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D \cdot t}}, \qquad (2.24)$$

то

$$v_{\text{д}} = D \cdot \frac{V \cdot \rho \cdot x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{4 \cdot D \cdot S_{\text{пз}} \cdot t \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D \cdot t}} = \frac{\rho \cdot \frac{V}{S_{\text{пз}}} \cdot x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{2t \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot D \cdot t}} = \frac{\rho \cdot \frac{V}{S_{\text{пз}}}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D \cdot t}} \cdot \frac{x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t} = C(t) \cdot \frac{x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t}. \qquad (2.25)$$

Окончательно

$$v_{\text{д}}(x,t) = C(t) \cdot \frac{x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t}. \qquad (2.26)$$

Скорость диффузии в некоторую произвольную точку, равноудаленную от двух форсунок с одинаковыми начальными концентрациями, будет равна сумме скоростей от двух форсунок. Тогда уравнение примет вид

$$v_{\text{д}}(x,t) = 2 \cdot C(t) \cdot \frac{x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t} = C(t) \cdot \frac{x \cdot \text{e}^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{t}. \qquad (2.27)$$

При этом, если точка лежит на линии, соединяющей форсунки, расположенные на расстоянии l (*мм*), то $x=l/2$, получим

$$v_{д}(t) = C(t) \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t}. \qquad (2.28)$$

Скорость будет равна *0*, если концентрация озона выровняется по всей длине пути, и в данном варианте записи процесс бесконечный. При этом сложно оценить изменение концентрации озона у форсунки, если процесс подачи смеси прекращается.

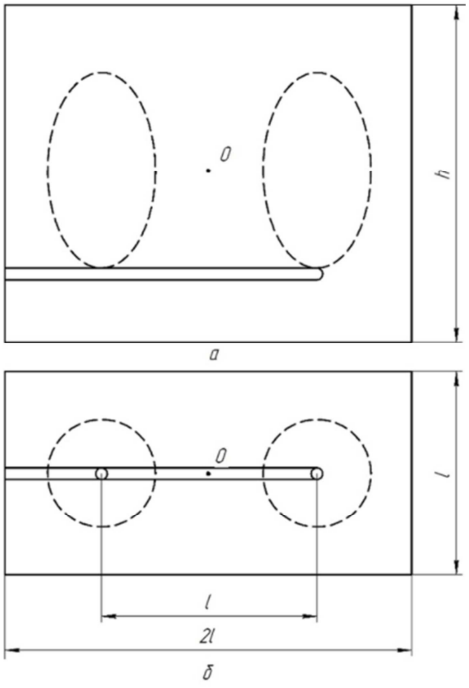
Если озон распространяется во всех направлениях равномерно, что соответствует процессу озонирования в бункере после прекращения подачи, то можно рассматривать очаг как эллипсоид с максимальной концентрацией в центре, из которого идет диффузия. Процесс прекращается в момент выравнивания концентраций. При этом, если не учитывать разложение озона, что возможно при его низкой скорости разложения относительно скорости диффузии в свободном воздушном пространстве или со сравнительно небольшим сопротивлением. В целом кроме диффузии будет иметь место и перемешивание, вызванное подачей смеси. Так как скорость определяется коэффициентом диффузии D, возможно учесть дополнительную скорость перемешивания как дополнение к D. Однако закон гидравлического перемешивания будет отличаться, поэтому лучше примем гидравлическую составляющую как величину, подчиняющуюся законам механики сжимаемых жидкостей, и обозначим $v_{г}$. Тогда скорость с перемешиванием получим в виде

$$v_{д}(t) = C_{озр}(t) \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t} + v_{г}(t). \qquad (2.29)$$

Важным является факт того, что концентрация $C(t)$ меняется во времени и в момент окончания перемешивания ее можно определить.

При озонировании в зернохранилище можно рассмотреть некоторый объем, в который поступает озоновоздушная смесь из двух форсунок. Они расположены таким образом, что расстояние между ними l (рис. 2.9), а расстояние от форсунок до стенок ёмкости $l/2$ (*мм*).

Как было установлено ранее, озоновоздушная смесь распространяется в форме эллипсоида, на рисунке 2.9 показано пунктиром.



а – фронтальный вид; *б* – вид сверху; h_o – высота объёма, в который поступает озоновоздушная смесь из двух форсунок, *мм*

Рисунок 2.9 – Схема размещения двух форсунок подачи озоновоздушной смеси

За время подачи в ёмкость из каждой форсунки попадет объём озоновоздушной смеси $V_{\text{п}}$ ($мм^3$) со средней концентрацией подачи $C_{\text{озпод}}$. Достаточно просто можно рассчитать массу поданного озона $m_{\text{п}}$ (*мг*):

$$m_{\text{п}} = C_{\text{озпод}} \cdot 2 \cdot V_{\text{п}} . \qquad (2.30)$$

На рис. 2.9 показана схема для равномерного размещения форсунок, когда за каждой форсункой условно закреплен обрабатываемый объем семян. Так как

распространение газа происходит во всех направлениях, через некоторое время весь объем должен быть заполнен, а концентрация озона выровняется. То есть содержание озона в озоновоздушной смеси после выравнивания может быть определено из следующей зависимости:

$$C_{к} = \frac{m_{п}}{2 \cdot l^2 \cdot h_{о} \cdot (1 - k_{скв})} = \frac{C_{озпод} \cdot 2 \cdot V_{п}}{2 \cdot l^2 \cdot h_{о} \cdot (1 - k_{скв})}. \quad (2.31)$$

Если рассматривать точку О (рис. 2.9), то концентрация озона в ней будет меняться от *0* до $C_{к}$, а скорость изменения по уравнению (2.28) от максимума до *0*. Следовательно, максимальная скорость в момент времени $t = 0$, пока нет гидравлической составляющей, имеет вид:

$$v_{д\max} = C_{озпод} \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t}}}{2 \cdot t}. \quad (2.32)$$

При подстановке имеем неопределенность *0/0*. Которая в пределе справа стремится к *0*, а слева к $-\infty$.

Для решения рассмотрим процесс в начале подачи. В течении одной секунды концентрация в точке О существенно не изменится, и уравнение (2.30) останется верным. Для времени в одну секунду уравнение будет иметь вид:

$$v'_{д\max} = C_{озпод} \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D}}}{2}. \quad (2.33)$$

Через время $t_{к}$ (*с*) выравнивания концентраций получим

$$C_{к} \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{к}}}}{2 \cdot t_{к}} = 0. \quad (2.34)$$

Тогда,

$$\frac{C_{озпод} \cdot 2 \cdot V_{п}}{2 \cdot l^2 \cdot h_{о} \cdot (1 - k_{скв})} \cdot \frac{l \cdot e^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{к}}}}{2 \cdot t_{к}} = 0. \quad (2.35)$$

В таком случае время выравнивания концентраций стремиться к ∞. Если принять, что фактическое выравнивание концентраций будет заканчиваться при достижении скорости разложения, то, приравняв скорости с учетом расстояния, получим следующий вид уравнения:

$$\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{2 \cdot l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \frac{l \cdot \text{e}^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{t_{\text{к}}} = -\left(C(t) \cdot \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}(t + t_0)}\right)}{t_1} + v_{\text{кор}} \right) \cdot l \,. \tag{2.36}$$

Так как в момент времени $t_{\text{к}}$ достигается концентрация $C_{\text{к}}$, то уравнение примет вид

$$\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \frac{l \cdot \text{e}^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{2 \cdot t_{\text{к}}} = -\left(\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \frac{l \cdot \left(1 - e^{-K_{\text{ор}} \cdot t_{\text{к}}}\right)}{t_1} + v_{\text{кор}} \cdot l \right) \tag{2.37}$$

и

$$\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \left(\frac{l \cdot \text{e}^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{2 \cdot t_{\text{к}}} + \frac{l \cdot \left(1 - e^{-K_{\text{ор}} \cdot t_{\text{к}}}\right)}{t_1} \right) + v_{\text{кор}} \cdot l = 0 \,. \tag{2.38}$$

При наличии гидравлической составляющей следует учитывать скорость перемешивания $v_{\text{г}}$ ($мм^3/с$). Тогда получим уравнение

$$\frac{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}}}{l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}})} \cdot \left(\frac{l \cdot \text{e}^{-\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{2 \cdot t_{\text{к}}} + \frac{l \cdot \left(1 - e^{-K_{\text{ор}} \cdot t_{\text{к}}}\right)}{t_1} \right) - v_{\text{г}} + v_{\text{кор}} \cdot l = 0 \,. \tag{2.39}$$

Решить данное уравнение относительно $t_{\text{к}}$ в общем виде достаточно сложно, но решение может быть найдено численно. Значительное влияние на решение будет оказывать гидравлическая составляющая. Фактически это скорость распространения объема озоновоздушной смеси в зерновой массе с учетом затухания в местных сопротивлениях.

Уравнение (2.39) получено из условия, что одна форсунка обрабатывает объём

$$V_{\text{обр}} = l^2 \cdot h_{\text{о}} \cdot (1 - k_{\text{скв}}), \tag{2.40}$$

где $V_{\text{обр}}$ – объём, обрабатываемый одной форсункой, *мм*^{3}.

В таком случае отношение объёма силоса $V_{\text{сил}}$ к объёму, обрабатываемому одной форсункой (2.40), определяет их количество для всего зернохранилища:

$$N_{\text{ф}} = \frac{V_{\text{сил}} \cdot \left(v_{\Gamma} - l \cdot v_{\text{кор}} \right)}{C_{\text{озпод}} \cdot V_{\text{п}} \cdot \left(\frac{l \cdot \mathrm{e}^{\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{2 \cdot t_{\text{к}}} - \frac{l \cdot \left(\mathrm{e}^{K_{\text{ор}}(t_0 + t_{\text{к}})} - 1 \right)}{t_1} \right)}, \tag{2.41}$$

где N_{Φ} – количество форсунок, *шт*;

$V_{\text{сил}}$ – объём зернохранилища, *м*^{3}.

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

2.4 Имитационная модель пневматической системы аэрации озоновоздушной смесью зернохранилища

Процесс обработки озоновоздушной смесью достаточно сложный. При попадании озона в зерновой ворох, как уже было показано ранее, распространение по объёму происходит согласно случайному расположению зёрен. Более того, средняя часть условного эллипсоида может насыщаться озоном в больших количествах, что может привести к ухудшению состояния семян и снижению их всхожести. Поэтому важно подать строго необходимую дозу озона в замкнутое про-

странство зернохранилища. Это исключительно техническая задача может быть решена с помощью имитационного моделирования пневматической системы зернохранилища [134]. Такая модель была создана при выполнении работы [98, 99, 100].

Имитационная модель разрабатывалась с использованием систем автоматизированного моделирования Matlab Simulink, в том числе с помощью набора инструментов Simscape. Системная модель пневматической системы озонирования семян в бункере состоит из подсистем нагнетания, управления и распределения. В модели использовались известные и наиболее широко используемые при моделировании уравнения динамики. Для их решения применялись численные методы решения дифференциальных и алгебраических уравнений. Общая схема системной модели показана на рисунке 2.10.

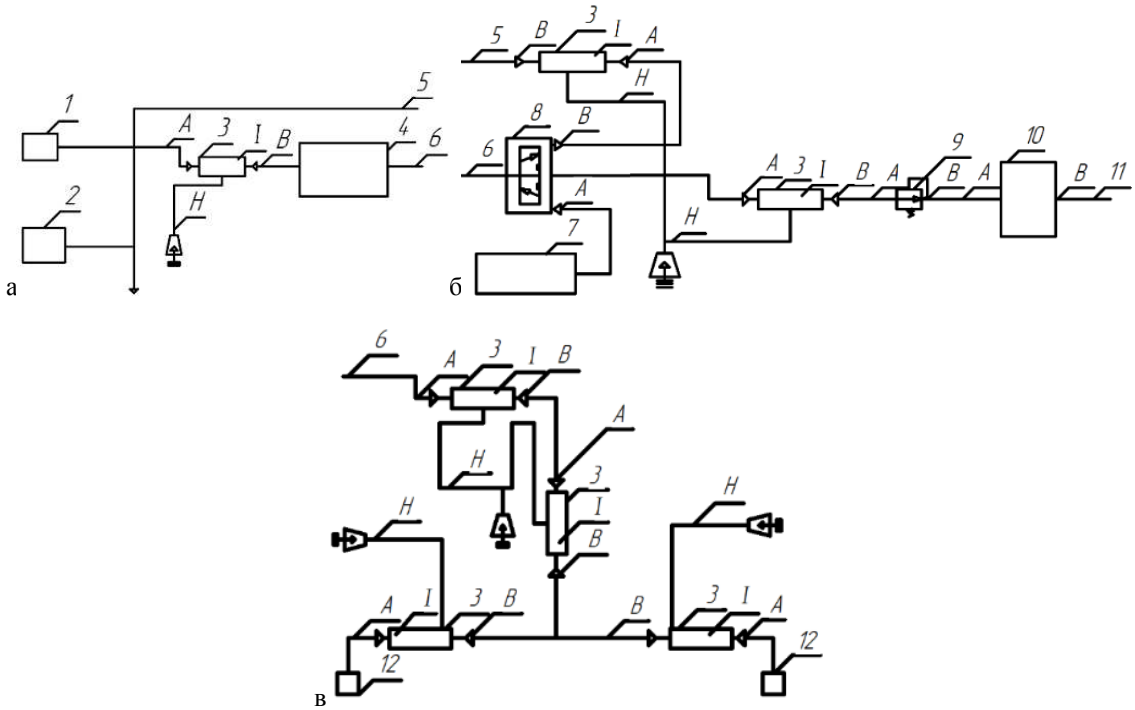
а – подсистема подачи; *б* – подсистема управления; *в* – подсистема распределения

Рисунок 2.10 – Общая схема пневматической системы нагнетания озоновоздушной смеси

Подсистема подачи (рис. 2.11,*а*) состоит из блока свойств газа *1*, в котором определяются параметры газа, конфигурации решателя *2*, задающего условия моделирования и методы решения систем уравнений, компрессора *4*, который подает под давлением атмосферный воздух в канал подачи *6*, газовода *3*, соединяющего окружающую среду с компрессором, канала сброса *5* и подачи *6*, через которые поток воздуха сбрасывается в атмосферу или направляется в систему аэрации через подсистему управления. В модели предполагалось, что дополнительные источники тепла отсутствуют и трубопроводы обеспечивают теплообмен с окружающей средой, температура которой задавалась для всех трубопроводов одинаковой.

Поток атмосферного воздуха через канал подачи *6* попадает в подсистему управления (рис. 2.11,*б*), которая включает в себя золотник *8*, блок управление золотником *7*, при помощи которого изменяется направление движения потока воздуха, редукционный клапан *9*, стабилизирующий давление воздушного потока перед подачей к озонатору *10*, в котором происходит насыщение атмосферного воздуха озоном, канал *11*, соединяющийся с системой распределение озоновоздушной смеси.

Подсистема распределения (рис. 2.11,*в*) состоит из газоводов *3* и форсунок *12*, распыляющих озоновоздушную смесь в зерновой ворох.



а – подсистема подачи; *б* – подсистема управления; *в* – подсистема распределения; *A* – место входа воздуха или озоновоздушной смеси в газовод; *B* – место выхода воздуха или озоновоздушной смеси из газовода; *H* – место присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах; *I* – внутренняя полость газовода; *1* – блок, описывающий свойство газа; *2* – конфигурация решателя; *3* – газовод; *4* – компрессор, *5* – канал сброса; *6* – канал подачи; *7* – управление золотником; *8* – золотник; *9* – редукционный клапан; *10* – озонатор; *11* – канал, соединяющийся с системой распределение; *12* – форсунка

Рисунок 2.11 – Упрощенная схема пневматической системы аэрации озоновоздушной смесью зернохранилища

Моделирование потока газа в трубопроводе осуществлялось по следующим уравнениям, известным из теории механики жидкостей [135, 148].

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

$$\frac{\partial M}{\partial p}\cdot\frac{dp_I}{dt}+\frac{\partial M}{\partial T}\cdot\frac{dT_I}{dt}=\dot{m}_A+\ \dot{m}_B, \qquad (2.42)$$

где $\frac{\partial M}{\partial p}$ – частная производная массы газа по давлению при постоянных температуре и объеме;

$\frac{\partial M}{\partial T}$ – 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 (*А)* и выхода (*В)* воздуха или озоновоздушной смеси из газовода, *кг/с*.

Расход принимает положительное значение, когда он втекает в трубопровод.

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

$$\frac{\partial U}{\partial p}\cdot\frac{dp_I}{dt}+\frac{\partial U}{\partial T}\cdot\frac{dT_I}{dt}=\Phi_A+\ \Phi_B+Q_H, \qquad (2.43)$$

где $\frac{\partial U}{\partial p}$ – частная производная внутренней энергии объема газа по давлению при постоянных температуре и объёме, *Дж/м*^{3};

$\frac{\partial U}{\partial T}$ – частная производная внутренней энергии объёма 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 озоновоздушной смеси из газовода, *Дж/с*;

Q_H – тепловой поток в месте присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах (*H*), *Дж/с*.

При моделировании использовались модели совершенного и полуидеального газа. Частные производные массы *M* и внутренней энергии *U* объема газа по давлению и температуре при постоянном объеме зависят от модели свойств газа. Для моделей идеального и полуидеального газа уравнения имеют вид

$$\frac{\partial M}{\partial p}=V_{\text{г}}\cdot\frac{\rho_I}{p_I},\quad \frac{\partial M}{\partial T}=-V_{\text{г}}\cdot\frac{\rho_I}{T_I},\quad \frac{\partial U}{\partial p}=V_{\text{г}}\cdot\left(\frac{h_I}{Z\cdot R\cdot T_I}-1\right),\quad \frac{\partial U}{\partial T}=V_{\text{г}}\cdot\rho_I\cdot\left(c_{pI}-\frac{h_I}{T_I}\right), \tag{2.44}$$

где ρ_I – плотность объема газа *кг/м*^{3};

$V_{\text{г}}$ – объем газа, *м*^{3};

h_I – удельная энтальпия объема газа, *Дж/кг*;

Z – коэффициент сжимаемости;

R – удельная газовая постоянная, *Дж/(кг·К)*;

c_{pI} – удельная теплоёмкость при постоянном давлении объёма газа, *Дж/(кг·К)*.

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

$$\left.\begin{aligned} p_A-p_I&=\left(\frac{\dot m_A}{S_{\text{тр}}}\right)^2\left(\frac{1}{\rho_I}-\frac{1}{\rho_A}\right)+\Delta p_{AI}\\ p_B-p_I&=\left(\frac{\dot m_B}{S_{\text{тр}}}\right)^2\left(\frac{1}{\rho_I}-\frac{1}{\rho_B}\right)+\Delta p_{BI}\end{aligned}\right\}, \tag{2.45}$$

где p – давление газа в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси из газовода или внутренней полости газовода (*I*), *Па*;

ρ – плотность в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси из газовода или внутренней полости газовода (*I*), *кг/м*^{3};

$S_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубы, *мм*^{2};

Δp_{AI} и Δp_{BI} – потери давления из-за вязкого трения, *Па*.

Тепло, переданное стенке трубы через место присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах (*H*), добавляется к энергии объема газа, представленного внутренней полостью, через уравнение сохранения энергии (2.43). Поэтому балансы импульса для каждой половины трубы, между местом входа воздуха или озоновоздушной смеси в газовод (*A*) и внутренней полости газовода (*I*), и между местом выхода воздуха или озоновоздушной смеси из газовода (*B*) и внутренней полости газовода (*I*), подчиняются адиабатным процессам

$$\left.\begin{aligned} h_A + \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\dot{m}_A}{\rho_A \cdot S_{\text{тр}}}\right)^2 &= h_I + \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\dot{m}_A}{\rho_I \cdot S_{\text{тр}}}\right)^2 \\ h_B + \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\dot{m}_B}{\rho_B \cdot S_{\text{тр}}}\right)^2 &= h_I + \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\dot{m}_B}{\rho_I \cdot S_{\text{тр}}}\right)^2 \end{aligned}\right\}, \tag{2.46}$$

где h – удельная энтальпия в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси из газовода или внутренней полости газовода (*I*), *Дж/кг*.

Потери давления из-за вязкого трения Δp_{AI} и Δp_{BI} зависят от режима течения, который определяется числом Рейнольдса. Числа Рейнольдса для каждой половины трубы определяются как

$$\text{Re}_A = \frac{\left|\dot{m}_A\right| \cdot D_{\text{Г}}}{S_{\text{тр}} \cdot \mu_I}, \quad \text{Re}_B = \frac{\left|\dot{m}_B\right| \cdot D_{\text{Г}}}{S_{\text{тр}} \cdot \mu_I}, \tag{2.47}$$

где R_{e_A} – число Рейнольдса в месте входа воздуха или озоновоздушной смеси (*A)* в газовод;

R_{e_B} – число Рейнольдса в месте выхода воздуха или озоновоздушной смеси (*B)* из газовода;

$D_{\text{Г}}$ – гидравлический диаметр трубы, *м*;

μ_I – динамическая вязкость во внутреннем узле, *Па˙с*.

Если число Рейнольдса меньше нижнего граничного значения, то поток находится в режиме ламинарного течения. Если число Рейнольдса больше верхней границы, то поток находится в режиме турбулентного течения.

В ламинарном режиме течения потери давления за счет вязкого трения определяются по формуле

$$\left.\begin{aligned}\Delta p_{AI_{\text{лам}}} &= f_{\text{форм}} \cdot \frac{\dot{m}_A \cdot \mu_I}{2 \cdot \rho_I \cdot D_h^2 \cdot S_{\text{тр}}} \cdot \frac{L + L_{\text{экв}}}{2} \\ \Delta p_{BI_{\text{лам}}} &= f_{\text{форм}} \cdot \frac{\dot{m}_B \cdot \mu_I}{2 \cdot \rho_I \cdot D_h^2 \cdot S_{\text{тр}}} \cdot \frac{L + L_{\text{экв}}}{2}\end{aligned}\right\}, \tag{2.48}$$

где $f_{\text{форм}}$ – коэффициент формы;

L– длина трубопроводов, *м*;

$L_{\text{экв}}$ – значение совокупной эквивалентной длины местных сопротивлений, *м*.

В турбулентном режиме течения потери давления за счет вязкого трения составляют

$$\left.\begin{aligned}\Delta p_{AI_{\text{турв}}} &= f_{\text{D}_A} \cdot \frac{\dot{m}_A \cdot \left|\dot{m}_A\right|}{2 \cdot \rho_I \cdot D_h \cdot S_{\text{тр}}^{\ 2}} \cdot \frac{L + L_{\text{экв}}}{2} \\ \Delta p_{BI_{турв}} &= f_{\text{D}_B} \cdot \frac{\dot{m}_B \cdot \left|\dot{m}_B\right|}{2 \cdot \rho_I \cdot D_h \cdot S_{\text{тр}}^{\ 2}} \cdot \frac{L + L_{\text{экв}}}{2}\end{aligned}\right\}, \tag{2.49}$$

где f_{D} – коэффициент трения Дарси в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси из газовода.

