

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

На правах рукописи



ПОЖИДАЕВ Илья Алексеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОЗОННОЙ
ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор сельскохозяйственных наук
Баскаков Иван Васильевич

Воронеж – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ БОРЬБЕ С ЗЕРНОВЫМИ ВРЕДИТЕЛЯМИ	12
1.1 Влияние зерновых вредителей на качество зерна	12
1.2 Способы дезинсекции зерна	18
1.3 Анализ влияния качества зерна на его микрофлору при хранении	24
1.4 Влияние озонной обработки на зерновых вредителей и микрофлору зерна.....	27
1.5 Анализ патентных исследований по озонной обработке зерна и семян зерновых культур	31
1.6 Выводы по разделу	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА.....	39
2.1 Анализ теоретических исследований по изменению концентрации озона в озоновоздушной смеси при дезинсекции зерна.....	39
2.2 Теоретическое обоснование взаимодействия озона с зерном.....	43
2.3 Теоретическое определение скорости разложения озона	52
2.4 Теоретическое определение концентрации озоновоздушной смеси в потоке при дезинсекции зерна	54
2.5 Выводы по разделу	64
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	66
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	66
3.2 Экспериментальная установка для озонной обработки зерна и зерновых вредителей	67
3.3 Алгоритм программы для поиска рациональных доз при озонной обработке вредителей	69
3.4 Методика проведения исследований и обработки экспериментальных данных.....	70

3.4.1	Общая методика проведения исследований и обработки экспериментальных данных.....	70
3.4.2	Методика проведения экспериментальных исследований по определению значения константы разложения озона	71
3.4.3	Методика проведения экспериментальных исследований по озонной дезинсекции зерна.....	71
3.4.4	Методика проведения экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микофлору зерна	73
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА	75
4.1	Разработка программы для ЭВМ по автоматизированному учёту и обработке результатов экспериментальных исследований озонной дезинсекции зерна.....	75
4.2	Результаты экспериментальных исследований по определению экспоненциального закона разложения озона через константу разложения	78
4.3	Проектирование устройства для хранения зерна и семян зерновых культур в регулируемой озоновоздушной среде	84
4.4	Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности озонной обработки при дезинсекции зерна	87
4.4.1	Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от амбарного долгоносика.....	87
4.4.2	Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от рисового долгоносика	91
4.4.3	Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от булавоусого хрущака	94
4.4.4	Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от зернового точильщика	98
4.4.5	Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли	102

4.4.6 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли	105
4.5 Влияние озонной обработки на микофлору зерна	109
4.6 Выводы по разделу	111
5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сложная геополитическая ситуация в мире и огромное количество всевозможных санкций, введенных против РФ, способствовали тому, что обеспечение продовольственной безопасности за счёт собственного производства стало одним из ключевых приоритетов страны. Ведущая роль в этом направлении принадлежит зерновому производству [19, 51, 99]. Обусловлено это тем, что зерно является основой рациона питания человека и животных. В процессе его производства ключевым элементом, обеспечивающим доступность зернового материала в течение всего года вплоть до нового урожая, является организация эффективного долгосрочного хранения. В этот период первоочередной задачей является обеспечение сохранности качества зерна [80, 81]. Этот процесс