Коэффициенты трения Дарси вычисляются на основе корреляции Хааланда

$$\left.\begin{aligned}f_{\text{D}_A} &= \left[-1{,}8 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{6{,}9}{\text{Re}_A} + \left(\frac{\varepsilon_{\text{шер}}}{3{,}7 \cdot D_{\Gamma}}\right)^{1.11}\right)\right]^{-2} \\ f_{\text{D}_B} &= \left[-1{,}8 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{6.9}{\text{Re}_B} + \left(\frac{\varepsilon_{\text{шер}}}{3{,}7 \cdot D_{\Gamma}}\right)^{1.11}\right)\right]^{-2}\end{aligned}\right\}, \tag{2.50}$$

где $\varepsilon_{\text{шер}}$ – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы, *мм*.

Если число Рейнольдса находится между верхним и нижним пределами, то поток находится в переходном состоянии между ламинарным и турбулентным

режимом. Потери давления из-за вязкого трения в переходной области определяются плавным переходом от потерь в режиме ламинарного потока к потерям в режиме турбулентного потока.

Наличие постоянной температуры на стенке трубы и изменение температуры при динамически изменяющемся давлении потока приводит к теплообмену, который в первом приближении носит конвективный характер. Этого достаточно для практической точности расчетов.

Уравнение конвективного теплопереноса между стенкой трубы и внутренним объемом газа в модели имеет вид

$$Q_H = Q_{\text{конв}} + \frac{k_I \cdot S_{\text{пов}}}{D_{\text{Г}}} \cdot \left(T_H - T_I\right), \tag{2.51}$$

где Q_H – общее количество теплоты при теплообмене, *Дж*;

$Q_{\text{конв}}$ – количество теплоты при конвективном теплообмене, *Дж*;

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности трубы, *мм*^{2};

T_H – температура стенки трубы при теплообмене, *К*.

Предполагается экспоненциальное распределение температуры вдоль трубы. В таком случае количество теплоты при конвективном теплообмене равно

$$Q_{\text{конв}} = \left|\dot{m}_{\text{ср}}\right| \cdot c_{p_{\text{ср}}} \cdot \left(T_H - T_{\text{вх}}\right) \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{h_{\text{коэф}} \cdot S_{\text{пов}}}{\left|\dot{m}_{\text{ср}}\right| \cdot c_{p_{\text{ср}}}}\right)}\right), \tag{2.52}$$

где $T_{\text{вх}}$ – температура на входе в зависимости от направления потока, *К*;

$c_{p_{\text{ср}}}$ – удельная теплоёмкость газа, измеренная при средней температуре, *Дж/(кг·К)*;

$\dot{m}_{\text{ср}}$ – средний массовый расход озоновоздушной смеси из места входа (*А*) в место выхода (*В*), определяемый по формуле $\dot{m}_{\text{ср}} = \left(\dot{m}_A - \dot{m}_B\right)/2$, *кг/с*.

Коэффициент теплопередачи $h_{\text{коэф}}$ зависит от числа Нуссельта

$$h_{\text{коэф}} = \text{Nu} \cdot \frac{k_{\text{ср}}}{D_{\text{Г}}}, \tag{2.53}$$

где $k_{\text{ср}}$ – теплопроводность, рассчитанная при средней температуре, *Вт/(м·К)*.

Число Нуссельта зависит от режима течения. Число Нуссельта в ламинарном режиме течения постоянно. В турбулентном режиме оно вычислялось из корреляции Гнелинского:

$$\text{Nu}_{\text{турб}} = \frac{\frac{f_{\text{D}}}{8} \cdot \left(\text{Re}_{\text{ср}} - 1000\right) \cdot \text{Pr}_{\text{ср}}}{1 + 12{,}7\sqrt{\frac{f_{\text{D}}}{8}} \cdot \left(\text{Pr}_{\text{ср}}^{2/3} - 1\right)}, \tag{2.54}$$

где $\text{Pr}_{\text{ср}}$ – число Прандтля, рассчитанное при средней температуре.

Среднее число Рейнольдса равно

$$\text{Re}_{\text{ср}} = \frac{\left|\dot{m}_{\text{ср}}\right| \cdot D_{\text{Г}}}{S \cdot \mu_{\text{ср}}}, \tag{2.55}$$

где $\mu_{\text{ср}}$ – динамическая вязкость, оцененная при средней температуре, *Па·с*.

Когда среднее число Рейнольдса находится между верхним и нижним пределами на границах ламинарного и турбулентного потока, число Нуссельта определяется плавной интерполяцией между ламинарными и турбулентными значениями.

Предохранительный клапан моделировался как отверстие, которое открывается при определенном входном давлении и не допускает достижения экстремальных значений. При нормальном давлении клапан закрыт и выпускает только поток утечки. Площадь отверстия увеличивается с увеличением давления на входе до максимального значения. Это приводит к полному открытию клапана. Дальше снижения наблюдаться не будет. Моделирование осуществлялось только в дозвуковой области.

Входное давление является сигналом управления клапаном. Чем больше входное давление превышает заданное, тем больше становится площадь открытия клапана. Доля открытия клапана $\hat{p}$ определяется как

$$\hat{p} = \frac{p_A - p_0 - p_{\text{зад}}}{\Delta p}, \tag{2.56}$$

где p_A – абсолютное давление в месте входа воздуха или озоновоздушной смеси в газовод (*A*), *Па*;

p_0 – атмосферное давление, *Па*;

$p_{\text{зад}}$ – заданное манометрическое давление срабатывания, *Па*;

Δp – диапазон регулирования давления, *Па*.

При моделировании базовые уравнения баланса массы (2.42) и энергии (2.43) для клапана с учетом малого объема, которым можно пренебречь, принимают следующий вид:

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = 0, \tag{2.57}$$

$$\Phi_A + \Phi_B = 0. \tag{2.58}$$

Учитывая возможные значительные скорости истечения при сбросе давления, процесс истечения через клапан рассчитывался на основе уравнения известного как уравнение Сен-Венана [134]. В этом случае массовый расход

$$\dot{m} = C_{\text{ист}} \cdot S_{\text{кл}} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \cdot p_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вх}} \cdot \left(\frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - \left(\frac{S_{\text{кл}}}{S_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}}\right)^{\frac{2}{\gamma}}}\right]}, \tag{2.59}$$

где $S_{\text{кл}}$ – площадь отверстия в клапане, *мм*^{2};

S_i – площадь поперечного сечения в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси из газовода, *мм*^{2};

$C_{\text{ист}}$ – коэффициент истечения;

γ – показатель адиабаты.

Когда отношение давлений $p_{вых}/p_{вх}$ падает ниже критического коэффициента для ламинарного течения $B_{лам}$,

$$\dot{m} = C_{ист} \cdot S_{кл} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \cdot p_{ср}^{\frac{2-\gamma}{\gamma}} \cdot \rho_{ср} \cdot B_{лам}^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left[\frac{1 - B_{лам}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - \left(\frac{S_{кл}}{S_i} \right)^2 \cdot B_{лам}^{\frac{2}{\gamma}}} \right] \cdot \left(\frac{p_{вх}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_{вых}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - B_{лам}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)}, \quad (2.60)$$

где $B_{лам}$ – критическое отношение давлений для ламинарного течения, *Па*;

$\rho_{ср}$ – среднее значение плотности, *кг/м³*;

$p_{ср}$ – значение давления, *Па*;

$p_{вх}$ и $p_{вых}$ – давления на входе и выходе, *Па*.

Для отношения давлений $\frac{p_{вых}}{p_{вх}} < \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, когда отверстие запирается, расход моделируется как

$$\dot{m} = C_{ист} \cdot S_{кл} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot p_{вх} \cdot \rho_{вх} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}} - \left(\frac{S_{кл}}{S_i} \right)^2}}. \quad (2.61)$$

Система управления пневмоподачей озоновоздушной смеси представляет собой золотник, переключающий подачу воздуха к озонатору или в канал, сбрасывающий его в атмосферу.

При моделировании 3-ходового клапана задавались параметры проходных сечений и их перекрытие. Открытие отверстий осуществляется пропорционально перемещению штока, а процессы газообмена в клапане моделировались аналогично описанному выше для предохранительного клапана.

Непосредственно перед озонатором располагается редукционный клапан. Его задача – обеспечить снижение давления в пневмосистеме ниже 0,2 *МПа* для обеспечения нормальной работы озонатора.

Доля открытия клапана $\hat{p}$ определяется как

$$\hat{p} = 1 - \frac{p_B - p_0 - p_{зад}}{\Delta p}, \qquad (2.62)$$

где p_B – абсолютное давление в месте выхода воздуха или озоновоздушной смеси (B) из газовода, *Па*;

$p_{зад}$ – заданное манометрическое давление начала срабатывания клапана, *Па*;

Δp – диапазон регулирования давления, *Па*.

Максимальное манометрическое давление при регулировании $p_{мах} = p_{зад} + \Delta p$.

Процессы газообмена в редукционном клапане моделировались аналогично описанному выше для предохранительного клапана.

Клапан на выходе из форсунки имеет тот же конструктивный и физический смысл, что и предохранительный клапан, но другие параметры, соответствующие особенностям конструкции. В связи с этим для моделирования использовались зависимости (2.57…2.61).

Данная имитационная модель может давать адекватные результаты при наличии правильных параметров системы. Они могут быть определены только при условии понимания реальных объёмов подачи озоновоздушной смеси.

Решение уравнения (2.41) относительно l позволяет определить расстояние между форсунками при реальных значениях подачи озоновоздушной смеси, обеспечиваемых компрессором. На результаты решения будет оказывать влияние гидравлическая составляющая смешивания $v_г$. Учитывая, что подача осуществляется через площадь поперечного сечения обрабатываемого объёма, который согласно рисунку (2.9) равен l^2, то получим скорость гидравлического смешивания, представленную в виде следующего уравнения:

$$v_г = \frac{V_п}{l^2 \cdot t_к \cdot (1 - k_{скв})}. \qquad (2.63)$$

Параметр $V_п/t_к$ представляет собой средний расход озоновоздушной смеси через одну форсунку.

Тогда

$$Q_{\text{пс}} = \frac{l \cdot v_{\text{кор}}}{t_{\text{к}} \cdot \left(\frac{1}{l^2 \cdot (1 - k_{\text{скв}})} + \frac{C_{\text{озпод}} \cdot \left(\frac{l \cdot \left(e^{K_{\text{ор}}(t_0 + t_{\text{к}})} - 1 \right)}{t_1} - \frac{l \cdot e^{\frac{l^2}{16 \cdot D \cdot t_{\text{к}}}}}{2 \cdot t_{\kappa}} \right)}{V_{\text{обр}}} \right)}, \quad (2.64)$$

где $Q_{\text{пс}}$ – средний объемный расход озоновоздушной смеси через форсунку, $м^3/с$.

Определение величины среднего объемного расхода озоновоздушной смеси через форсунку необходимо для отладки работы пневматической системы озонирования бункера хранения семян зерновых культур. Имитационная модель пневматической системы зернохранилища позволила определить реальные параметры системы подачи озоновоздушной смеси, которые обеспечивают средний объёмный расход через форсунки в необходимом количестве, определяемом по зависимости (2.64). Она позволяет определить такие параметры как диаметры трубопроводов, характеристики компрессора, размеры сопел форсунок, параметры клапанов и д.р.

Таким образом, получена зависимость среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку, учитывающая расстояние между форсунками, концентрацию озона в озоновоздушной 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.

2.5 Выводы по разделу

В результате теоретических исследований установлено:

- полученная закономерность изменения очага распространения озона в зависимости от времени обработки приближена по форме к эллипсоиду, но имеет другое математическое описание в виде регрессии на основе гауссовых процессов, при этом полученная математическая модель позволяет прогнозировать зону распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования

(свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614311);

- получена зависимость проозонированного объема зерна от времени обработки, которое имеет вид $v_V(t) = dV_o(t)/dt$, позволяющая установить рациональное время озонирования, при котором обеспечивается максимальная скорость озонной обработки объёма зерна;

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

- получена зависимость среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку, учитывающая расстояние между форсунками, концентрацию озона в озоновоздушной 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 (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024690908, № 2025683661 и № 2025685253).

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Анализ научных работ, посвящённых изучению процесса озонирования при хранении зерна в сельском хозяйстве, показал, что ряд вопросов требует практического подтверждения.

В соответствии с ранее сформулированными целями и задачами диссертационной работы и с запатентованными техническими решениями была разработана программа экспериментальных исследований. Её основные положения, заключаются в следующем:

- определить зону распространения озоновоздушной смеси в слое зерна;

- разработать устройство для хранения зерна и семян зерновых культур, позволяющее проводить озонную обработку внутри хранилища;

- исследовать влияние процесса озонирования в период хранения семян зерновых культур в металлическом силосе на их посевные качества.

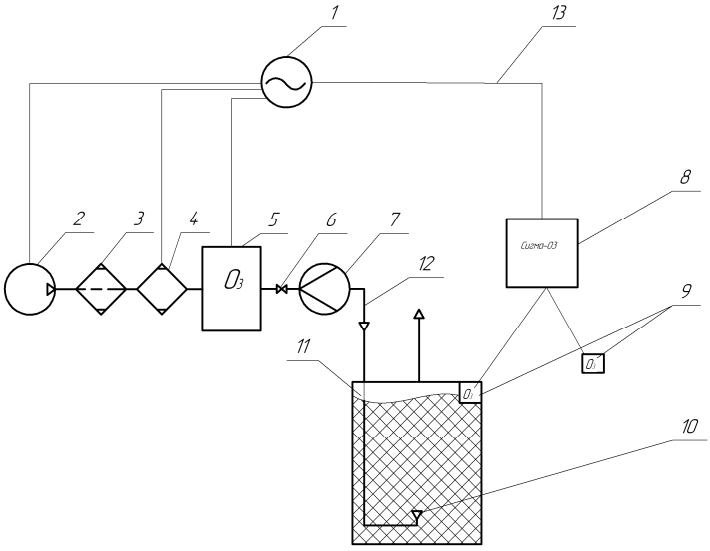
Выполнение программы экспериментальных исследований позволит в полном объеме отобразить изменение качества зерна и семян зерновых культур при хранении.

3.2 Экспериментальные установки по обработке зерна и семян зерновых культур озоновоздушной смесью

3.2.1 Экспериментальная установка по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе

Для подтверждения теоретических исследований по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе в ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ была разработана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.1. Лабораторная установка (рис. 3.1) состоит из источника переменного тока *1*, воздушного компрессора *2*, фильтра *3*, осушителя воздуха *4*, озонатора *5*,

расходомера *6*, запорного вентиля *7*, газоанализатора *8*, датчиков *9*, определяющих концентрацию озона, форсунки *10*, ёмкости *11* и газопроводов *12*.



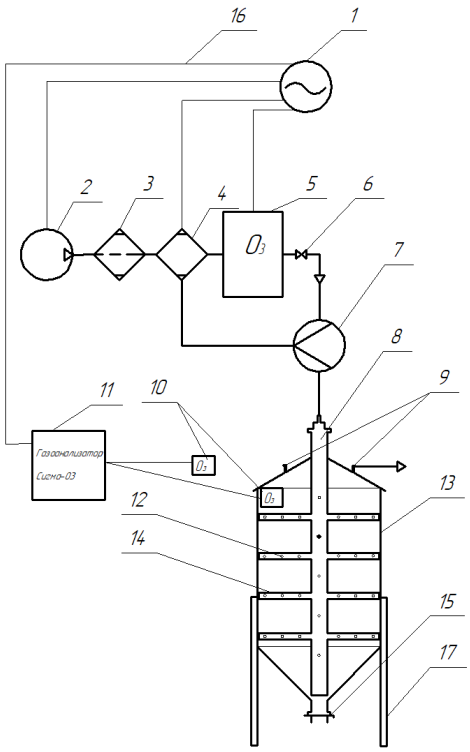
1 – источник переменного тока; *2* – компрессор; *3* – фильтр; *4* – осушитель воздуха; *5* – озонатор; *6* – запорный вентиль; *7* – расходомер; *8* – газоанализатор; *9* – датчики концентрации газа; *10* – форсунка; *11* – ёмкость; *12* – газопроводы, *13* – электрические линии

Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки по озонированию зернового вороха

Её принцип действия следующий. Компрессор *2* (рис. 3.1), осушитель воздуха *4*, озонатор *5* и газоанализатор *8* по электролиниям *13* подключаются к сети переменного тока *1*. При этом компрессор *2* засасывает воздух из окружающей среды и через фильтр *3* подает его в осушитель *4*. Далее обезвоженный воздушный поток поступает в озонатор *5*, в котором обогащается озоном. Количество озоновоздушной смеси изменяется запорным вентилем *7*. Пройдя расходомер *6*, газ по газопроводу *12* поступает в ёмкость *11*, в которой через форсунку *10* подаётся в зерновой ворох. Концентрация озона в озоновоздушной смеси контролируется датчиками *9*, связанными с газоанализатором *8*, который регистрирует показания и выводит их на информационное табло. Всего он имеет четыре порта подключения, к которому можно подсоединить четыре датчика *4*. При превышении уровня предельно допустимой концентрации озоновоздушной смеси прибор подает звуковой сигнал.

3.2.2 Экспериментальные металлические конусные силосы с регулируемой озоновоздушной средой

Для проведения исследований по выявлению влияния процесса озонирования на зерно и семена зерновых культур была разработана соответствующая экспериментальная установка (рис. 3.2), состоящая из источника переменного тока *1*, компрессора *2*, фильтра *3*, осушителя воздуха *4*, озонатора *5*, запорного вентиля *6*, расходомера *7*, газовода *8*, дыхательных клапанов *9*, датчиков концентрации озона *10*, газоанализатора *11*, форсунок *12*, экспериментального хранилища силосного типа *13*, отводов *14*, шиберной задвижки *15*.



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

Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки по озонированию зернохранилищ силосного типа

Отличительной особенностью установки является ёмкость, в которой находится исследуемый материал. Она представляет собой уменьшенную копию зер-

нохранилища силосного типа *13* (рис. 3.2). Внутри него расположен газовод *8* с отводами *14* для подвода озоновоздушной смеси к хранящемуся материалу. Газ поступает к семенам через форсунки *12*.

Для определения влияния озоновоздушной смеси на качественные показатели семян во время их хранения необходимы три аналогичные ёмкости (рис. 3.3). В первом хранилище никакой обработки не происходит. Оно служит в качестве контрольного образца. Во втором силосе процесс аэрации происходит атмосферным воздухом. В третьем зернохранилище вентиляция осуществляется озоновоздушной смесью.

1 – хранилище с контрольным образцом; *2* – хранилище, вентилируемое атмосферным воздухом; *3* – хранилище, вентилируемое озоновоздушной смесью

Рисунок 3.3 – Общий вид экспериментальных силосных хранилищ зерна с коническим дном

Принцип действия данной установки следующий. Озонатор *5* (рис. 3.2) генерирует озоновоздушную смесь и с помощью компрессора *2* подает её в газовод *8*, где через форсунки *12* она распределяется в слое зерна.

Все силосы заполняют семенами зерновых культур до одинакового уровня. Стоит отметить, что хранилища находятся под открытым небом, поэтому подвержены влиянию факторов окружающей среды. С определённой периодичностью

внутрь силосов подается воздух или озоновоздушная смесь. Через некоторый временной интервал часть семян извлекали из зернохранилищ для проведения необходимых исследований. Для этого открывали шиберную заглушку 15 (рис. 3.2), через которую самотеком выгружали определённый объём семян из силоса. Таким образом, лабораторная установка позволит определить влияние разных вариантов аэрации зернохранилищ на изменение качественных показателей семян зерновых культур.

3.3 Методика проведения экспериментальных исследований

3.3.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований при озонной обработке зерна и семян зерновых культур

При проведении экспериментальных исследований определяли влажность зерна. При этом использовали электронный влагомер «Wile-65» (рис 3.4). Измерения происходят за считанные секунды. Влагомер позволяет определить влажность зерна колосовых культур в диапазоне 8…35%, а также выбрать вид зерна. Погрешность прибора составляет не более 5% от измеряемой величины.

Рисунок 3.4 – Влагомер «Wile-65» для зерна и семян сельскохозяйственных культур

Принцип работы влагомера «Wile-65» заключается в следующем. Исследуемый образец помещается в колбу и плотно затягивается крышкой за счёт резьбы. После этого посредством электрического переменного напряжения высокой

частоты проводится анализ исследуемого материала. Показания изменяются в зависимости от вида культуры, плотности зерна или семян и их исходной влажности. Влагомер определяет, насколько скорректировалось текущее значение от эталонного. Далее по специальной формуле происходит расчёт влажности зерна.

Статистическую обработку экспериментальных данных и построение графических зависимостей осуществляли посредством применения пакетов прикладных программ «Microsoft Excel 2010», «MATLAB», КОМПАС 3D.

Озонную обработку исследуемого материала проводили с использованием экспериментальной установки, представленной на рисунках 3.2 и 3.3 и описанной в разделах 3.2.1 и 3.2.2. Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси зависит от режима работы озонатора и схемы подключения оборудования. За дозу озонной обработки принято считать произведение концентрации озона на время эксперимента:

$$D_c = C_{\text{озон}} \cdot t, \tag{3.1}$$

где D_c – доза озона озонной обработки, *мин·мг/м*^{3}.

Концентрацию озона в воздушном пространстве определяли при помощи газоанализатора «Сигма-03» с соответствующими электрохимическими датчиками. В том случае, когда концентрация газа в воздухе, где находится оператор, превышает предельнодопустимое значение, газоанализатор подает звуковой сигнал. При этом озонатор отключается от сети и устраняется причина неисправности. Исследуемый материал подвергался озонной обработке в течение определённого промежутка времени в зависимости от целей эксперимента.

3.3.2 Методика экспериментальных исследований по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе

Для проведения эксперимента необходимо подготовить раствор крахмала с калием йодидом согласно химической формуле [69]

$$2KI + O_3 + H_2O = I_2 + 2KOH + O_2, \tag{3.2}$$

где KI – йодид калия;

O_3 – молекулярный озон;

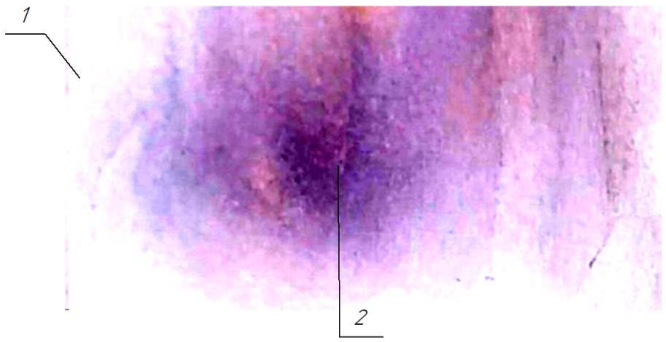
H_2O – вода;

I_2 – молекулярный йод;

KOH – гидроксид калия;

O_2 – молекулярный кислород.

Используемые химические элементы при контакте с озоном дают характерное окрашивание синим цветом (рис. 3.5).



1 – зона, не подвергающаяся воздействию озона; *2* – зона качественной йодокрахмальной реакции в присутствии озона

Рисунок 3.5 – Результат проведения качественной йодокрахмальной реакции при взаимодействии с озоном на фильтровальной бумаге

Пропитанный зерновой материал помещали в экспериментальную ёмкость, которая описана в разделе 3.2.1, куда подавали озоновоздушную смесь. По истечении определённого времени подачу озона прекращали. Далее определяли зону его распространения. Для этого зерно послойно извлекали из ёмкости. Область воздействия озоновоздушной смеси оценивали по самому крайнему зерну, которое изменило цвет.

3.3.3 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян озимой пшеницы

Анализ литературных исследований показал, что озон обладает высокими фунгицидными и бактерицидными свойствами, которые положительно сказываются на энергии прорастания и лабораторной всхожести семян. В качестве объек-

та исследования были выбраны семена мягкой озимой пшеницы сорта «Алая заря».

При проведении эксперимента в каждую ёмкость, описанную в разделе 3.2.2, помещали 30 кг исследуемого семенного материала. На протяжении 10 месяцев каждую неделю проводили вентилирование двух силосных хранилищ в течение одного часа. Раз в две недели отбирали пробы материала для определения посевных качеств. Первую ёмкость обрабатывали озоновоздушной смесью, а во вторую атмосферным воздухом. Третье хранилище не вентилировали на протяжении всего эксперимента. Оно служило в качестве контроля. Далее посевной материал исследовали в лаборатории массовых анализов ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, где определяли энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян согласно ГОСТ 12036-85 и ГОСТ 12038-84 [35, 36].

Семена озимой пшеницы закладывали на проращивание в чашках Петри (рис. 3.6). Для полной стерильности их рабочей поверхности чашки предварительно протирали спиртовым раствором.

Рисунок 3.6 – Общий вид чашки Петри

Затем в дистиллированной воде смачивали два слоя фильтровальной бумаги по размеру дна чашки Петри, на которой равномерно раскладывали семена. Далее их накрывали сверху еще одним слоем смоченной фильтровальной бумаги того же размера и ставили в электрический суховоздушный термостат ТЛ-1 (рис. 3.7).

Исследования проводили при полной темноте и постоянной температуре. Полученные данные заносили в журнал регистрации экспериментальных данных.

Рисунок 3.7 – Электрический термостат суховоздушный ТЛ-1

Оборудование позволяет внутри рабочей камеры создавать необходимую температуру в диапазоне от 5 до 60 ºС. Максимально допустимое отклонение составляет не более двух градусов Цельсия.

Семенной материал находился в термо-шкафу на протяжении трех суток. По прошествии данного срока их доставали и анализировали. Семена, которые проросли, откладывали из чашки Петри отдельно и подсчитывали. Такую процедуру проводили с каждым образцом. Не проросшие семена не трогали, оставляя в чашках Петри. Их обратно ставили в термостат еще на четверо суток, смочив немного водой. На седьмой день семена доставали и исследовали их лабораторную всхожесть. Принцип такой же, как и при определении энергии прорастания. Проросшие и не проросшие семена раскладывали отдельно и вели их подсчет.

Таким образом, данная методика позволяет получить результаты лабораторной всхожести и энергии прорастания семян озимой пшеницы в зависимости от способа аэрации в период хранения.

3.3.4 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание массовой доли белка в зерне озимой пшеницы

Литературные данные по изменению содержания белка в зерне при озонировании скудны и противоречивы, поэтому были проведены соответствующие собственные исследования. Определение содержания массовой доли белка происходило согласно ГОСТ 10846-91 [33]. Навеску зерна весом 50 г размалывали в лабораторной мельнице (рис.3.8).

Рисунок 3.8 – Лабораторная мельница ЛЗМ-М1

Измельченная масса ссыпается в бюксы, оттуда отбирают пробу для анализа (0,1 грамма размолотого образца), которую взвешивают на электромагнитных аналитических весах, представленных на рисунке 3.9.

Рисунок 3.9 – Общий вид электромагнитных аналитических весов

Далее данную пробу отобранного образца помещают в колбу Кьельдаля. С помощью мерного цилиндра отмеривают 15 $см^3$ концентрированной серной кис-

лоты, которой смывают стенки колбы и смачивают навеску муки. Добавляют 1…1,5 *г* катализатора сжигания. Колбу закрывают специальной стеклянной воронкой и устанавливают на электрическую плиту. Содержимое сжигают в течение некоторого времени, пока оно не станет прозрачным. Добившись нужного результата, охлаждают до комнатной температуры. После озоления приступают к перегонке. Данный процесс заключается в том, что содержимое переносят в мерные колбы на 100 *мл* и разводят дистиллированной водой. Затем в отгонные колбы добавляют 2-3 капли фенол фталеина и 10 *мл* исследуемого образца. Затем их подставляют к каплеуловителю и холодильнику. Закрывают пробкой, в которую вместе с каплеуловителем вставлена резиновая трубка со стеклянной воронкой. В перегонные колбы в начале нагревания приливают 50 $см^3$ щёлочи для нейтрализации кислоты, при этом содержимое принимает малиновый окрас. Причём резиновая трубка должна быть опущена в приёмную колбу вместимостью 250 $см^3$. В последнюю добавляют сиреневый индикатор. Перегонку проводят до тех пор, пока жидкость изменит свой цвет на зелёный и увеличится в объёме в несколько раз. Титрование проводят до тех пор, пока содержимое приёмных колб примет синий окрас. Тем самым определяется количество серной кислоты, нейтрализованной выделившимся при отгонке аммиаком. Содержание белка в исследуемом образце зерна рассчитывают по формуле

$$N = (a - b) \cdot 1{,}4 \cdot 6{,}25, \qquad (3.3)$$

где N – содержание массовой доли белка, %;

a – количество раствора серной кислоты, взятой на анализ, $см^3$;

b – количество раствора гидроксида натрия, пошедшего на титрование избытка кислоты, $см^3$;

1,4 – количество азота, эквивалентное 1 $см^3$ раствора гидроксида натрия, *г*;

6,25 – коэффициент пересчета содержания азота на белок.

Таким образом, данная методика позволяет определить изменение содержания белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от способа обработки при хранении.

3.3.5 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание клейковины в зерне озимой пшеницы

При определении содержания клейковины в зерне руководствовались ГОСТ 54478-2011 [39]. При этом использовали прибор диафаноскоп фотоэлектрический «Янтарь» (рис. 3.10). Он позволяет провести экспресс-анализ массовой доли клейковины в зерне. Принцип его работы основан на измерении светопропускания зерновой массы. Электронная схема преобразует фотоэлектрический сигнал в цифровые показатели по массовой доле клейковины. Прибор работает в помещениях с температурой воздуха от 10 до 35 °С и относительной влажности не более 80%.

Рисунок 3.10 – Диафаноскоп фотоэлектрический «Янтарь»

В наборе с прибором идут специальные кюветы, куда загружается исследуемый материал (рис 3.11). Кювета с белым наполнителем считается контрольной. При помощи неё проверяют прибор на пригодность. Перед применением диафаноскопа необходимо включить его заранее на 5…10 минут. Данная процедура нужна для его прогрева и корректной работы. Диапазон оценки клейковины составляет от 13 до 40%. Время одного измерения составляет не более одной минуты.

Для проведения анализа на диафаноскопе «Янтарь» необходимо отобрать нормально развитые зерна, убрать при этом сорные примеси, щуплое и дробленое зерно, засыпать отобранный материал в кювету, равномерно распределить его по всей рабочей поверхности и закрыть крышкой. Затем поместить кювету в кюветоприёмник и зафиксировать. На жидкокристаллический дисплей выводятся цифровые значения, полученные в ходе опыта. Один образец исследуется три раза. Делается это для повышения достоверности результатов, за который принимается среднее значение.

Рисунок 3.11 – Общий вид кювет

По окончании эксперимента следует извлечь кюветы из кюветоприёмника, закрыв его крышку. Проанализированый материал извлекают из кюветы, которую тщательно чистят смоченной спиртом салфеткой.

Таким образом, данная методика позволяет определить содержание клейковины в зерне озимой пшеницы в зависимости от способа аэрации экспериментальных силосов при хранении.

3.3.6 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на стекловидность зерна озимой пшеницы

При определении стекловидности зерна руководствовались соответствующим ГОСТ 10987-76 [34]. Для данного анализа использовали прибор диафаноскоп «ДСЗ-2М» (рис. 3.12).

Рисунок 3.12 – Прибор диафаноскоп «ДСЗ-2М»

Исследуемый материал загружают в специальную кассету (рис 3.13). Её рабочая поверхность содержит 10 рядов по 10 отверстий, в каждое из которых помещают только один образец. Затем кассету вставляют в прибор в диафаноскоп и посредством специального механизма протяжки перемещают в зону просмотра. Подачу света осуществляют посредством тумблера, размещенного на корпусе прибора. При этом световой поток должен направляться на один ряд кассеты.

Зерно считается стекловидным, если оно просвечивается полностью или с легким помутнением, а частично стекловидным зерно считается, когда стекловидные и мучнистые участки чередуются между собой. Нестекловидным, то есть мучнистым, считается зерно, которое не просвечивается. Таким же образом исследуют все ряды кассеты с опытным материалом. Затем считают количество стекловидных и частично стекловидных зерен, записывая результат. После этого определяют общую стекловидность зерна по формуле

$$О_с = С_т + (Ч_{ст}/2), \quad (3.4)$$

где $О_с$ – общая стекловидность зерна, %;

$С_т$ – количество полностью стекловидных зёрен, *шт*;

$Ч_{ст}$ – количество частично стекловидных зёрен, *шт*.

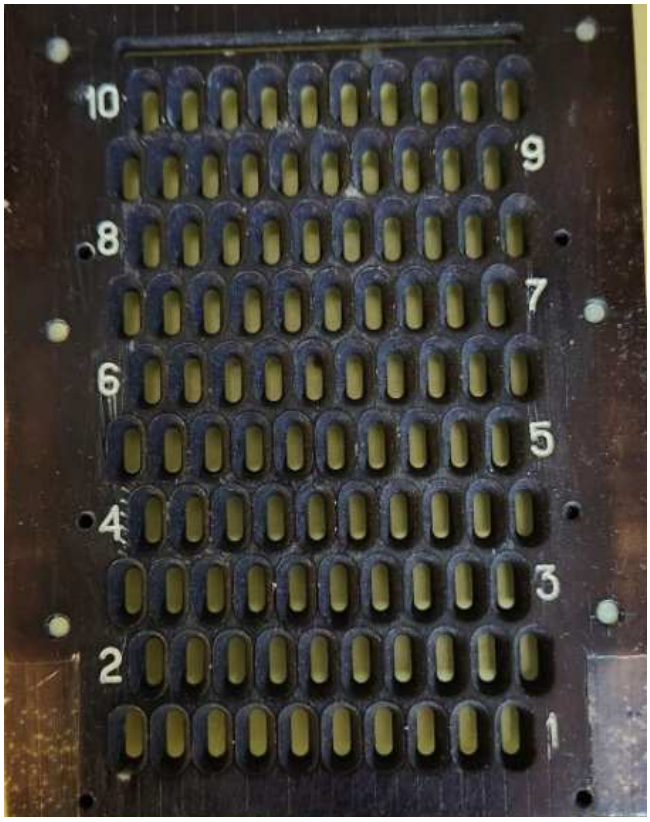


Рисунок 3.13 – Общий вид кассеты

Таким образом, данная методика позволяет определить стекловидность зерна озимой пшеницы в зависимости от способа обработки экспериментальных силосов.

3.3.7 Методика экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микофлору семян озимой пшеницы

При определении влияния озонной обработки на микофлору семян озимой пшеницы руководствовались ГОСТ 12044-93 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения заражённости болезнями» [37]. При проведении эксперимента в ёмкость, которая описана в подразделе 3.2.1, помещали исследуемый семенной материал. Всего было пять партий семян. Четыре из них подвергались озонной обработке, а пятая считалась контрольной и ничем не обрабатывалась. Озонирование проводили в течение шести часов. По мере достижения необходимой дозы озонной обработки одну партию семян изымали из ёмкости. Так поступали и с другими исследуемыми образцами. Причем продолжительность данного опыта зависела непосредственно от дозы озонной обработки, а не от времени. Это сделано для удобства дальнейшей рекомендации режимных параметров при озонировании различных сельскохозяйственных культур, так как каждый озонатор индивидуален и имеет разную озонопроизводимость. Если ориентироваться на время обработки, то возможно, что желаемый результат не будет достигнут из-за недостаточной дозы озонирования, которая играет решающую роль при дезинфекции. По окончании озонирования семенной материал исследовали в лаборатории на микофлору, где его проращивали согласно методике, описанной в подразделе 3.3.3.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА АЭРАЦИИ СИЛОСНЫХ ЗЕРНОХРАНИЛИЩ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗЕРНА И СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

4.1 Результаты экспериментальных исследований по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе

Исследования по определению зоны распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе проводили на экспериментальной установке, представленной на рисунке 3.1 согласно методике, описанной в подразделе 3.3.2. Эксперимент повторяли трижды, изменяя продолжительность обработки. В первом случае озонирование проводили в течение 10 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси – 4,28 *мг/м³*. При этом доза озонной обработки составила 42,8 *мин·мг/м*^{3}, а расход рабочей смеси – 0,226 *м*^{3}. Во втором эксперименте время составило 20 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 3,33 *мг/м³*. При этом доза озонной обработки равнялась 66,6 мин·*мг/м*^{3}, а расход рабочей смеси – 0,4 *м*^{3}. В третьем эксперименте опыт длился 30 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси – 3,54 *мг/м³*. При этом доза озонной обработки составила 106,2 *мин·мг/м*^{3}, а расход рабочей смеси – 0,617 *м*^{3}. Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время экспериментов представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время опыта

№ опыта	Время озонной обработки, *мин*	Средняя концентрация озона в озоновоздушной смеси, *мг/м³*	Доза озонной обработки, *мин·мг/м*^{3}
1	10	4,28	42,8
2	20	3,33	66,6
3	30	3,54	106,2

Следующим этапом экспериментов было определение зон распространения озона в зерновом ворохе, которые оценивали по появившемуся пятну, т.е. зёрнам, окрасившихся в фиолетовый цвет, под действием выделившегося йода согласно

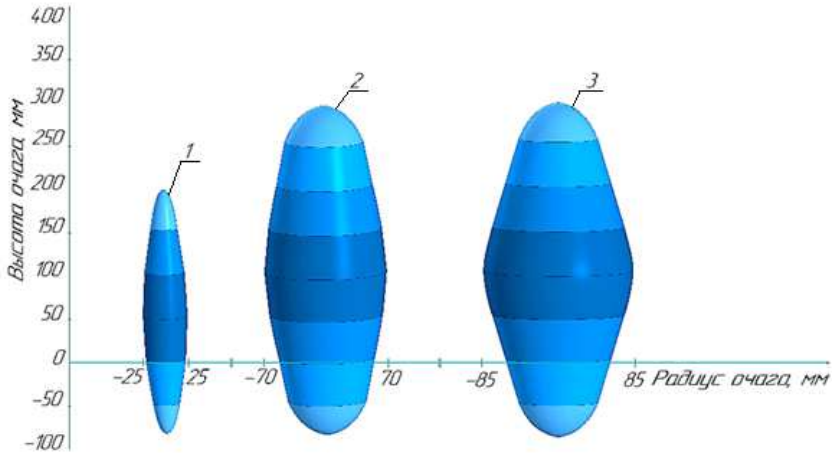
уравнению 3.2. Для этого зерно изымали из ёмкости слоями с шагом 50 *мм*. При этом определяли радиус окрасившихся пятен, поскольку их форма они была приближена к окружности. Данный показатель измеряли по крайней точке окрашенного зерна с точностью до 1 *мм*. Подающее сопло, которое находится в слое зерна, обозначено за ноль. Нижерасположенные части имеют отрицательные значения, а выше – положительные. Изменения радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени обработки представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Изменение радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени озонной обработки

Время опыта, *мин*	Высота слоя, *мм*	Радиус очага, *мм*
10	-80	0
	-50	14
	0	23
	50	25
	100	22
	150	16
	200	0
20	-85	0
	-50	45
	0	55
	50	65
	100	70
	150	65
	200	55
	250	44
	295	0
30	-90	0
	-50	47
	0	60
	50	75
	100	85
	150	75
	200	60
	250	46
	300	0

По результатам исследований посредством программы КОМПАС 3D получены зоны распространения озона в зерновом ворохе. Визуализированная 3D модель расхождения газа в слое зерна представлена на рисунке 4.1. Она похожа на

эллипсоид, и имеет разные размеры. Причём озон от места подачи распространяется не только вверх, но и немного вниз.



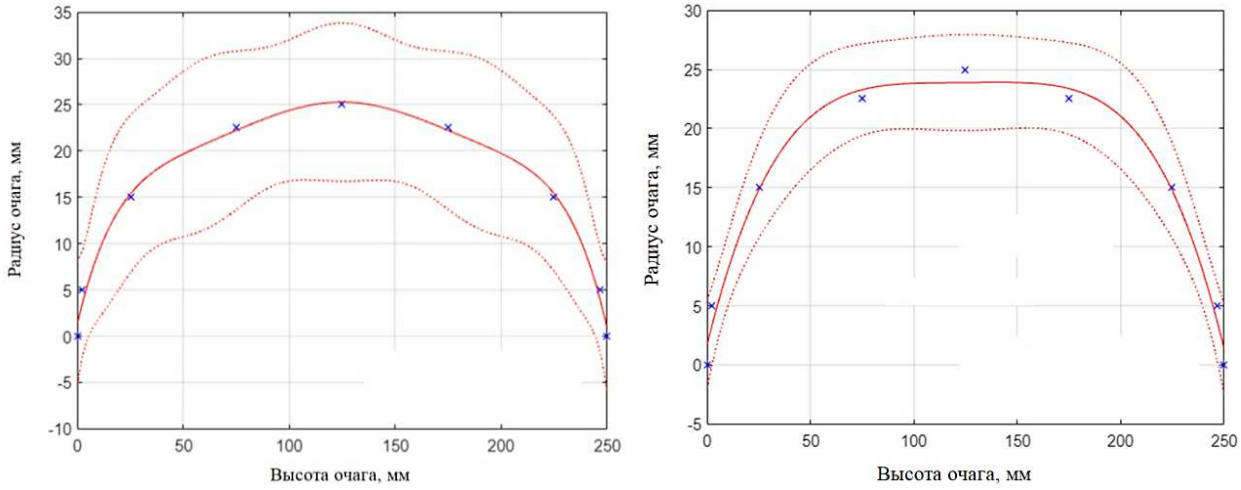
1 – 10 минут озонной обработки; *2* – 20 минут озонной обработки;
3 – 30 минут озонной обработки

Рисунок 4.1 – 3D модель распространения очага озона в зерновом ворохе при разных режимах озонирования

Визуализированная 3D модель позволяет сравнить очаги распространения озона в зерновом ворохе при разных режимах озонной обработки. При помощи функций массо-центровочных характеристик (МЦХ) программы КОМПАС 3D, были получены объёмы фигур, которые соответствовали зонам распространения озона в зерне при разном времени эксперимента. Стоит отметить, что окрашенные зёрна имели разные оттенки, что говорит о различии условий протекания качественной йодокрахмальной реакции, вызванные изменяющейся концентрацией озона по зерновым слоям. Следовательно, более тёмные слои получали большую дозу озонной обработки. Очевидно, что в месте подачи озоновоздушной смеси в зерновой ворох её скорость движения высокая и поэтому газ быстро проходит вверх через зерновые слои, лишь немногим увеличиваясь в диаметре. При этом в середине эллипсоида создаётся эпицентр с наивысшей концентрацией озона. Далее скорость движения газа снижается, и верхние зерновые слои получают меньшую дозу озонной обработки и поэтому слабее окрашиваются. Очаги имеют максимальные диаметры в поперечном сечении в местах с наибольшей концентрацией озона в озоновоздушной смеси и по мере удаления от эпицентра уменьшаются

в размерах до тех пор, пока не станут равными нулю. В конечном итоге на некотором удалении от места подачи газа действие озона прекращается. Однако с необходимой точностью описать закономерность распределения озоновоздушной смеси уравнениями эллипсоида не удалось. Поэтому была проведена аппроксимация взаимосвязи радиуса очага озона от его высоты.

Поиск характера изменения зоны расхождения газа осуществлялся с помощью инструментов Matlab компании MathWorks. При этом линейная регрессия в виде полинома не дала удовлетворительных результатов (рис. 4.2).



а *б*

а – аппроксимация полиномом 4 степени; *б* – аппроксимация полиномом 6 степени;
····· – доверительный интервал

Рисунок 4.2 – Результаты аппроксимации полиномом результатов экспериментальных исследований изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса при 10 минутной озонной обработке

Как видно из рисунка 4.2 на примере экспозиции 10 минут, полиномы четвёртой и даже шестой степени, описывающие полученные экспериментальные результаты, имеют слишком большой доверительный интервал и недостаточно описывают математическое ожидание величины радиуса. Подобный результат получен при разных степенях полинома. Аналогичная картина наблюдалась при попытке выполнить аппроксимацию разными нелинейными функциями. Поэтому была проведена аппроксимация взаимосвязи радиуса очага озона от его высоты с

максимальным соблюдением формы по методу кусочно-кубического сплайна Эрмита (рис. 4.3) [137].

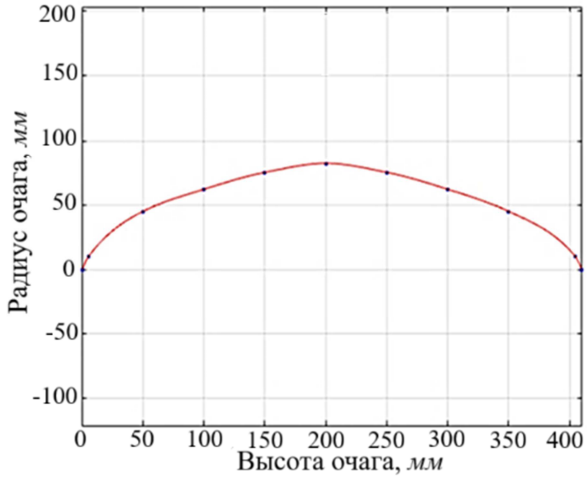


Рисунок 4.3 – Результат взаимосвязи радиуса очага озона от его высоты, полученный методом кусочно-кубического сплайна Эрмита

Анализируя данную закономерность, можно сказать, что экспериментальные значения, отмеченные точками, хорошо отражают форму кривой, полученной теоретически. Используемый метод аппроксимирует данные эксперимента не на всём заданном интервале, а по отдельности на каждом частичном интервале между соседними точками, поэтому наиболее точно позволяет смоделировать изменения радиуса очага озона от его высоты.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить адекватность теоретических исследований. Расстояние между форсунками, определяемое по формуле (2.39), можно проверить путём сравнения с размерами полученных очагов. При этом при расчёте используем допущения, при которых значения концентрация озона в озоновоздушной смеси, время операции и расход газа меняются, а остальные составляющие уравнения остаются неизменными. Тогда при времени обработки 10, 20 и 30 минут концентрации озона в озоновоздушной смеси соответственно 4,28, 3,33 и 3,54 *мг/м³* и расходе газа, равном соответственно 0,226, 0,4 и 0,617 $м^3$, решим численным методом уравнение (2.39). В результате расстояния между форсунками, подающими озоновоздушную смесь, соответственно условиям эксперимента, составят 52, 157 и 176 мм. Замер фактических максимальных

диаметров очагов распространения озоновоздушной смеси показал, что данный параметр соответственно равен 50, 140 и 170 мм (рис. 4.4). Следовательно, отклонения области действия газа составляют 2, 17 и 6 мм.

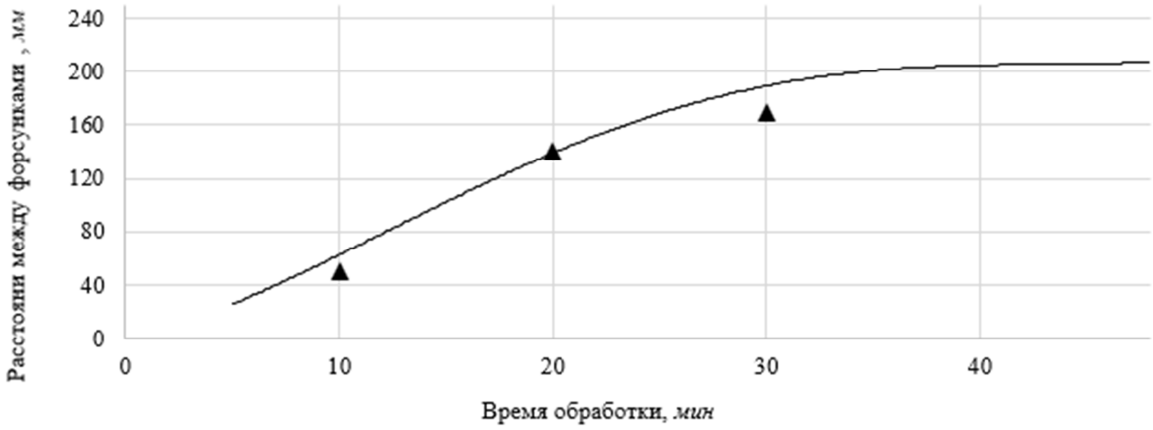


Рисунок 4.4 – Сходимость теоретических и экспериментальных исследований изменения расстояния между форсунками в зависимости от времени обработки

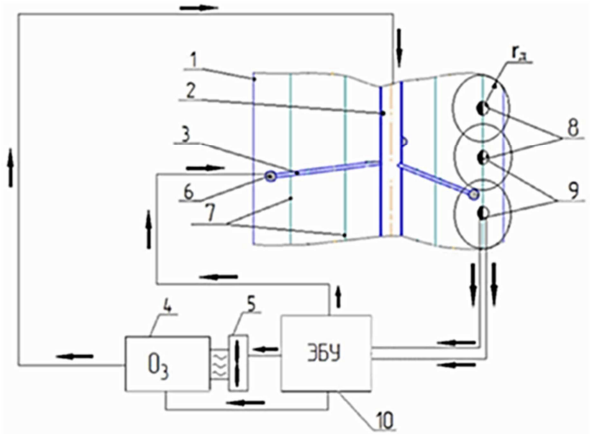
Анализ рисунка 4.4 показывает, что значения расстояния между форсунками, подающими озоновоздушную смесь в зернохранилище, полученные теоретическим и экспериментальным путем достаточно близки, что подтверждает адекватность проведённых исследований. При этом расхождение результатов не превышает 10%, что говорит о сходимости проведённых экспериментов и расчётных значений.

Таким образом, экспериментально определена зона распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе, представляющая собой объёмную фигуру, форму и размер которой возможно определить посредством кусочно-кубического сплайна Эрмита. Полученные экспериментальные значения согласуются с теоретическими исследованиями с достаточной точностью.

4.2 Разработка устройства для хранения семян зерновых культур, обеспечивающего регулируемую озоновоздушную среду

Для обеспечения сохранности качества семян зерновых культур прототип необходимо дооснастить датчиками влажности, позволяющими отслеживать изменение данного показателя внутри зернохранилища. Устройство для хранения

зерна, состоит из цилиндрического корпуса с системой озонирования, которая включает в себя озонатор, нагнетатель воздуха, датчики температуры, газопровод системы озонирования с прямыми отводами, на концах которых размещены электромагнитные форсунки. При этом оно дополнительно снабжено датчиками влажности. Причем последние вместе с датчиками температуры равномерно размещены внутри корпуса хранилища и закреплены на термоподвесках. Также хранилище оснащено электронным блоком управления, который контролирует работу системы озонирования и электромагнитных форсунок на основании сигналов с датчиков влажности и температуры. При этом электронный блок управления и система озонирования закреплены на наружной стене цилиндрического корпуса, а электронный блок управления имеет возможность принимать и передавать сигналы через кабель. Принципиальная схема работы представлена на рис. 4.5.



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

Рисунок 4.5 – Устройство для хранения зерна, защищенное патентом РФ на полезную модель № 219336

Принцип действия разработанного технического решения осуществляется следующим образом. При хранении зернового материала в зернохранилище с цилиндрическим корпусом *1* (рис. 4.3) электронный блок управления *10* анализирует сигналы с датчиков температуры *8* и влажности *9* зерна. Если данные показания находятся в допустимых пределах, то электромагнитные форсунки *6* закрыты.

При этом система озонирования находится в режиме ожидания. Если температура или влажность зернового материала отклонились от требуемых показателей, то электронный блок управления формирует управляющий сигнал на включение в работу озонатора *4*, нагнетателя воздуха *5* и электромагнитных форсунок *6*. Зерновой материал обрабатывается озоновоздушной смесью до тех пор, пока контролируемые параметры не вернутся к допустимым значениям, после чего система автоматически возвращается в режим ожидания. Отработанная, неразложившаяся озоновоздушная смесь выводится из хранилища через деструктор (не показан), разлагающийся озон, не нанося вреда окружающей среде. Использование разработанного устройство позволит значительно повысить сохранность зернового материала.

Предложенное техническое решение запатентовано на уровне полезной модели РФ № 219336 «Устройство для хранения зерна» [81]. Устройство для хранения зерна позволит обеспечить регулируемую озоновоздушную среду внутри зернохранилища и проводить мониторинг состояния зерна и семян зерновых культур.

4.3 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на качественные показатели семян озимой пшеницы при хранении

4.3.1 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян озимой пшеницы

Влияние процесса озонирования при хранении семян в силосном зернохранилище на их качественные показатели изучено слабо. Исследования проводили на экспериментальных силосах, описанных в подразделе 3.2.2, представленных на рисунке 3.4, согласно методике, описанной в подразделе 3.3.3.

Частые перепады температуры воздуха способствуют образованию конденсата на стенках хранилища. Это влияет на изменение влажности зерна и снижение его качественных показателей в пристенной зоне. Аэрацию силосов озоновоз-

душной смесью и атмосферным воздухом проводили раз в неделю в течение одного часа. Проверку качества семян проводили раз в две недели согласно ранее полученным результатам исследований [8]. В зависимости от способа аэрации металлических силосов качественные показатели посевного материала в течение времени хранения изменяются по-разному. Поскольку озонная обработка проводится с целью поддержания посевных и качественных показателей семян, то концентрация озона в озоновоздушной смеси не должна превышать 5 *мг/м*^{3}. Изменение энергии прорастания семян озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа обработки в экспериментальных силосных зернохранилищах представлено в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян озимой пшеницы при хранении в экспериментальных металлических хранилищах силосного типа в зависимости от способа аэрации

Дата	Вид обработки	Время обработки, *мин*	Средняя концентрация озона, *мг/м*^{3}	Доза озонной обработки, *мин·мг/м*^{3}	Суммарная доза озонной обработки, *мин·мг/м*^{3}	Средняя энергия прорастания семян, %	Средняя лабораторная всхожесть семян, %
28.03.2023	без обработки	0	0	0	0	84,75	86,5
11.04.2023	без обработки	0	0	0	0	87,25	88,5
	воздух	60	0	0	0	86,5	90
	озон	60	2,27	136,2	136,2	86	88
16.05.2023	без обработки	0	0	0	0	88	89,5
	воздух	60	0	0	0	89	90,5
	озон	60	3,02	181,2	317,4	89,25	90,5
30.05.2023	без обработки	0	0	0	0	88,25	89,75
	воздух	60	0	0	0	90,75	92,
	озон	60	3,82	229,2	546,6	90	92,
13.06.2023	без обработки	0	0	0	0	88,75	90
	воздух	60	0	0	0	91	92,5
	озон	60	3,63	217,8	764,4	92	94

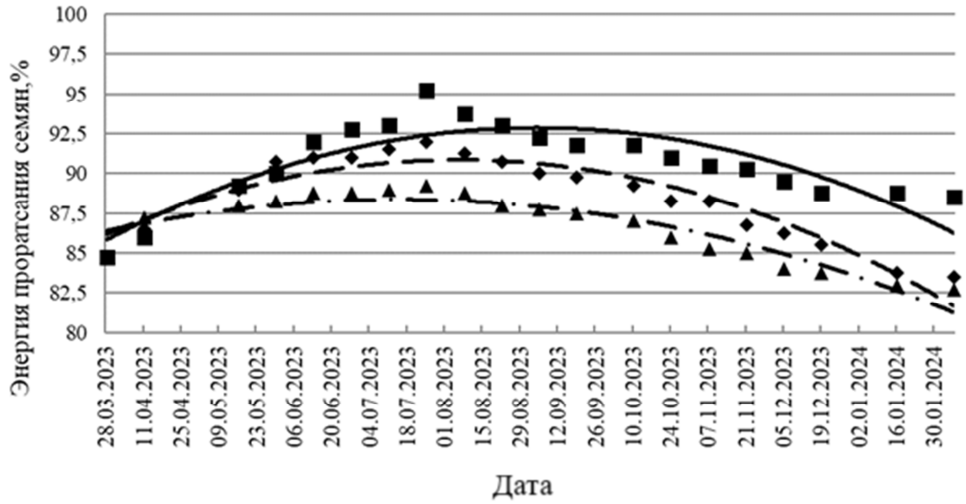
Продолжение таблицы 4.3

27.06.2023	без обработки	0	0	0	0	88,75	90,25
	воздух	60	0	0	0	91	92,75
	озон	60	3,40	204	968,4	92,75	94,5
11.07.2023	без обработки	0	0	0	0	89	90,25
	воздух	60	0	0	0	91,5	93
	озон	60	2,85	171	1139,4	93	94,5
25.07.2023	без обработки	0	0	0	0	89,25	90
	воздух	60	0	0	0	92	93
	озон	60	3,86	231,6	1371	95,25	96
08.08.2023	без обработки	0	0	0	0	88,75	89,75
	воздух	60	0	0	0	91,25	92,25
	озон	60	3,52	211,2	1582,2	93,75	95
22.08.2023	без обработки	0	0	0	0	88	89
	воздух	60	0	0	0	90,75	91,75
	озон	60	4,03	241,8	1824	93	94,75
05.09.2023	без обработки	0	0	0	0	87,75	89
	воздух	60	0	0	0	90	91,25
	озон	60	3,49	209,4	2033,4	92,25	93,5
19.09.2023	без обработки	0	0	0	0	87,5	88,75
	воздух	60	0	0	0	89,75	90,75
	озон	60	3,02	181,6	2214,6	91,75	92,75
10.10.2023	без обработки	0	0	0	0	87	88
	воздух	60	0	0	0	89,25	90,25
	озон	60	3,86	231,8	2446,2	91,75	92,75
24.10.2023	без обработки	0	0	0	0	86	87,25
	воздух	60	0	0	0	88,25	90
	озон	60	3,87	232,4	2678,6	91	92,25
07.11.2023	без обработки	0	0	0	0	85,25	86,5
	воздух	60	0	0	0	88,25	88,75
	озон	60	3,77	226,4	2905	89,75	89,75

Продолжение таблицы 4.3

21.11.2023	без обработки	0	0	0	0	85	85,75
	воздух	60	0	0	0	86,75	87,5
	озон	60	3,80	228	3133	90,25	91,5
05.12.2023	без обработки	0	0	0	0	84	84,75
	воздух	60	0	0	0	86,25	87
	озон	60	3,73	224	3357	89,5	91
19.12.2023	без обработки	0	0	0	0	83,75	84
	воздух	60	0	0	0	85,5	86,25
	озон	60	3,02	181,4	3538,4	88,75	89,75
16.01.2024	без обработки	0	0	0	0	83	83,75
	воздух	60	0	0	0	83,75	84,75
	озон	60	3,81	228,4	3766,8	88,75	89,75
06.02.2024	без обработки	0	0	0	0	82,75	83,25
	воздух	60	0	0	0	83,5	84,75
	озон	60	3,28	196,8	3963,6	88,5	89,5

В графическом виде результаты исследований, представленные в таблице 4.3, приведены на рисунках 4.6 и 4.7.



——— – озон; - - - - – атмосферный воздух; -·-·-·- – без обработки

Рисунок 4.6 – Зависимость энергии прорастания семян озимой пшеницы от срока хранения и способа аэрации

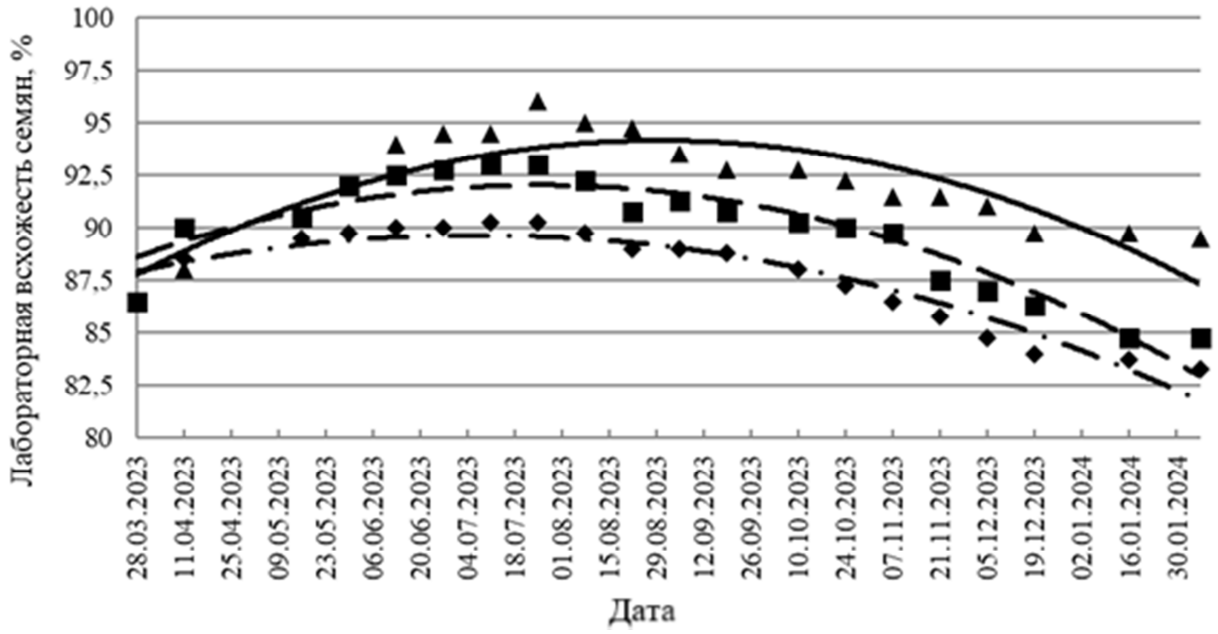
Анализ таблицы 4.3 и рисунка 4.6 показал, что энергия прорастания проозонированных семян на протяжении семикратной озонной обработки увеличивается

на 10,5%. Аналогичная ситуация наблюдается у семенного материала, который вентилируется атмосферным воздухом. Прибавка энергии прорастания семян за этот же срок составила 7,25%. Стоит отметить, что за весь период исследования в данной точке зафиксирована максимальная энергия прорастания семян для всех вариантов силосных хранилищ. В контрольном силосе, где обработку не проводили, за то же время данный показатель увеличился на 4,5%. Это говорит о том, что в семенах идет период послеуборочного созревания. Затем на протяжении последующих опытов наблюдается снижение энергии прорастания семян во всех вариантах обработки экспериментальных зернохранилищ. Это связано с климатическими изменениями, когда колебания температуры и относительной влажности воздуха наиболее нестабильны, что отрицательно сказывается на посевных качествах хранящихся семян. При этом с августа по февраль энергия прорастания семян в силосе без обработки снизилась на 6,5% относительно максимального значения 89,25%. Причем начальный показатель на 2% ниже исходного, который фиксировалсяпри закладке зерна на хранение. В силосе, вентилируемом воздухом, ситуация еще хуже. С августа по февраль энергия прорастания семян снизилась на 8,5% относительно максимального значения 92%. Причём конечный показатель 83,5% на 1,25% ниже исходного 84,75%. Это связано с тем, что при вентиляции силоса при высокой относительной влажности воздуха происходит увеличение влажности хранящегося зерна и его порча, что отрицательно сказывается на посевных качествах. Наилучший результат получен в силосе, аэрируемом озоновоздушной смесью. За этот же срок энергия прорастания семян с максимальным значением 95,25% снизилась на 6,5% до конечных 88,5%, что выше исходного показателя 84,75%. Это свидетельствует о том, что аэрация силосных зернохранилищ озоновоздушной смесью позволяет поддерживать посевную ценность семян на должном уровне. Бактерицидные, фунгицидные и высокие окислительные свойства озона способствуют угнетению негативных процессов, происходящих в хранящемся зерне. В результате конечное значение энергии прорастания семян в аэрируемом озоновоздушной смесью составило 88,5%, что на 5% выше, чем в си-

лосе, вентилируемом атмосферным воздухом, и на 5,75% больше конечного показания в контрольном силосе, в котором обработка отсутствовала.

Энергия прорастания семян характеризует дружность их всходов, что не всегда достаточно точно демонстрирует их качество. Поэтому одновременно с энергией прорастания определяли лабораторную всхожесть семян, которая более полно отражает их посевные качества.

Изменение лабораторной всхожести семян в зависимости от времени хранения и способа аэрации экспериментальных силосов представлено на рисунке 4.7.



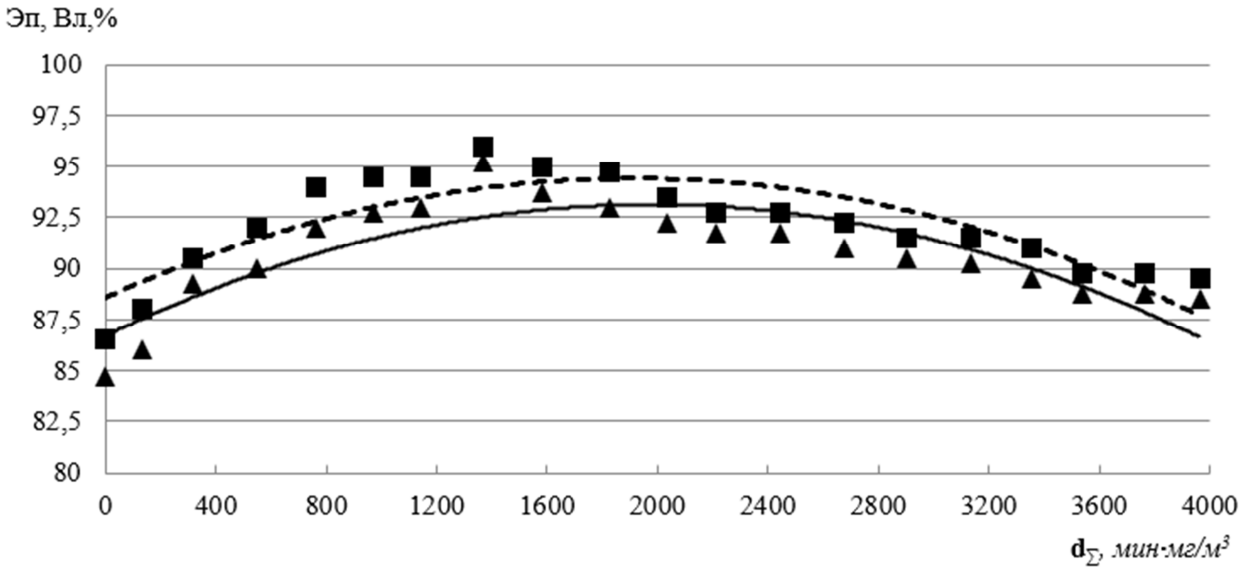
——— – озон; - - - - – атмосферный воздух; -·-·-·- – без обработки

Рисунок 4.7 – Зависимость лабораторной всхожести семян озимой пшеницы от срока хранения и способа аэрации

Анализ таблицы 4.3 и рисунка 4.7 показал, что на протяжении семикратной озонной обработки наблюдается положительная динамика увеличения лабораторной всхожести семян на 9,5%. Такая же ситуация и у семенного материала, который аэрируется атмосферным воздухом. Увеличение данного показателя семян на протяжении того же срока составило 6,5%. В контрольном силосе, который не подвергался обработке, за тот же срок данный показатель увеличился на 3,25%. Это говорит о том, что в семенах идет период послеуборочного созревания. В

дальнейшем во всех вариантах обработки зернохранилищ наблюдается уменьшение лабораторной всхожести семян. Это объясняется изменчивыми погодными условиями. Перепады температуры и влажности воздуха ухудшают посевные качества хранящихся семян. Следует отметить, что с августа по февраль лабораторная всхожесть семян в силосе без обработки снизилась на 7%, относительно максимального значения 90,25%. Причем начальный показатель на 3,25% ниже исходного, который фиксировался при закладке зерна на хранение. В силосе, вентилируемом воздухом, ситуация еще хуже. За этот же период лабораторная всхожесть семян снизилось на 8,25% относительно максимального значения 93%. Причем конечный показатель 84,75% на 1,75% ниже исходного. Это связано с тем, что во время вентиляции силоса при высокой относительной влажности воздуха происходит увеличение влажности хранящегося зерна, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на посевных качествах. Наилучший результат получен в силосе, аэрируемом озоновоздушной смесью. При этом за этот же срок лабораторная всхожесть семян с максимальным значением 96% снизилась на 6,5% до конечных 89,5%, что выше исходного показателя 84,75%. Можно сказать о том, что вентилирование зернохранилищ озоновоздушной смесью позволит поддерживать посевную ценность семян на должном уровне. Стоит отметить тот факт, что озон обладает бактерицидным, фунгицидным свойствам, которые отрицательно сказываются на жизнедеятельности различных вредителей зерна. В результате конечное значение лабораторной всхожести семян в хранилище, вентилируемом озоновоздушной смесью, составило 89,5%, что на 4,75% выше, чем в силосе, который продували атмосферным воздухом, и на 6,25% больше конечного показания в контрольном хранилище семян зерновых культур, где обработка отсутствовала.

Для определения рационального режима озонной обработки посевного материала при хранении необходимо провести статистическую обработку результатов исследований. Изменение показателей энергии прорастания и лабораторной всхожести семян в зависимости от дозы озонной обработки представлено на рисунке 4.8.



——— – энергия прорастания; - - - - – лабораторная всхожесть

Рисунок 4.8 – 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 второй степени:

$$Э_п = – 0{,}000002\ d_\Sigma^2 + 0{,}0065\ d_\Sigma + 86{,}697, \quad (4.1)$$

$$В_л = – 0{,}000002\ d_\Sigma^2 + 0{,}0061\ d_\Sigma + 88{,}574, \quad (4.2)$$

где $Э_п$ – энергия прорастания семян, %;

$В_л$ – лабораторная всхожесть семян, %;

d_Σ – суммарная доза озонной обработки за весь эксперимент, *мин·мг/м*^{3}.

Показатели достоверности аппроксимации данных зависимостей составляют соответственно $R^2 = 0{,}748$ и $R^2 = 0{,}752$. Учитывая большой период исследований, полученные зависимости достаточно точно описывают процесс.

Проанализировав полученные зависимости, можно сказать, что при суммарной дозе озонирования 1600 *мин·мг/м*^{3} энергия прорастания семян озимой пшеницы будет максимальной и составит 92%. Стоит отметить, что изменение дозы в диапазоне от 1150 до 2100 *мин·мг/м*^{3} даёт одно и то же значение при округлении до целого числа. Наибольшая лабораторная всхожесть семян озимой пше-

ницы получена при дозе озонирования 1500 *мин·мг/м*^{3} и составила 93%. Изменение дозы в диапазоне от 950 до 2100 *мин·мг/м*^{3} даёт одно и то же значение при округлении до целого числа. На основе результативных данных получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611103, позволяющей определить рациональную дозу озонной обработки, обеспечивающую наивысшую лабораторную всхожесть семян зерновых культур [96].

Таким образом, в течение 10 месяцев исследований было выявлено преимущество периодического озонирования посевного материала в процессе хранения по таким показателям, как энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян. За этот период в варианте с озонной обработкой энергия прорастания повысилась на 3,75%, а лабораторная всхожесть семян на – 3%. В тоже время в аэрируемом силосе энергия прорастания снизилась на 1,25%, а лабораторная всхожесть – на1,75%. В варианте без обработки наблюдалось уменьшение энергии прорастания на 2%, а лабораторной всхожести на 3,25% относительно исходного значения. При этом изменение дозы озонирования в диапазоне от 950 до 2100 *мин·мг/м*^{3} можно считать рациональным при обработке семенного материала озимой пшеницы, так как получены наилучшие посевные качества. При данном режиме работы озонаторной установки энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян будут максимальны и составят соответственно 92 и 93%. Следует отметить, что данная доза достигнута периодической озонной обработкой, имеющей накопительный эффект. Следовательно, если судить по таким показателям, как энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян, то периодическое озонирование семенного материала при его хранении в металлическом силосе является более эффективным способом в сравнении с вентиляцией атмосферным воздухом или же отсутствием аэрации.

4.3.2 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание массовой доли белка в зерне озимой пшеницы

При хранении зерна в зернохранилище силосного типа влияние процесса озонирования на изменение в нём массовой доли белка практически не изучено. Исследования проводили в экспериментальных силосах, описанных в подразде-

ле 3.2.2 и представленных на рисунке 3.4, согласно методике, описанной в подразделе 3.3.4. Изменение содержания массовой доли белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа аэрации в экспериментальном силосном зернохранилище представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Изменение содержания массовой доли белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа аэрации

Дата	Вид обработки	Время обработки, *мин*	Средняя концентрация озона, *мг/м^3*	Доза озонной обработки, *мин·мг/м^3*	Содержание белка в зерне, %
28.03.2023	без обработки	0	0	0	14,20
11.04.2023	без обработки	0	0	0	13,78
	воздух	60	0	0	13,55
	озон	60	2,27	136,2	13,22
16.05.2023	без обработки	0	0	0	12,15
	воздух	60	0	0	11,45
	озон	60	3,02	181,2	11,55
30.05.2023	без обработки	0	0	0	11,00
	воздух	60	0	0	10,30
	озон	60	3,82	229,2	10,00
13.06.2023	без обработки	0	0	0	10,28
	воздух	60	0	0	10,33
	озон	60	3,63	217,8	9,66
27.06.2023	без обработки	0	0	0	10,30
	воздух	60	0	0	10,85
	озон	60	3,40	204	11,90
11.07.2023	без обработки	0	0	0	9,19
	воздух	60	0	0	9,45
	озон	60	2,85	171	12,20
25.07.2023	без обработки	0	0	0	9,25
	воздух	60	0	0	10,35
	озон	60	3,86	231,6	15,62

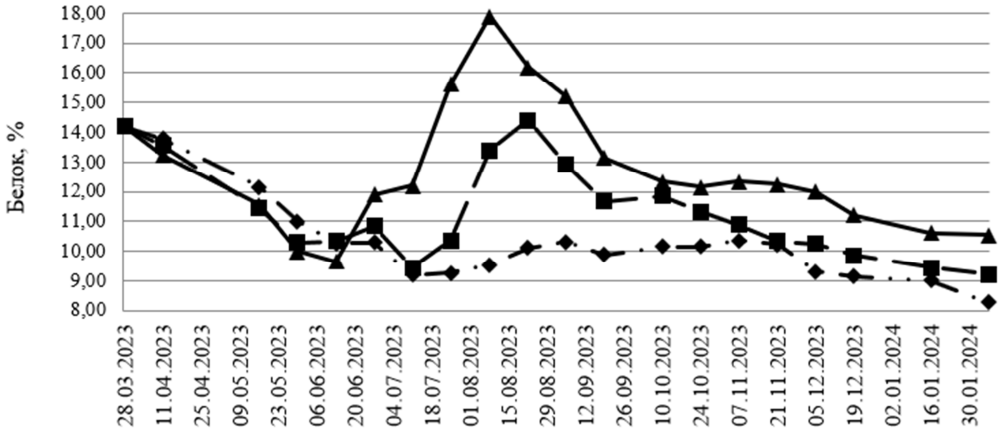
Продолжение таблицы 4.4

08.08.2023	без обработки	0	0	0	9,54
	воздух	60	0	0	13,40
	озон	60	3,52	211,2	17,90
22.08.2023	без обработки	0	0	0	10,12
	воздух	60	0	0	14,40
	озон	60	4,03	241,8	16,20
05.09.2023	без обработки	0	0	0	10,31
	воздух	60	0	0	12,90
	озон	60	3,49	209,4	15,20
19.09.2023	без обработки	0	0	0	9,87
	воздух	60	0	0	11,68
	озон	60	30,3	181,6	13,13
10.10.2023	без обработки	0	0	0	10,15
	воздух	60	0	0	11,85
	озон	60	3,86	231,8	12,34
24.10.2023	без обработки	0	0	0	10,15
	воздух	60	0	0	11,32
	озон	60	3,87	232,4	12,15
07.11.2023	без обработки	0	0	0	10,35
	воздух	60	0	0	10,88
	озон	60	3,77	226,4	12,34
21.11.2023	без обработки	0	0	0	10,23
	воздух	60	0	0	10,33
	озон	60	3,80	228	12,25
05.12.2023	без обработки	0	0	0	9,30
	воздух	60	0	0	10,25
	озон	60	3,73	224	12
19.12.2023	без обработки	0	0	0	9,15
	воздух	60	0	0	9,85
	озон	60	3,02	181,4	11,2

Продолжение таблицы 4.4

16.01.2024	без обработки	0	0	0	9
	воздух	60	0	0	9,44
	озон	60	3,81	228,4	10,61
06.02.2024	без обработки	0	0	0	8,28
	воздух	60	0	0	9,22
	озон	60	3,28	196,8	10,55

По данным таблицы, был построиен график изменения содержания массовой доли белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от времени и способа хранения рис. 4.9.



——— – озон; - - - – атмосферный воздух; -·-·- – без обработки

Рисунок 4.9 – Зависимость изменения массовой доли белка в зерне озимой пшеницы от срока хранения и способа вентилирования

Анализируя таблицу 4.4 и рисунок 4.9, можно сказать, что на протяжении четырёх опытов содержание белка во всех экспериментальных силосах уменьшилось. У проозонированного зерна данный показатель снизился на 4,54%, у вентилируемого воздухом – на 3,67%, а в контрольном образце – на 3,92%. Это объясняется тем, что погодные условия были нестабильны. Постоянные колебания относительной влажности и температуры воздуха пагубно влияли на качество зерна [58, 45, 75, 85, 111, 128]. Однако с июня по август происходит повышение содержания белка в силосе, продуваемом озоновоздушной смесью и аэрируемом

атмосферным воздухом. Следует отметить, что за данный период содержание массовой доли белка в зерне достигло максимума за весь период исследований для этих вариантов. При озонной обработке данный показатель повысился на 3,7% и составил 17,90%. При вентилировании воздухом содержание белка изменилось на 0,2% и стало 14,40%. За этот же период в контрольном зернохранилище содержание белка уменьшилось на 4,08% относительно исходного значения 14,20%. Далее во всех вариантах экспериментальных зернохранилищ силосного типа происходит уменьшение данного показателя, который составил 10,55% для проозонированного зерна, 9,22% – для аэрируемого воздухом и 8,28% – для контрольного образца, что ниже исходного значения соответственно на 3,65%, 4,98% и 5,92%.

Следовательно, было выявлено преимущество периодической аэрации зерна озоном в процессе хранения по такому показателю, как содержание массовой доли белка по сравнению с вентилированием силоса атмосферным воздухом или же отсутствием обработки. В конечном итоге содержание белка в озонируемом зерне на 1,33% выше, чем в силосе с аэрацией воздухом и на 2,27% больше, чем в варианте зернохранилища без обработки. Таким образом, по содержанию массовой доли белка озонирование зерна в металлическом силосе является более эффективным способом по сравнению с силосом, вентилируемым атмосферным воздухом или отсутствием обработки.

4.3.3 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на содержание клейковины в зерне озимой пшеницы

Влияние озонной обработки при хранении зерна в силосном хранилище на изменение содержания клейковины изучено слабо. Исследования проводили в экспериментальных силосах, описанных в подразделе 3.2.2 и представленных на рисунке 3.4, согласно методике, описанной в подразделе 3.3.5.

Изменение содержания клейковины в зерне озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа аэрации семенного материала в экспериментальном силосном зернохранилище представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Изменение содержания клейковины в зерне озимой пшеницы в зависимости от срока и способа аэрации силосного зернохранилища

Дата	Вид обработки	Время обработки, *мин*	Средняя концентрация озона, *мг/м^3*	Доза озонной обработки, *мин·мг/м^3*	Клейковины в зерне, %
28.03.2023	без обработки	0	0	0	28
11.04.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	2,27	136,2	28
16.05.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,02	181,2	28
30.05.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,82	229,2	28
13.06.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,63	217,8	28
27.06.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,40	204	28
11.07.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	2,85	171	28
25.07.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,86	231,6	28
08.08.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,52	211,2	28

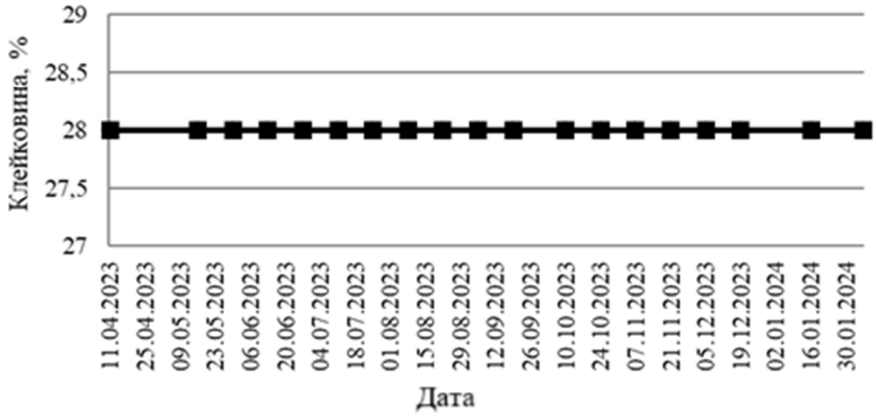
Продолжение таблицы 4.5

22.08.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	4,03	241,8	28
05.09.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,49	209,4	28
19.09.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	30,3	181,6	28
10.10.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,86	231,8	28
24.10.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,87	232,4	28
07.11.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,77	226,4	28
21.11.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,80	228	28
05.12.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,73	224	28
19.12.2023	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,02	181,4	28
16.01.2024	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,81	228,4	28

Продолжение таблицы 4.5

06.02.2024	без обработки	0	0	0	28
	воздух	60	0	0	28
	озон	60	3,28	196,8	28

Результаты, представленные в таблице 4.5, приведены в графическом виде на рисунке 4.10.



——— – озон; ------ – атмосферный воздух; -·-·-·- – без обработки

Рисунок 4.10 – Зависимости изменения содержания клейковины в зерне озимой пшеницы от срока хранения и способа аэрации

Анализируя таблицу 4.5 и рисунок 4.10, можно сказать, что на протяжении всего периода исследования содержание клейковины в зерне озимой пшеницы оставалось неизменным независимо от способа аэрации. Следовательно, ни озонирование, ни вентилирование атмосферным воздухом никак не повлияет на содержание клейковины в зерне в исследуемом диапазоне обработки. Как отмечают другие ученые, изменение данного показателя в зерне возможно лишь в период послеуборочного дозревания [21, 128]. Таким образом, озонирование зерна озимой пшеницы при хранении не влияет на содержание клейковины.

4.3.4 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на стекловидность зерна озимой пшеницы

Влияние озонной обработки при хранении зерна в силосном хранилище на изменение стекловидности изучено недостаточно. Исследования проводили в

экспериментальных силосах, описанных в подразделе 3.2.2 и представленных на рисунке 3.4, согласно методике, описанной в подразделе 3.3.6. Изменение стекловидности зерна озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа аэрации силосного зернохранилища представлено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Изменение стекловидности семян озимой пшеницы в зависимости от времени и способа хранения посевного материала

Дата	Вид обработки	Время обработки, *мин*	Средняя концентрация озона, *мг/м^3*	Доза озонной обработки, *мин·мг/м^3*	Стекловидность зерна, %
28.03.2023	Без обработки	0	0	0	44,5
11.04.2023	Без обработки	0	0	0	44,5
	Воздух	60	0	0	43,5
	Озон	60	2,27	136,2	40
16.05.2023	Без обработки	0	0	0	37
	Воздух	60	0	0	36
	Озон	60	3,02	181,2	35
30.05.2023	Без обработки	0	0	0	39
	Воздух	60	0	0	39
	Озон	60	3,82	229,2	37
13.06.2023	Без обработки	0	0	0	33,5
	Воздух	60	0	0	33
	Озон	60	3,63	217,8	32,5
27.06.2023	Без обработки	0	0	0	32
	Воздух	60	0	0	33
	Озон	60	3,40	204	35
11.07.2023	Без обработки	0	0	0	32
	Воздух	60	0	0	33,5
	Озон	60	2,85	171	34
25.07.2023	Без обработки	0	0	0	32
	Воздух	60	0	0	33
	Озон	60	3,86	231,6	39

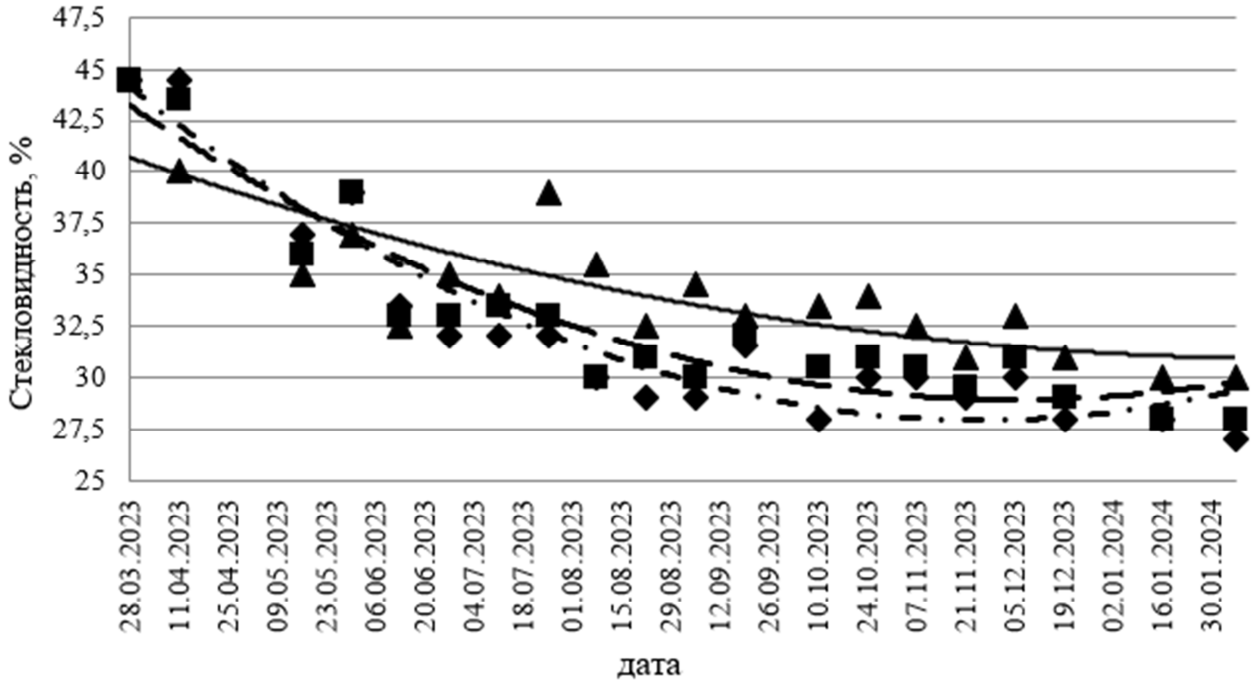
Продолжение таблицы 4.6

08.08.2023	Без обработки	0	0	0	30
	Воздух	60	0	0	30
	Озон	60	3,52	211,2	35,5
22.08.2023	Без обработки	0	0	0	29
	Воздух	60	0	0	31
	Озон	60	4,03	241,8	32,5
05.09.2023	Без обработки	0	0	0	29
	Воздух	60	0	0	30
	Озон	60	3,49	209,4	34,5
19.09.2023	Без обработки	0	0	0	31,5
	Воздух	60	0	0	32
	Озон	60	3,03	181,6	33
10.10.2023	Без обработки	0	0	0	28
	Воздух	60	0	0	30,5
	Озон	60	3,86	231,8	33,5
24.10.2023	Без обработки	0	0	0	30
	Воздух	60	0	0	31
	Озон	60	3,87	232,4	34
07.11.2023	Без обработки	0	0	0	30
	Воздух	60	0	0	30,5
	Озон	60	3,77	226,4	32,5
21.11.2023	Без обработки	0	0	0	29
	Воздух	0	0	0	29,5
	Озон	60	3,80	228	31
05.12.2023	Без обработки	0	0	0	30
	Воздух	60	0	0	31
	Озон	60	3,73	224	33
19.12.2023	Без обработки	0	0	0	28
	Воздух	60	0	0	29
	Озон	60	3,02	181,4	31

Продолжение таблицы 4.6

16.01.2024	Без обработки	0	0	0	28
	Воздух	60	0	0	28
	Озон	60	3,81	228,4	30
06.02.2024	Без обработки	0	0	0	27
	Воздух	60	0	0	28
	Озон	60	3,28	196,8	30

Данный таблицы 4.6, в графическом виде представлены на рисунке. 4.11.



——— – озон; ------ – атмосферный воздух; -·-·-·- – без обработки

Рисунок 4.11 – Изменение стекловидности зерна озимой пшеницы в зависимости от срока хранения и способа аэрации

Анализируя таблицу 4.6 и рисунок 4.11, можно сказать, что на протяжении всего периода исследований наблюдается тенденция снижения стекловидности зерна озимой пшеницы во всех вариантах экспериментальных силосов. У проозонированного зерна данный показатель снизился на 14,5%, у вентилируемого воздухом – на 16,5% и в контрольном варианте – на 17,5% относительно исходного ния 44,5%.

Таким образом, установлено преимущество периодической аэрации силосного зернохранилища озоновоздушной смесью по показателю стекловидности зерна перед аэрацией атмосферным воздухом и вариантом с отсутствием обработки. При этом у проозонированного зерна итоговое значение выше на 2%, чем у аэрируемого воздухом, и на 3%, чем в контрольном варианте, который не подвергался обработке. Поэтому, если судить по такому показателю как стекловидность зерна, то озонирование при хранении в металлическом силосе является более эффективным способом обработки в сравнении с вентиляцией атмосферным воздухом или же отсутствием обработки.

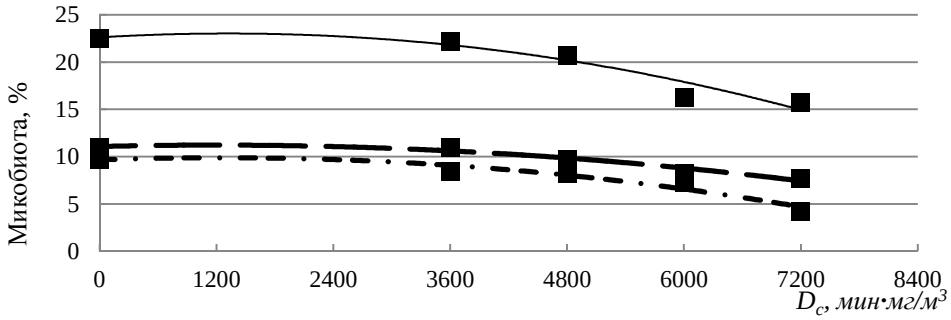
4.3.5 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микофлору семян озимой пшеницы

Влияние озонной обработки на микобиоту семян озимой пшеницы изучено недостаточно. Исследования проводили на экспериментальной установке, описанной в подразделе 3.2.1 и представленной на рисунке 3.1, согласно методике, описанной в подразделе 3.3.7. Результат фитопатологического анализа озимой пшеницы представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты фитопатологического анализа семян озимой пшеницы

№ опыта	Доза озонной обработки, *мин·мг/м*^{3}	Микобиота, %		
		род грибов *Alternaria*	род грибов *Fusarium*	род грибов *Helminthosporium*
Контроль	0	22,5	11	9,75
1-я партия	3600	22,25	11	8,5
2-я партия	4800	20,75	9,75	8,25
3-я партия	6000	16,25	8,25	7,25
4-я партия	7200	15,55	7,75	4,25

По результатам исследований получены зависимости зараженности семян озимой пшеницы возбудителями болезней от дозы озонной обработки (рис. 4.12).



——— – грибы рода *Alternaria,* - - - - – грибы рода *Fusarium,*
-·-·-·- – грибы рода *Helminthosporium*

Рисунок 4.12 – Зараженность семян озимой пшеницы возбудителями болезней в зависимости от дозы озонной обработки

Анализируя таблицу 4.7 и рисунок 4.12, можно констатировать, что семенной материал озимой пшеницы имеет зараженность такими болезнями, как альтернариоз (*Alternaria),* фузариоз (*Fusarium),* гельминтоспориоз *(Helminthosporium).* На рисунке видно, что при дозе озонной обработки 3600 *мин·мг/м*^{3} не происходит снижения таких возбудителей болезней как *Alternaria*, *Fusarium,* что нельзя сказать про *Helminthosporium*. Поражённость этим грибковым заболеванием сельскохозяйственных растений при минимальной дозе обработки для данного опыта снизилась на 1,25%. На протяжении всего периода исследования наблюдается тенденция спада заражённости грибковыми болезнями семян озимой пшеницы по мере увеличения дозы озонной обработки. Так, при дозе обработки 4800 *мин·мг/м*^{3} микобиота семенного материала снизилась *Alternaria* на 1,5%, *Fusarium* – 1,25% и *Helminthosporium* – 0,25%. При дозе озонной обработки 6000 *мин·мг/м*^{3} заражённость исследуемого материала уменьшилась на 4,5% для *Alternaria,* на 1,5% – *Fusarium* и на 1% – для *Helminthosporium*. При достижении максимальной дозы озонной обработки 7200 *мин·мг/м*^{3} поражённость грибковыми заболеваниями рода *Alternaria* ещё снизилась на 0,7%, *Fusarium* – на 0,5% и *Helminthosporium* – на 3%. В целом при дозе озонной обработки 7200 *мин·мг/м*^{3} заражённость грибковыми заболеваниями *Alternaria* снизилась на 4,45%, *Fusarium* – на 2,5% и *Helminthosporium* – на 5,5% относительно исходных значений.

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

$$З_{Alt} = – 0{,}0000002 \cdot D_c{}^2 + 0{,}0006 \cdot D_c + 22{,}623, \quad (4.3)$$

$$З_{Fus} = – 0{,}0000001 \cdot D_c{}^2 + 0{,}0002 \cdot D_c + 11{,}071, \quad (4.4)$$

$$З_{Hel} = – 0{,}0000001 \cdot D_c{}^2 + 0{,}0004 \cdot D_c + 9{,}6499, \quad (4.5)$$

где $З_{Alt}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Alternaria*, %;

$З_{Fus}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Fusarium*, %;

$З_{Hel}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода *Helminthosporium*, %.

Показатели 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 сделать вывод, что полное уничтожение патогенов достигается при дозе озонирования свыше 12200 *мин·мг/м*^{3}.

Таким образом, такой вид грибкового заболевания как *Fusarium* полностью исчезнет при дозе озонирования 11500 *мин·мг/м*^{3}. Инфекционная болезнь *Helminthosporium* прекратит свою жизнедеятельность при дозе озонной обработки 12000 *мин·мг/м*^{3}. Инфицированность грибами рода *Alternaria* полностью исчезнет с семян пшеницы при достижении дозы озонирования 12200 *мин·мг/м*^{3} в данных условиях экспериментальных исследований.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что озонная обработка оказывает положительное воздействие на подавление грибковой зараженности семенного материала озимой пшеницы, причем с увеличением продолжительности обработки эффективность озонирования возрастает. Для полного уничтожения грибковых заболеваний необходима доза озонной обработки свыше 12200 *мин·мг/м*^{3}.

4.4 Выводы по разделу

В результате экспериментальных исследований установлено:

- экспериментально определена зона распространения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе, представляющая собой объёмную фигуру, форму и размер которой возможно определить посредством кусочно-кубического сплайна Эрмита, при этом значения, полученные экспериментально, достаточно точно согласуются с теоретическими исследованиями.

- предложенное техническое устройство, запатентованное на уровне полезной модели РФ № 219336 «Устройство для хранения зерна», позволит обеспечить регулируемую озоновоздушную среду внутри зернохранилища и проводить мониторинг влажностно-температурного состояния семян зерновых культур;

- в течение 10 месяцев исследований было выявлено преимущество периодического озонирования семян озимой пшеницы в процессе хранения, при котором энергия прорастания повысилась на 3,75%, а лабораторная всхожесть – на 3%, в то время как в аэрируемом силосе энергия прорастания снизилась на 1,25%, а лабораторная всхожесть – на 1,75%, одновременно в варианте хранилища, где обработка не проводилась, произошло уменьшение энергии прорастания на 2%, а лабораторной всхожести – на 3,25% относительно исходного значения, при этом рациональная накопительная доза озонной обработки находится в диапазоне от 950 до 2100 *мин·мг/м*^{3};

- на конец эксперимента содержание белка в озонируемом зерне на 1,33% было выше, чем в вентилируемом воздухом и на 2,27% больше, чем в контроле, при этом у проозонированного зерна конечное значение стекловидности выше на 2%, чем у аэрируемого воздухом, и на 3%, чем в варианте, который не подвергался обработке;

- процесс озонирования положительно влияет на снижение заражённости семян озимой пшеницы грибковыми заболеваниями при дозе озонной обработки 7200 *мин·мг/м*^{3} наблюдается уменьшение поражения такими вредителями, как *Alternaria* – на 4,45%, *Fusarium* – на 2,5% и *Helminthosporium* на – 5,5%, причем полностью прекратить жизнедеятельность данных микроорганизмов возможно при дозе озонирования свыше 12200 *мин·мг/м*^{3}.

5 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА ОЗОНИРОВАНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Расчёты экономической эффективности по применению озонной обработки семян зерновых культур проведены в сравнении с химической обработкой. Требуемое оборудование и его стоимость представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Состав необходимого оборудования

Требуемое оборудование	Стоимость оборудования, руб	
	Базовый вариант (химическая обработка)	Проектируемый вариант (озонная обработка)
Протравливатель	398000	-
Озонаторная установка	-	905000
Рабочая жидкость	100000	-
Компрессор	-	200000
Газоанализатор	-	115000
Осушитель воздуха	-	235600
Датчики определения концентрации газа	-	165300
Вентиляционные колонны	-	275000
Соединительные шланги	-	56000
Итого затраты на оборудование	498000	1951900
Затраты на монтаж оборудования, 10% от стоимости оборудования	-	195190
Затраты на пусконаладочные работы, 7% от стоимости оборудования	-	136633
Прочие расходы, 3% от стоимости оборудования	-	58557
Всего капитальные вложения, *К*	0	2342280

Амортизационные отчисления определим по формулам:

$$A_m^{\text{баз}} = C_{\text{б}} \cdot Na \,/\, 100 \text{ – для базового варианта,} \quad (5.1)$$

$$A_m^{\text{пр}} = C_{\text{п}} \cdot Na \,/\, 100 \text{ – для проектируемого варианта,} \quad (5.2)$$

где A_m – затраты на амортизацию, *руб*;

$C_б$ – затраты на оборудование для базового варианта (табл. 5.1), *руб*;

$C_п$ – затраты на оборудование для проектируемого варианта (табл. 5.1), *руб*;

N_a – годовая норма амортизации, N_a = 5%.

Для базового варианта амортизационные отчисления $A_m^{баз}$ составят

$$A_m^{баз} = 498000 \cdot 5 / 100 = 24900 \text{ руб}.$$

Для проектируемого варианта амортизационные отчисления $A_m^{пр}$ составят

$$A_m^{пр} = 1951900 \cdot 5 / 100 = 97595 \text{ руб}.$$

Следовательно, дополнительные амортизационные отчисления $A_m^{доп}$, вызванные установкой дополнительного оборудования, будут равны

$$A_m^{доп} = A_m^{пр} - A_m^{баз} = 97595 - 24900 = 72695 \text{ руб}.$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание определим по формулам:

$$P_m^{баз} = C_б \cdot Np/100 \text{ – для базового варианта,} \quad (5.3)$$

$$P_m^{пр} = C_п \cdot Np/100 \text{ – для проектируемого варианта,} \quad (5.4)$$

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

N_p – ежегодная норма отчисления на ремонт и техническое обслуживание оборудование, N_p = 6%.

Для базового варианта затраты на ремонт и техническое обслуживание составят

$$P_m^{баз} = 498000 \cdot 6 / 100 = 29880 \text{ руб}.$$

Для проектируемого варианта затраты на ремонт и техническое обслуживание составят

$$P_m^{пр} = 1951900 \cdot 6 / 100 = 117114 \text{ руб}.$$

Таким образом дополнительные затраты $P_m^{доп}$ на ремонт и техническое обслуживание, вызванные установкой оборудования, будут равны

$$P_m^{доп} = P_m^{пр} - P_m^{баз} = 117114 - 29880 = 87234 \text{ руб.} \quad (5.5)$$

Затраты на электроэнергию определим по формуле:

$$C_{эл} = Q_{эл} \cdot Ц_{эл}, \quad (5.6)$$

где $C_{эл}$ – затраты на электроэнергию, *руб.*;

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

$Ц_{эл}$ – средняя цена 1 *кВт·ч* в России для сельхозпроизводителей, $Ц_{эл} = 7{,}88$ *руб.*

Исходя из данных производителя суммарная потребляемая мощность базового варианта равна 7,5 *кВт*. Следовательно, годовой расход электроэнергии $Q_{эл}^{баз}$ достигает 5532,8 *кВт·ч*. Для проектируемого варианта потребная мощность составляет 20 *кВт*. При этом годовой расход электроэнергии $Q_{эл}^{пр}$ равен 9484,8 *кВт·ч*.

Затраты на электроэнергию для базового варианта $Q_{эл}^{баз}$ составляют

$$Q_{эл}^{баз} = 5532{,}8 \cdot 7{,}88 = 43598{,}46 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для проектируемого варианта $Q_{эл}^{пр}$ составляют

$$Q_{эл}^{пр} = 9484{,}8 \cdot 7{,}88 = 74740{,}42 \text{ руб.}$$

Следовательно, дополнительные затраты $Q_{эл}^{доп}$ на электроэнергию за счет установленного оборудования будут равны

$$Q_{эл}^{доп} = Q_{эл}^{пр} - Q_{эл}^{баз} = 74740{,}42 - 43598{,}46 = 31141{,}76 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

Суммарные эксплуатационные затраты $И_г^{баз}$ базового варианта в год составят:

$$И_г^{баз} = A_m^{баз} + P_m^{баз} + Q_{эл}^{баз} = 24900 + 29880 + 43598{,}46 = 97378{,}46 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Суммарные эксплуатационные затраты $И_г^{пр}$ проектируемого варианта в год составят

$$И_г^{пр} = A_m^{пр} + P_m^{пр} + Q_{эл}^{пр} = 97595 + 117114 + 74740{,}42 = 289449{,}22 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

Таким образом, годовые дополнительные эксплуатационные издержки составят

$$Э_и = И_г^{пр} – И_г^{баз} = 289449,22 – 97378,46 = 191010,76 \text{ } руб, \quad (5.10)$$

где $Э_и$ – дополнительные эксплуатационные издержки, *руб*.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что применение процесса озонирования влечет за собой удорожание базового процесса обработки семян зерновых культур на 191010,76 рублей.

Годовой экономический эффект от озонной обработки семян представлен в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Расчет годового экономического эффекта при использовании технологии озонирования семян

Показатели	Базовый вариант	Проектируемый
Годовой объём обрабатываемого зернового материала, т	10000	10000
семена 2-го класса	4500	5500
семена 3 -го класса	5500	4500
Цена тонны посевного материла, руб/т		
семена 2-го класса	14500	14500
семена 3-го класса	13000	13000
Стоимость продукции в год, руб		
семена 2-го класса	65250000	79750000
семена 3-го класса	71500000	58500000
Стоимость всей продукции, руб	136750000	138250000
Прибавка стоимости продукции в год, руб	-	1500000
Дополнительные эксплуатационные издержки	-	191070,76
Годовой экономический эффект, руб	-	1308929,24

Таким образом, годовой экономический эффект составляет P_{rt} = 1308929,24 *руб*.

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

$$K_t = P_{rt} \cdot \frac{(1 + N_D)^{\text{Тэ}} - 1}{N_D}, \quad (5.11)$$

где K_t – экономический эффект за срок эксплуатации, *руб.*;

$T_э$ – срок эксплуатации оборудования; $T_э$ = 10 *лет*;

N_D – требуемая норма доходности.

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

$$K_t = 1308929{,}24 \cdot \frac{(1 + 0{,}1211)^{10} - 1}{0{,}1211} = 23092573{,}29 \text{ руб.}$$

Определим цену спроса ($Д_р$) на комплекс ресурсов для реализации проекта по следующей формуле

$$Д_р = \frac{К_t}{(1 + N_D)^{Тэ}} = \frac{23092573{,}29}{(1 + 0{,}1211)^{10}} = 7362559{,}29 \text{ руб.} \quad (5.12)$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений определяется по формуле

$$ET = \sqrt[\text{Тэ}]{\frac{К_t}{Dz}} - 1, \quad (5.13)$$

где D_z – дополнительные эксплуатационные затраты, включающие дополнительные эксплуатационные издержки, составляющие 191070,76 *руб.*, и капитальные вложения равные 2342280 *руб*, D_z = 2533350,76 *руб*.

$$ET = \sqrt[10]{\frac{22129738{,}41}{2533350{,}76}} - 1 = 1{,}12 - 1 = 0{,}12.$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений больше требуемой нормы доходности. Это подчёркивает экономическую целесообразность предложенной модернизации.

Срок окупаемости дополнительных эксплуатационных издержек найдем по следующей формуле

$$T_{ок} = \frac{-\ln \cdot (1 - Dz \cdot \frac{N_D}{P_{rt}})}{\ln \cdot (1 + N_D)} = \frac{-\ln \cdot (1 - 2533350{,}76 \cdot \frac{0{,}1211}{1308929{,}24})}{\ln \cdot (1 + 0{,}1211)} = \frac{0{,}267071}{0{,}11431} = 2{,}3 \text{ года.} \quad (5.14)$$

Результаты расчётов экономической эффективности представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчётов экономической эффективности

Наименование показателя	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Стоимость оборудования, руб.	498000	1951900
Капитальные вложения, руб.	-	2342280
Стоимость реализованной продукции, руб.	136750000	138250000
Прибавка стоимости продукции в год, руб.	-	1500000
Годовой экономический эффект, руб.	-	1308929,24
Коэффициент эффективности капитальных вложений	-	0,12
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	-	2,3

Таким образом, расчеты экономической эффективности предложенного способа озонной обработки семян зерновых культур вместо химических препаратов показал, что при капитальных вложениях 2342280 рублей его срок окупаемости 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 озоновоздушной 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 озоновоздушную смесь в зернохранилище, учитывающая расходные характеристики пневматической системы, объём зернохранилища, концентрацию озона в озоновоздушной смеси и время озонирования, дает возможность на стадии разработки системы озонирования зернохранилища гарантировать равномерность озонной обработки.

4. Полученная зависимость для расчета среднего объёмного расхода озоновоздушной смеси через форсунку учитывает расстояние между форсунками, концентрацию озона в озоновоздушной 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 рацио-

нальная накопительная доза озонной обработки находится в диапазоне от 950 до 2100 *мин·мг/м*^{3}.

6. Озонирование при дозе озонной обработки 7200 мин·мг/м^3 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/м*^{3}.

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 озоновоздушной среды внутри хранилища с автоматическим режимом озонной обработки (патент № 219336 РФ) при дозе от 950 до 2100 *мин·мг/м*^{3} для обеспечения требуемых посевных качеств хранящихся семян зерновых культур, и при дозе 12200 *мин·мг/м*^{3} 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В процессе написания диссертационной работы использовались следующие условные обозначения:

ФГБОУ ВО – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования;

ГАУ – государственный аграрный университет;

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

$C_{озон}$ – концентрация озона в озоновоздушной смеси, *мг/м*^{3};

K_C – константа скорости поглощения озона единицей объёма семян, *мг/м*^{3};

$S_{оз}$ – площадь обрабатываемого зернового материала, *м*^{2};

$V_{см}$ – объём обрабатываемого семенного материала, *м*^{3};

v – скорость движения озоновоздушной смеси, *м/с*;

$C_{ВХ}$ – концентрация озона на входе в семенной материал, *мг/м*^{3};

$C_{ВЫХ}$ – концентрация озона на выходе в семенной материал, *мг/м*^{3};

t – время обработки, *с*;

$\frac{d_c}{d_x}$ – скорость распространения озона по глубине слоя;

b – коэффициент;

$S(X)$ – площадь взаимодействия поверхности семян с озоном в фронте распространения озоновоздушной смеси, *м*^{2};

K_O – величина константы скорости поглощения озона зерном при концентрации озона, равной нулю;

β – константа, характеризующая зависимость скорости поглощения озона от концентрации озона;

$h_{сл}$ – толщина слоя зерна, *мм*;

Ф – производительность озонаторной установки, *мг/ч*;

N_v – производительность вентилятора, *м*^{3}*/ч*;

λ – коэффициент сопротивления трения;

$\rho_{оз}$ – плотность озоновоздушной смеси, *кг/м*^{3};

$R_{зс}$ – сопротивление зернового слоя, зависящее от морфологических свойств семян, *Па*;

L_0 и π – константы;

$K_{t\varphi}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий снижение производительности озонатора при изменении температуры и влажности воздуха;

$T_{воз}$ – температура воздушного потока, *°C*;

$\varphi_{вп}$ – влажность воздушного потока, %;

Q_0 – общее количество озона, подаваемого в ёмкость, *мг*;

Q_1 – количество озона, поглощаемого зерном, *мг*;

Q_2 – количество разлагаемого озона, *мг*;

Q_3 – количество озона, направленное на разложение токсинов, содержащихся в зерновом ворохе, *мг*;

Q_4 – остаточное количество озона, *мг*;

$C_{оз}$ – концентрация озона в насыпи зерна, *ppb*;

$f(t)$ – функция концентрации озона от времени, *ч*;

$f(h)$ – функция концентрации озона от высота насыпи зерна, *см*;

$f(C_0)$ – функция концентрации озона от концентрация озона в приточном воздухе, *ppb*;

$f(w_0)$ – функция концентрации озона от влажностb зерна перед сушкой, %;

$C_{оз.мод.}$ – концентрация озона модифицированная;

$b_{0...}b_{19}$ – коэффициенты регрессии;

k – ядро ковариационной функции;

x_i, x_j – переменные в уравнениях регрессии;

θ – вектор параметризации;

$\sigma_f^{\,2}$ – дисперсия данных;

e – основание натурального логарифма, e = 2,71;

r – показатель степени;

d – количество описываемых участков;

m – номер точки на участке данных;

σ_m^2 – дисперсия данных на участке;

$V_о$ – объём обработанного зернового материала, *мм*^{3};

$r(\varphi, h)$ – зависимость радиуса очага распространения озона в зерне от его высоты h при угле φ поворота радиус-вектора точки или границы обработанной поверхности;

v_V – скорость озонной обработки объема зерна, *мм*^{3}/*с*;

$C_{озр}(t)$ – изменение концентрации (*мг/мм*^{3}) в момент времени t (*с*);

$K_{ор}$ – константа разложения озона, $с^{-1}$;

t_0 – время начала разложения, *с*;

t_1 – размерный коэффициент времени, равный 1 *с*;

$v_{кор}$ – скорость разложения при окончании процесса *мг*/(*мм*$^3 \cdot$ *с*);

$m_{озV}$ – масса озона в озонируемом объеме, *мг*;

$m_{озр}$ – масса разложившегося озона, *мг*;

$m_{озпод}$ – масса озона в поданной смеси, *мг*;

$V_{зм}$ – объем зерновой массы, *мм*^{3};

$V_б$ – объем бункера, *мм*^{3};

$k_{скв}$ – коэффициент скважистости зерна, %;

V – озонируемый объем межзернового пространства, *м*^{3};

$C_{озV}$ – средняя концентрация по объему в процессе смешивания *мг/мм*^{3};

$C_{озр}$ – средняя концентрация озона при разложении, *мг/мм*^{3};

$Q_{под}$ – объемный расход озоновоздушной смеси, *м*^{3}/*с*;

$C_{озпод}$ – средняя концентрации озона на подаче, *мг/мм*^{3};

$S_{пз}$ – площадь поверхности зерновки, *мм*^{3};

$\rho_о$ – парциальная плотность озона, *мг/м*^{3};

$v_д$ – скорость диффузии озона, *мг*/(*с* $\cdot$ *м*)^2;

$V_п$ – объём, поданной озоновоздушной смеси, *мм*^{3};

$v_г$ – скорость гидравлического перемешивания, *мм*^{3}/*с*;

$V_{обр}$ – объём, обрабатываемый одной форсункой, *мм*^{3};

$N_Ф$ – количество форсунок, *шт*;

$V_{сил}$ – объём зернохранилища, *м*^{3};

A – место входа воздуха или озоновоздушной смеси;

B – место выхода воздуха или озоновоздушной смеси;

H – место присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах;

I – внутренняя полость газовода;

$\frac{\partial M}{\partial p}$ – частная производная массы газа по давлению при постоянных температуре и объёме;

$\frac{\partial M}{\partial T}$ – частная производная массы газа по температуре при постоянных давлении и объёме;

p_I – давление газа, *Па*;

T_I – температура объема газа, *К*;

$\dot{m}_A$ и $\dot{m}_B$ – массовые расходы в местах входа (*А)* и выхода (*В)* озоновоздушной смеси, *кг/с*;

$\frac{\partial U}{\partial p}$ – частная производная внутренней энергии объема газа по давлению при постоянных температуре и объеме, *Дж/м*^{3};

$\frac{\partial U}{\partial T}$ – 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 (*А*) и выхода (*В*) воздуха или озоновоздушной смеси, *Дж/с*;

Q_H – тепловой поток в месте присоединения сети моделирования теплообмена в газоводах (*Н*), *Дж/с*;

ρ_I – плотность объема газа, *кг/м*^{3};

$V_г$ – объем газа, *м*^{3};

h_I – удельная энтальпия объема газа, *Дж/кг*;

Z – коэффициент сжимаемости;

R – удельная газовая постоянная, *Дж/(кг · К)*;

c_{pI} – удельная теплоёмкость при постоянном давлении объёма газа, *Дж/(кг · К)*;

p – давление газа в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озоновоздушной смеси или внутренней полости газовода (I), *Па*;

ρ – плотность в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озоновоздушной смеси или внутренней полости газовода (I), *кг/м*^{3};

$S_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения трубы, *мм*^{2};

Δp_{AI} и Δp_{BI} – потери давления из-за вязкого трения, *Па*;

h – удельная энтальпия в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озоновоздушной смеси или внутренней полости газовода (I), *Дж/кг*;

$\mathrm{R}_{\mathrm{e}_A}$ – число Рейнольдса в месте входа воздуха или озоновоздушной смеси (*A*);

$\mathrm{R}_{\mathrm{e}_B}$ – число Рейнольдса в месте выхода воздуха или озоновоздушной смеси (*B*);

D_{Γ} – гидравлический диаметр трубы, *м*;

μ_I – динамическая вязкость во внутреннем узле, *Па · с*;

$f_{\text{форм}}$ – коэффициент формы;

L – длина трубопроводов, *м*;

$L_{\text{экв}}$ – значение совокупной эквивалентной длины местных сопротивлений, *м*;

f_{D} – коэффициент трения Дарси в местах входа (A) и выхода (B) воздуха или озоновоздушной смеси;

$\varepsilon_{\text{шер}}$ – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы, *мм*;

Q_H – общее количество теплоты при теплообмене, *Дж*;

$Q_{\text{конв}}$ – количество теплоты при конвективном теплообмене, *Дж*;

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности трубы, *м*^{2};

T_H – температура стенки трубы при теплообмене, *K*;

$T_{\text{вх}}$ – температура на входе в зависимости от направления потока, *K*;

$\dot{m}_{\text{ср}}$ – средний массовый расход воздуха или озоновоздушной смеси из места входа (A) в место выхода (B), *кг/с*;

$c_{p_{\text{ср}}}$ – удельная теплоёмкость газа, измеренная при средней температуре, *Дж/(кг·К)*;

$k_{\text{ср}}$ – теплопроводность, рассчитанная при средней температуре, *Вт/(м·К)*;

$Pr_{\text{ср}}$ – число Прандтля, рассчитанное при средней температуре;

$\mu_{\text{ср}}$ – динамическая вязкость, оцененная при средней температуре, *Па·с*;

$\hat{p}$ – доля открытия клапана;

p_A – абсолютное давление в месте входа воздуха или озоновоздушной смеси (*A*), *Па*;

p_0 – атмосферное давление, *Па*;

$p_{зад}$ – заданное манометрическое давление срабатывания, *Па*;

Δp – диапазон регулирования давления, *Па*;

$S_{кл}$ – площадь отверстия в клапане, *мм*^{2};

S_i – площадь поперечного сечения в местах входа (*A*) и выхода (*B*) воздуха или озоновоздушной смеси, *мм*^{2};

$C_{ист}$ – коэффициент истечения;

γ – показатель адиабаты;

$B_{лам}$ – критическое отношение давлений для ламинарного течения, *Па*;

$\rho_{ср}$ – среднее значение плотности, *кг/м*^{3};

$p_{ср}$ – среднее значение давления, *Па*;

$p_{вх}$ и $p_{вых}$ – давления на входе и выходе, *Па*;

p_B – абсолютное давление в месте выхода воздуха или озоновоздушной смеси (*B*), *Па*;

$p_{зад}$ – заданное манометрическое давление начала срабатывания клапана, *Па*;

Δp – диапазон регулирования давления, *Па*;

D – константа диффузии, *мм*^{2}/*с*;

$h_о$ – высота объёма, в который поступает озоновоздушная смесь из двух форсунок, *мм*;

l – расстояние между форсунками, *мм*;

$l/2$ – расстояние от источника до стенок емкости, *мм*;

$V_п$ – объем озоновоздушной смеси, попадающий в ёмкость из каждой форсунки, *мм*^{3};

$m_п$ – масса поданного озона, *мг*;

$t_к$ – время выравнивания концентраций, *с*;

$Q_{пс}$ – средний объемный расход озоновоздушной смеси через форсунку, *м*^{3}/*с*;

D_c – доза озона озонной обработки, *мин*·*мг/м*^{3};

KI – йодид калия;

O_3 – молекулярный озон;

H_2O – вода;

I_2 – молекулярный йод;

KOH – гидроксид калия;

O_2 – молекулярный кислород;

N – содержание массовой доли белка, %;

a – количество раствора серной кислоты, взятой на анализ, *см³*;

b – количество раствора гидроксида натрия, пошедшего на титрование избытка кислоты, *см³*;

$О_с$ – общая стекловидность зерна в процентном отношении, %;

$С_т$ – количество полностью стекловидных, *шт*;

$Ч_{ст}$ – количество частично стекловидных зерен, *шт*;

$В_л$ – лабораторная всхожесть семян, %;

$Э_п$ – энергия прорастания семян, %;

$d_\sum$ – суммарная доза озонной обработки за весь эксперимент, *мин·мг/м³*;

$З_{Alt}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода Alternaria, %;

$З_{Fus}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода Fusarium, %;

$З_{Hel}$ – зараженность семян грибковыми заболеваниями рода Helminthosporium, %;

A_m – затраты на амортизацию, *руб*;

$С_б$ – затраты на оборудование для базового варианта;

$С_п$ – затраты на оборудование для проектируемого варианта;

N_a – годовая норма амортизации, %;

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

N_p – ежегодная норма отчисления на ремонт и техническое обслуживание оборудование, %;

$С_{эл}$ – затраты на электроэнергию, *руб*.;

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

$Ц_{эл}$ – средняя цена 1 кВт·ч в России для сельхозпроизводителей, *руб*.;

$Э_и$ – дополнительные эксплуатационные издержки, *руб*.;

K_t – экономический эффект за срок эксплуатации, *руб*.;

$T_э$ – срок эксплуатации оборудования, *лет*;

N_D – требуемая норма доходности, %;

D_z – дополнительные эксплуатационные затраты, *руб*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева В.Н. Влияние обработки озоном на физиологические параметры пшеницы / В.Н. Авдеева, Ю.А. Безгина, С.И. Любая // Научное обозрение. Сельскохозяйственные науки. – 2016. – № 1. – С. 9.

2. Авдеева В.Н. Влияние озона на качественные показатели озимой пшеницы / В.Н. Авдеева, Ю.А. Безгина // Аграрная наука, образование, производство: актуальные вопросы: сборник трудов всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием (Россия, Томск, 24 апреля 2014 г). – Новосибирск: Новосибирский ГАУ, 2014. – С. 131-133.

3. Авдеева В.Н. Воздействие озонированного воздуха на качественные показатели пшеницы / В.Н. Авдеева, Ю.А. Безгина // Вестник АПК Ставрополья.– 2013. – № 2 (10). – С. 97-100.

4. Авдеева В.Н. Предпосевная обработка семян озимой пшеницы озоном / В.Н. Авдеева, Г.П. Стародубцева, С.И. Любая // Главный агроном. – 2009. – №5.– С. 22-24.

5. Авдеева В.Н. Предпосевная обработка семян пшеницы озоном / В.Н. Авдеева, Г.П. Стародубцева, С.И. Любая // Аграрная наука. – 2008. – № 5. – С.19-20.

6. Авдеева В.Н. Применение озона для предпосевной обработки зерна пшеницы / В.Н. Авдеева, Д.С. Толстов // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: материалы 78 науч.-практ. конф. (Россия, Ставрополь, 01 марта – 01 мая 2014 г.). – Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2014. – С.19-20.

7. Авдеева В.Н. Применение экологических методов подавления патогенной микофлоры зерна озимой пшеницы при хранении: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / В.Н. Авдеева. – Ставрополь, 2009. – 24 с.

8. Авдеева В.Н. Экологический метод обработки семян пшеницы с целью повышения их посевных качеств / В.Н. Авдеева, А.Г. Молчанов, Ю.А. Безгина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 390.

9. Анализ эффективности предпосевного 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 научн.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 29–30 апреля 2021 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 109-117.

10. Баскаков И.В. Преимущества использования процесса озонирования в растениеводстве / И.В. Баскаков, А.П. Тарасенко, Р.Л. Чишко // Наука и образование в современных условиях: материалы науч. конф. (Россия, Воронеж, 10 марта – 22 апреля 2016 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 173-178.

11. Баскаков И.В. Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала: дис. … д-ра с.-х. наук: 05.20.01 / Баскаков Иван Васильевич. – Воронеж, 2019. – 339 с.

12. Бекузарова С.А. Озонирование семян клевера лугового / С.А. Бекузарова, И. А. Шабанова // Наука и мир. – 2020. – № 7(83). – С. 27-31.

13. Бровенко В.И. Хранение и вентилирование зерна пшеницы в металлических силосах с аэрожелобами закрытого типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.03 / Бровенко Василий Иванович. – М., 1984. – 230 с.

14. Васильчук Н.С. Предпосевная обработка семян озоном / Н.С. Васильчук, И.В. Шестерин // Агро XXI. – 2003. – № 7-12. – С. 67.

15. Верификация экспоненциального закона разложения озона через константу разложения / И.А. Пожидаев, А.Д. Головин, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в Центральной России. – 2025. – Т. 73, № 2. – С. 143-151. – DOI:10.35887/2305-2538-2025-2-143-151.

16. 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: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 55-60.

17. Влияние озонной обработки на заражённость зерна озимой пшеницы микофлорой / И.В. Баскаков, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев [и др.] // Наука в Цен-

тральной России. – 2024. – Т.72, №6. – С. 7-18. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-6-7-18.

18. Влияние озонной обработки на посевной материал различных сельскохозяйственных культур / А.Д. Головин, И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, А.И. Королев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 12 февраля 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 203-207.

19. Влияние озонной обработки на скорость убыли массы сталей / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 29 ноября 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 117-121.

20. Влияние предпосевного озонирования семян на урожайность сельскохозяйственных культур / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т.12, № 4 (63). – С. 13-20. – DOI: 10.17238/issn2071-2243.2019.4.13.

21. Влияние процесса озонирования на качественные показатели зерна озимой пшеницы / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – № 1. – С. 177-189. – DOI 10.36107/spfp.2023.396.

22. Влияние системы озонирования при сушке зерна на здоровье персонала / А.С. Гончаров, С.А. Афонин, С.К. Внуков [и др.] // Проблемы совершенствования машин, оборудования и технологий в агропромышленном комплексе: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Воронеж, 23-24 октября 2019 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 352-355.

23. Влияние способа хранения семенного зерна на структуру его естественных потерь / А.Н. Зазуля, М.Б. Латышенок, В.А. Макаров [и др.] // Наука в центральной России. – 2021. – № 4(52). – С. 5-12. – DOI: 10.35887/2305-2538-2021-4-5-12.

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

25. Вобликов Е.М. Зернохранилища и технологии элеваторной промышленности: учебное пособие / Е.М. Вобликов. – СПб.: Издательство «Лань», 2005. – 208 с.

26. Выбор источника для УФ-облучения зерна на установке ленточного типа / В.Ю. Страхов, В.Ф. Сторчевой, Ю.В. Саенко [и др.]// Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 59-67. – DOI: 10.26897/2687-1149-2024-4-59-67.

27. 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: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 29-37.

28. 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: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 55-66.

29. Головин А.Д. Оценка эффективности предпосевного озонирования семян нута / А.Д. Головин, А.С. Корнев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 22-29.

30. Головин А.Д. Экономическая оценка эффективности предпосевного озонирования семян озимой пшеницы / А.Д. Головин, В.В. Кочергин, И.Г. Жарковская // Развитие отраслей АПК на основе формирования эффективно-

го механизма хозяйствования: сборник научных трудов III междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Киров, 17 ноября 2021 г.). – Киров: Вятский ГАУ, 2021. – С. 88-92.

31. Голота В.И. Основы озоновоздушной технологии подготовки семян к посевной / В.И. Голота, В.П. Петренкова, Г.В. Таран // Научная жизнь. – 2014. – № 5. – С. 62-72.

32. Горский И.В. Обработка семян пшеницы озонированным воздухом: дис. … канд. техн. наук: 05.20.02 / Горский Илья Всеволодович. – М., 2004. – 202 с.

33. ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка: введ. 01.06.1993. – М.: Стандартинформ, 2009. – 7 с.

34. ГОСТ 10987-76 Зерно. Методы определения стекловидности: введ. 01.06.1977. – М.: Стандартинформ, 2009. – 3 с.

35. ГОСТ 12036-85 Семена сельскохозяйственных культур. Правила приёмки и методы отбора проб: введ. 01.07.1986. – М.: Стандартинформ, 2011. – С. 5-14.

36. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: введ. 01.07.1986. – М.: Стандартинформ, 2011. – С. 36-64.

37. ГОСТ 12044-93 Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения заражённости болезнями: введ. 01.01.1995. – М.: Стандартинформ, 2011. – С. 162-163.

38. ГОСТ Р 51706-2001 Оборудование озонаторное. Требования безопасности: введ. 01.01.2002. – М.: Стандартинформ, 2001. – 5 с.

39. ГОСТ Р 54478-2011 Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице: введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ, 2012. – С. 1-12.

40. Динамика развития насекомых-вредителей и микроорганизмов в семенном зерне в герметичном контейнере с разреженной воздушной средой / Н.М. Латышенок, М.Б. Латышенок, В.А. Макаров [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 99-107. – DOI: 10.36508/RSATU.2022.31.47.012.

41. Донсков А. П. Особенности влияния озона на показатели качества зерновых культур / А.П. Донсков, А.П. Волошин, С.П. Волошин // Инновационная наука. – 2018. – № 4. – С. 28-30.

42. Дубцова А.А. Влияние озонирования семян на рост и развитие растений льна обыкновенного (*Linum usitatissimum L.*) / А.А. Дубцова, А.В. Чурмасов // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. – 2015. – № 2(162). – С. 93-98.

43. Дулов М.И. Лабораторный практикум по технологии хранения продукции растениеводства: учебное пособие / М.И. Дулов, А.П. Журавлев, Л.А. Журавлева. – Самара, 2007. – 274 с.

44. Изменение концентрации озона в ворохе зерна кукурузы / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – Вып. 4 (59). – С. 134-140. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.134.

45. Изменение содержания белка в зерне пшеницы твёрдой яровой в процессе селекции высокоурожайных сортов / М.Г. Мясникова, П.Н. Мальчиков, Е.Н. Шаболкина [и др.] // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2019. – № 4(32). – С. 112-119. – DOI: 10.24411/2309-348X-2019-11141.

46. Использование процесса озонирования при предпосевной обработке семян / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.П. Тарасенко [и др.] // Наука вчера, сегодня, завтра: материалы науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 5-9 сентября 2016 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 10-23.

47. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян / Д.А. Нормов, Д.В. Пожидаев, Р.В. Волов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 1438-1451.

48. Исследование предпосевного озонирования семян / В.Ю. Кирмасов, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.И. Королев // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы нацио-

нальной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 01 октября 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 19-26.

49. Ишков Н.И. Влияние озонирования семян на урожайность сельскохозяйственных культур / Н.И. Ишков // Молодежь и XXI век – 2021: материалы XI междунар. молодежной науч. конф. (Россия, Курск, 18-19 февраля 2021 г.). – Т. 6. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 261-264.

50. 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.

51. К вопросу применения озоновоздушной смеси при дезинсекции вредителей зерна / И.А. Пожидаев, А.Д. Головин, В.В. Кочергин [и др.] // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 24-25 ноября 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 186-191.

52. К вопросу хранения семенного зерна в вакуум-контейнере / М.Б. Латышенок, В.А. Макаров, Н.М. Латышенок [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68, № 2(43). – С. 62-67. – DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-2-62-67.

53. Касьянов П. Ф. Влияние водного раствора озона на и посевные качества семян / П.Ф. Касьянов // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 2-4(11). – С. 59-62.

54. Кечкин И.А. Особенности хранения зерна злаковых культур в металлических силосах и его охлаждение активным вентилированием / И.А. Кечкин // Современные подходы к получению и переработке сельскохозяйственной продукции – гарантия продовольственной независимости России: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов отделения с.-х. наук Российской академии наук. – М.: ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, 2016. – С. 131-134.

55. Кечкин И.А. Хранение зерна в металлическом силосе вместимостью 10000 тонн / И.А. Кечкин // Инновационно-технологическое развитие пищевой промышленности – тенденции, стратегии, вызовы: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённая памяти Василия Матвеевича Горбатова (Россия, Москва 6 декабря 2018 г.). – М.: ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, 2018. – С. 104-106.

56. Комбинированная система озонирования при стерилизации молока / А.Е. Компаниец, В.Ф. Сторчевой, Ю.А. Судник [и др.] // Агроинженерия. – 2021. – № 6(106). – С. 62-67. – DOI 10.26897/2687-1149-2021-6-62-67.

57. Кондратьева Н.П. Применение ультрафиолета для предпосевной обработки семян / Н.П. Кондратьева, В.Ф. Сторчевой, Р.Г. Большин // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 59-65. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-5-59-65.

58. Крупнова О.В. О взаимосвязи урожайности с содержанием белка в зерне у зерновых и бобовых культур / О.В. Крупнова // Сельскохозяйственная биология. – 2009. – Т. 44, № 3. – С. 13-23.

59. Курылева А.Г. Эффективность ультрафиолетового облучения семян зерновых культур / А.Г. Курылева, Н.П. Кондратьева // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 4(28). – С. 47-52.

60. Латышенок Н.М. Перспективы применения электронного блока управления аэрацией зерна в контейнерах с регулируемой газовой средой / Н.М. Латышенок // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 95-102. – DOI: 10.36508/RSATU.2021.50.2.013.

61. Морозова Т.М. Особенности влияния предпосевного озонирования семян на повышение урожайности и показатели качества зерна яровой пшеницы / Т.М. Морозова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2020. – С. 51-54. – DOI: 10.24411/2078-1318-2020-13051.

62. Нормов Д.А. Анализ существующих научных гипотез по влиянию озоновоздушной обработки на семена сельскохозяйственных растений / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, И.И. Федоров // Политематический сетевой элек-

тронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 116. – С. 424-434.

63. Нормов Д.А. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – №101. – С. 1897-1907.

64. Нормов Д.А. Механизм воздействия озоновоздушной смеси на семена кукурузы и методика проведения экспериментального исследования влияния электроозонирования на ростовые процессы семян / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Сапрунова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №105. – С. 775-787.

65. Нормов Д.А. Озон в отраслях АПК / Д.А. Нормов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. науч. тр. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2002. – С. 86-89.

66. Обзор устройств по озонной дезинсекции вредителей зерна / И.В. Баскаков, А.В. Химченко, В.И. Оробинский [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 06-07 июня 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 94-104.

67. Обоснование режимов проращивания зерна на установках периодического и непрерывного действия / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.С. Широков [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 3(78). – С. 169-177. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_169.

68. Озонирование как физический метод повышения способности семян к прорастанию / А.А. Гаврилова, О.А. Шарабаева, Г.Ю. Ткаченко, А.В. Чурмасов // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29. – № 2. – С. 21-23.

69. 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: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 115-119.

70. Оробинский В.И. Снижение травмирования зерна при уборке: монография / В.И. Оробинский, И.В. Баскаков, А.В. Чернышов. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 161 с.

71. Оробинский В.И. Совершенствование технологии послеуборочной обработки семян фракционированием и технических средств для её реализации: дис. ... д-ра с.-х. наук: 05.20.01 / Оробинский Владимир Иванович; [Место защиты: ФГОУ ВПО Воронежский гос. аграрный ун-т им. К.Д. Глинки]. – Воронеж, 2007. – 334 с.

72. Осман М.А.М. Озон – альтернатива фумигантам / М.А.М. Осман, Г.А. Закладной // Защита и карантин растений. – 2008. – № 3. – С. 56.

73. Оськин С.В. Предпосевная обработка семян озоном / С.В. Оськин, Д.А. Нормов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 11. – С. 7.

74. 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 междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Россия, Воронеж, 12–13 ноября 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 197-202.

75. Павлов А.Н. Повышение содержания белка в зерне / А.Н. Павлов. – М.: Наука, 1984. – 119 с.

76. Патент РФ на изобретение № 2248111 С1, МПК A01C 1/00. Способ обработки семян сельскохозяйственных культур / Д.А. Нормов, С.В. Оськин, А.А. Шевченко, Е.А. Сапрунова (РФ); патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). – № 2003123158/13: заявлено 22.07.2003: опубл. 20.03.2005. – Бюл. № 8. – 4 с.

77. Патент РФ на изобретение № 2341924 С2, МПК A01C 1/00. Устройство для обработки семян озоном / В.А. Савельев, А.Х. Газиев (РФ); патентообладатель ФГОУ ВПО Курганская государственная сельскохозяйственная академия

имени Т.С. Мальцева (RU). – № 2006145271/13: заявлено 19.12.2006: опубл. 27.12. 2008. – Бюл. № 38. – 4 с.

78. Патент РФ на изобретение № 2556703 С2, МПК А01С 1/00. Способ и устройство для обработки семян озоном / Н.И. Пуресев, Е.А. Гордееня, О.А. Пуресева [и др.] (РФ); патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Истра-Озон» (RU). – № 2013139500/13: заявлено 27.08.2013: опубл. 20.07.2015. – Бюл. № 20. – 9 с.

79. Патент РФ на изобретение № 2659904 С1, МПК А01С 1/00, А01F 25/14. Хранилище семян / Р.Л. Чишко, А.П. Тарасенко, И.В. Баскаков [и др.] (РФ); патентообладатель: ФБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). – № 2017111422: заявлено 04.04.2017: опубл. 05.07.2018. – Бюл. № 19. – 7 с.

80. Патент РФ на полезную модель № 219219 U1, МПК А01F 25/14 (2006.01). Устройство для хранения зерна / И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель: ФБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). – № 2023107027: заявлено 23.03.2023: опубл. 05.07.2023. – Бюл. № 19. – 6 с.

81. Патент РФ на полезную модель № 219336 U1, МПК А01F 25/14 (2006.01). Устройство для хранения зерна: / А.Д. Головин, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель: ФБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). – № 2023109316: заявлено 12.04.2023: опубл. 12.07.2023. – Бюл. № 20. – 5 с.

82. Патент РФ на полезную модель № 223519 U1, МПК А01D 41/12, А01F 12/60 (2006/01). Бункер зернового комбайна / А.Д. Головин, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель ФБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). – № 2023128000; заявлено 31.10.2023; опубл. 22.02.2024. – Бюл. № 6. – 5 с.

83. Перспективы использования озона для обработки сельскохозяйственной продукции / В.В. Кочергин, И.В. Баскаков, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 75-й национальной науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 15 февраля – 31 марта 2024 г.). – Ч.I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 372-376.

84. Перспективы применения озона в сельском хозяйстве / В.В. Кочергин, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев [и др.] // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 72-й национальной науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 01-31 апреля 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 200-205.

85. Пинчук Л. Г. Оценка белковистости зерна яровой мягкой пшеницы под влиянием предпосевного озонирования семян в Кузнецкой лесостепи / Л.Г. Пинчук, М.А. Сигачева, С.Б. Гридина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 9(119). – С. 5-8.

86. Повышение эффективности хранения семенного зерна в малых крестьянско-фермерских хозяйствах / Н.М. Латышенок, А.В. Шемякин, М.Б. Латышенок [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 144-151. – DOI: 10.36508/RSATU.2021.77.50.018.

87. Применение озонаторных установок в сельском хозяйстве и факторы, влияющие на здоровье человека при работе с озоном / А.С. Корнев, А.Д Головин, В.В. Кочергин, И.А. Пожидаев // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Россия, Воронеж, 11-12 ноября 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 236-240.

88. Применение процесса озонирования в отраслях / И.Н. Стаканов, В.В. Чистохвалов, В.И. Оробинский, И.В. Баскаков // Молодёжный вектор развития аграрной науки: материалы 68-й студенческой науч. конф. (Россия, Воронеж, март – июнь 2017 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. –

С. 269-275.

89. Причины порчи зерна и семян при хранении / А.В. Гречкин Н.А. Хорошева, О.Т. Чернышова [и др.] // Молодёжный вектор развития аграрной науки: материалы 70-й студенческой науч. конф. (Россия, Воронеж, 01 февраля – 01 июня 2019 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 73-77.

90. Распределение озоновоздушной смеси в зерне / А.Д. Головин, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, И.А. Пожидаев // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы междунар. научн.-прак. конф. (Россия, Воронеж, 30 ноября 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 168-174.

91. Распространение озонных технологий в сельском хозяйстве / А.С. Гончаров, С.А. Афонин, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Молодёжный вектор развития аграрной науки: материалы 70-й студенческой науч. конф. (Россия, Воронеж, 01 февраля – 01 июня 2019 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 245-251.

92. Расчет лабораторной всхожести семян при предпосевной озонной обработке и автоматизация определения рациональной дозы озона / А.Д. Головин, А.В. Химченко, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научн.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 01 марта – 28 апреля 2023 г.). – Ч. V. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 19-27.

93. Рациональные режимы предпосевной озонной обработки семян зерновых культур / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, В.В. Василенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 4 (67). – С. 105-114. – DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.105.

94. Результаты экспериментальных исследований по влиянию ультрафиолетового и инфракрасного излучения на всхожесть семян красного клевера / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, П.А. Лобынцев [и др.] // Вестник Рязанского государ-

ственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 78-84. – DOI: 10.36508/RSATU.2022.62.33.010.

95. Саеед Е.К.М. Биологическая активность озона как средства дезинсекции хранящегося зерна: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11 / Саеед Емад Касим Мохаммад. – М., 2004. – 134 с.

96. 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 государственный аграрный университет имени императора Петра 1» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). – № 2023610411; заявлено 17.01.2023; опубл. 17.01.2023. – Бюл. № 1. – 1 с.

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

98. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2024690908. Имитационная модель пневматической системы устройства для озонирования семян в бункере / А.Д. Головин, А.В. Химченко, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский И.А. Пожидаев (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024690849; заявлено 18.12.2024; опубл. 18.12.2024. – Бюл. № 12. – 1 с.

99. 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, В.И. Оробинский И.А. Пожидаев (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2025683100; заявлено 05.09.2025; опубл. 05.09.2025. – Бюл. № 9. – 1 с.

100. 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, В.И. Оробинский, И.А. Пожидаев (РФ); патентообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2025684791; заявлено 22.09.2025. опубл. 22.09.2025. Бюл. № 10. – 1 с.

101. Сигачева М.А. Предпосевное озонирование семян как фактор влияния на качество зерна яровой пшеницы / М.А. Сигачева, Л.Г. Пинчук, С.Б. Гридина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 3(101). – С 21-24.

102. Сигачева М.А. Урожайность яровой мягкой пшеницы и ее структура при предпосевном озонировании семян в лесостепи Кузнецкой котловины / М.А. Сигачева, Л. Г. Пинчук // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 7. – С. 24-26.

103. Современные методы хранения зерна в хранилищах силосного типа / И.В. Баскаков, А.В. Чернышов, Р.Л. Чишко [и др.] // Инновационные технологии и технические средства для агропромышленного комплекса: материалы науч. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Россия, Воронеж, 30 марта – 01 июня 2015 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – С. 15-20.

104. Современные технологии хранения зерна в хозяйствах: учеб. пособие / А.П. Тарасенко, И.В. Баскаков, А.В. Чернышов [и др.]. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2014. – 135 с.

105. Сорокин А.Н. Влияние обработки озоновоздушным потоком на посевные качества семян зерновых культур / А.Н. Сорокин // Актуальные проблемы науки и агропромышленном комплексе: материалы 68-й междунар. науч.-практ. конф. – Т.1. – Караваево: Костромская ГСХА, 2017. – С. 74-79.

106. Сорокин А.Н. Влияние предпосевного озонирования семян на эффективность производства зелёной массы клевера лугового / А.Н. Сорокин,

Т.М. Морозова // Вестник АПК Верхневолжья. – 2019. – №3 (47). – С. 17-21. – DOI: 10.35694/YARCX.2019.47.3.004.

107. Сторчевой В.Ф. Параметры режима работы электроактиватора для дезинфекции и роста овощных растений / В.Ф. Сторчевой, Д.А. Гуров // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 63-68. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-2-63-68.

108. Сторчевой В.Ф. Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля / В.Ф. Сторчевой, Ю.А. Судник, А.Н. Мануйленко // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 66-73. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-5-66-73.

109. Страхов В.Ю. Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин, Ю.В. Саенко // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 46-52. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-46-52.

110. Страхов В.Ю. Экспериментальные исследования по применению ультрафиолетового излучения при предпосевной обработке семян сои для проращивания на витаминный корм / В.Ю. Страхов, С.В. Вендин, Ю.В. Саенко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 108-115.

111. Стрижова Ф.М. Реакция сортов яровой мягкой пшеницы на различные условия произрастания: монография / Ф.М. Стрижова, Ю.Н. Титов, В.М. Стрижов. – Барнаул, 2009. – 150 с.

112. Тарасенко А.П. Влияние влажности зерна при уборке и послеуборочной обработке на его травмирование / А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, М.Э. Мерчалова // Зерновые культуры. Зерновой хозяйство. – 1999. – № 4. – С. 22-24.

113. Тарасенко А.П. Совершенствование послеуборочной обработки семян зерновых культур / А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, М.Э. Мерчалова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 12. – С. 27-28.

114. Тарасенко А.П. Совершенствование технологии послеуборочной обработки зерна / А.П. Тарасенко, М.Э. Мерчалова, И.В. Баскаков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2009. – Вып. 3(22). – С. 22-25.

115. Теоретические аспекты взаимодействия озона с зерном / И.А. Пожидаев, А.Д. Головин, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в Центральной России. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 90-101. – DOI:10.35887/2305-2538-2024-1-90-101.

116. 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.

117. 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.

118. Тертышная Ю.В. Воздействие ультрафиолетового излучения на всхожесть и ростовые процессы семян пшеницы / Ю.В. Тертышная, Н.С. Левина, О.В. Елизарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 2. – С. 31-36. – DOI: 10.22314/207375992017.2.3136.

119. Трушкин В.А. Перспективы использования озона в сельскохозяйственном производстве / В.А. Трушкин, С.В. Шлюпиков, Т.И. Третьякова // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы X национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием (Россия, Саратов, 22 апреля 2019 г.). – Саратов: Изд-во ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 228-232.

120. Тышкевич Е.В. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы озоновоздушным агентом / Е.В. Тышкевич, С.А. Шабин, Н.Л. Виноградова // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. – 2015. – №4 (44). – С. 210-214.

121. Улучшение качества семян при послеуборочной обработке / В.И. Оробинский, Е.А. Кондобарова, А.Д. Головин, Д.А. Подорванов // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы национальной науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 01 октября 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 13-18.

122. Уточнение модели разложения озона на основе идентификации параметров динамического процесса озонной обработки сельскохозяйственной продукции / И.А. Пожидаев, А.Д. Головин, А.В. Химченко [и др.] // Наука в Центральной России. – 2025. – Т.75, №3. – С. 34-42. – DOI: 10.35887/2305-2538-2025-3-34-42.

123. Халецкий В.Н. Перспективы применения озонирования для предпосевной подготовки семян сои / В.Н. Халецкий, А.Д. Кравчук, А.М. Миронов // Стратегия и приоритеты развития земледелия и селекции полевых культур в Беларуси: материалы междунар. науч.-практ. конф. посвященной 90-летию со дня основания РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» (Беларусь, Жодино, 05–06 июля 2017 г.). – Жодино: ИВЦ Минфина, 2017. – С. 143-146.

124. Чернышов А.В. Повышение эффективности подготовки товарного и семенного зерна на решётных станах зерноочистительных машин: монография / А.В. Чернышов, А.М. Гиевский. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – 159 с.

125. Чишко Р.Л. Оценка травмирования семян гречихи при прохождении через хранилище силосного типа / Р.Л. Чишко // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы междунар. научн.-практ. конф., посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (Россия, Воронеж, 25 декабря 2015 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – С. 127-131.

126. Шевченко А.А. Исследование влияния озона на ростовые процессы семян кукурузы / А.А. Шевченко, Е.А. Сапрунова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 105. – С. 760-774.

127. Шевченко А.А. Технико-экономическое обоснование применения озона для предпосевной обработки семян кукурузы / А.А. Шевченко,

Е.А. Сапрунова, А.А. Мумро // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 104. – С. 251-262.

128. Шестерин И.В. Влияние озона и протравителей на посевные качества и оздоровление яровой пшеницы: автореф. дис. … канд. с.-х. наук: 06.01.05, 06.01.11 / Шестерин Игорь Валерьевич. – Саратов, 2004. – 26 с.

129. Энергосберегающие технологии в сельском хозяйстве / А.А. Слободскова, Е.С. Семина, Н.М. Латышенок [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 171-177. – DOI: 10.36508/RSATU.2024.71.49.022.

130. Этапы развития и перспективы совершенствования технологических линий для послеуборочной обработки зерна и семян / Д.А. Подорванов, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев [и др.] // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 72-й национальной науч.-прак. конф. студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2021 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 195-200.

131. Aboltins A. Grain active ventilation using ozonized air / A. Aboltins, J. Palabinskis, A. Lauva // Acta Horticulturae. – 2010. – Vol. 858(69). – Pp. 449-455. DOI:10.17660/ActaHortic.2010.858.69.

132. Application of ozone in grain processing / B.K. Tiwari, C.S. Brennan, T. Curran, E. Gallagher, P.J. Cullen, C.P. O’ Donnell // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 51(3). – Pp. 248-255. – DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

133. Audet Charles. Analysis of Generalized Pattern Searches / Audet Charles, J. E. Dennis Jr. // SIAM Journal on Optimization. – 2003. – Vol. 13(3). – Pp. 889-903. – DOI: 10.1137/S1052623400378742.

134. Beater P. Pneumatic Drives. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. – 324 p.

135. Cengel Y.A., Heat and Mass Transfer – A Practical Approach. 3rd Ed, Section 8.5. McGraw-Hill, 2007. – 901 p.

136. Efficiency and fumigation characteristics of ozone in stored corn / S.A. Kells, L.J. Mason, D.E. Mayer, K.P. Voloshuk // Journal of Stored Products Research. – 2001. – Vol. 37(4). – Pp. 371-382. – DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

137. Fritsch F.N. Monotone Piecewise Cubic Interpolation. / F.N. Fritsch, R.E. Carlson // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1980. – Vol. 17(2). – Pp.238-246. – DOI: 10.1137/0717021.

138. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 488. – №. 012007. – 6 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007.

139. Kahaner D. Numerical Methods and Software. Upper Saddle River / D. Kahaner, C. Moler, S. Nash. – New Jersey: Prentice Hall, 1988. – 495 p. – DOI: 10.1137/1033033

140. Modelling the ozone penetration in a grain layer. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management / A. Steponavičienė, D. Steponavičius, A. Raila, A. Kemzūraitė. – Vol. 20(4). – Pp. 292-300. – DOI:10.3846/16486897.2011.645826.

141. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov, V.A. Gulevsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (Russia, Omsk, 29-30 March, 2021). – IOPublishing Ltd, 2022. – Vol. 954. – №012009. – 5 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012009.

142. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks / R.M. Nel. – London: Springer Limited London, 2012. – 204 p. – DOI: 10.1007/978-1-4612-0745-0.

143. Rasmussen C.E. Gaussian Processes for Machine Learning. / C.E. Rasmussen, C.K.I. Williams. – Cambridge: MIT Press, 2006 – 272 p. – DOI: 10.1142/S0129065704001899.

144. Seed refinement in the harvesting and post-harvesting process / V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, I.V. Baskakov, A.V. Chernyshov // Advances in engineering research: international conference on smart solutions for agriculture (Agro-Smart 2018). – 2018. – Vol. 151. – Pp. 870-874.

145. Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide. Math- Works: Documentation R. 2022a. – Math Works, 2022. – 10346 p.

146. Studies of the ozonation process when drying grain / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky [et al.] // IOP Conference Series. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (Russia, Voronezh, October 17-18, 2019). –Institute of Physics Publishing, 2020. – Vol. 422. – №012009. – 9 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012009.

147. The penetration of ozone into the columns of stored grain and the effect on the chemical composition and processing performance / F. Mendes, D.E. Mayer, L.J. Mason, K.P. Voloshuk // Journal of Stored Products Research. – 2003. – Vol. 39(1). – Pp. 33-44. – DOI:10.1016/s0022-474x(02)00015-2.

148. White F.M. Fluid Mechanics. 7th Ed, Section 6.8. McGraw-Hill, 2011. – 862 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Внедрение научных исследований в производственный процесс

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»
_____ Агибалов А.В.

Акт о внедрении научно-исследовательской работы

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» подтверждает, что учебно-научно-технологическим центром «Агротехнология» при хранении семян зерновых культур использован процесс озонной обработки, рекомендованный аспирантом ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» Головиным А.Д.

Во время хранения семян зерновых культур были проведены исследования о влиянии озонной обработки на их посевные качества. В ходе исследования выявлено, что в течение четырех месяцев хранения семян зерновых культур использование периодической озонной обработки при накопительной дозе озонирования 1680 *мин·мг/м*^{3}, достигнутой при восьмикратном озонировании семян, позволяет увеличить их энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян на 4 и 3,5% соответственно по сравнению с контрольным вариантом, не подвергавшемуся озонированию. Режимы озонной обработки семян зерновых культур обоснованы Головиным Антоном Дмитриевичем.

Учитывая положительный эффект от озонной обработки семян зерновых культур при хранении, считаем целесообразным в дальнейшем использовать данную технологию при хранении посевного материала в УНТЦ «Агротехнология». Предприятиям АПК рекомендуется интегрировать в процесс хранения семян зерновых культур результаты научных исследований по озонной обработки хранящегося посевного материала, опубликованных аспирантом Головиным А.Д. в диссертационной работе.

Представители
учебно-научно-технологического
центра «Агротехнология:
директор
_____ Лобастов А.А.
агроном
_____ Власова Л.М.

Представители
кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ
ВО Воронежский ГАУ:
профессор
_____ Баскаков И.В.
профессор
_____ Оробинский В.И.

Продолжение приложения А

УТВЕРЖДАЮ
И.о главы КФХ «Виктория»
Дедова О.М.
«08» 07 2025г

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»
Агибалов А.В.
«08» 07 2025г

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

КФХ «Виктория» подтверждает, что аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» Головин А.Д. предоставил предприятию результаты научного исследования по совершенствованию технологического процесса хранения семян зерновых культур в регулируемой озоновоздушной среде.

На базе КФХ «Виктория» были проведены исследования о влиянии процесса озонирования на семена зерновых культур при хранении. В процессе хранения сравнивали вентиляцию посевного материала атмосферным воздухом и озоновоздушной смесью. В результате удалось установить, что использование периодической аэрации озоном семян зерновых культур позволит увеличить их энергию прорастания и лабораторную всхожесть на 3,5 и 3,25% соответственно относительно варианта вентилирования атмосферным воздухом. При этом доза озонирования, получившаяся посредством семикратной обработки, составила 1140 *мин·мг/м*^{3}. Режимы озонной обработки семян зерновых культур обоснованы аспирантом ФБОУ ВО Воронежский ГАУ Головиным Антоном Дмитриевичем.

Учитывая важность рассматриваемой проблемы, улучшение условий хранения семян зерновых культур, считаем необходимым дальнейшее внедрение в производство процесса озонирования. Переданные материалы исследований представляют несомненный интерес, имеют теоретическую значимость, научную новизну, способствуют повышению качественных показателей посевного материала и рекомендуются для внедрения на предприятиях АПК. При обосновании разработанных режимов озонной обработки семян зерновых культур рекомендуем использовать результаты исследований аспиранта Головина Антона Дмитриевича, которые опубликованы в различных научных изданиях и его диссертационной работе.

Представители
Крестьянского (фермерского)
хозяйства «Виктория»:
механик
Анохин А.В.

Представители
кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:
профессор
Баскаков И.В.

профессор
Оробинский В.И.

Продолжение приложения А

KOBLiK GROUP

ООО «Воронежсельмаш»
ИНН/КПП 3664104210/366301001
ОГРН 1103668017551
р/с 40702810500000038458
БИК 044525700,
АО «Райффайзенбанк», г. Москва
К/с 30101810200000000700
юридический и почтовый адрес:
394056, РФ, г. Воронеж,
ул. Солдатское поле, 285/5

Председателю диссертационного совета на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 35.2.008.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» Оробинскому В.И.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «Воронежсельмаш», представляющая группу компаний «KOBLiK GROUP», подтверждает, что аспирант ФГБОУ ВО Воронежского ГАУ А.Д. Головин, проведя научные исследования, обосновал и предоставил компании практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ силосного типа посредством использования процесса озонирования.

Предложенная автором конструкция имеет признаки интеллектуальной собственности, что подтверждается полученным вузом патентом РФ на полезную модель №219336. Аспирантом А.Д. Головиным была аргументирована необходимость применения озонной обработки семян зерновых культур при хранении с рекомендацией рациональных режимов озонирования. Озонную обработку следует проводить во время хранения семян зерновых культур при накопительной дозе озонирования в диапазоне от 950 до 2100 *мин·мг/м³*, что позволит увеличить энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян на 5 и 4,75% соответственно по сравнению с вентилированием силосов атмосферным воздухом. При этом проведённое исследование показало, что при дозе озонной обработки 7200 *мин·мг/м³* наблюдается уменьшение поражения семян грибковым заболеванием рода Alternaria на 6,95%, рода Fusarium на 3,25% и рода Helminthosporium на 5,5%, причем полностью прекратить жизнедеятельность данных микроорганизмов возможно при дозе озонирования свыше 12200 *мин·мг/м³*. Режимы озонной обработки семян зерновых культур обоснованы Головиным Антоном Дмитриевичем.

Результаты научных исследований, проведенные аспирантом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ А.Д. Головиным, применяются предприятием сельхозмашиностроения консорциума «KOBLiK GROUP», а именно ООО «Воронежсельмаш», при разработке и проектировании зернохранилищ силосного типа.

Технический директор Р.Н. Карпенко

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Внедрение научных исследований в учебный процесс

РЕКОМЕНДОВАНО
Учебно-методической комиссией
агроинженерного факультета
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,
протокол от 11.09.2025 года № 1
Председатель _____ Костиков О.М.

УТВЕРЖДАЮ
Врио ректора ФГБОУ ВО Воронежский
государственный аграрный университет
имени императора Петра I»
_____ Воронина А.А.
м.п.

АКТ
о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Комиссия в составе представителей кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ заведующего кафедрой Оробинского В.И., профессора Гиевского А.М. и членов учебно-методической комиссии агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ Афоничева Д.Н., Козлова В.Г. составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований, выполненных на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ аспирантом Головиным А.Д. под руководством профессора Баскакова И.В., внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению подготовки магистров по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия».

Результаты исследований используются при выполнении обучающимися курсового проекта, а также при проведении лабораторных работ, связанных с повышением эффективности хранения зерна и семян зерновых культур. Кроме того, результаты научных исследований внедрены в учебный процесс при изучении дисциплины «Механизация и автоматизация технических процессов в растениеводстве» при чтении лекций подраздела 2.4. «Механизация и автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна, и подготовки семян зерновых, зернобобовых и крупяных культур», а также в ходе выполнения выпускных квалификационных работ на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей.

Использование представленных результатов научных исследований в учебном процессе способствует повышению качества образования и совершенствованию профессиональной подготовки обучающихся.

Представители
учебно-методической комиссии
агроинженерного факультета
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:
_____ Афоничев Д.Н.
_____ Козлов В.Г.

Представители
кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:
_____ Гиевский А.М.
_____ Оробинский В.И.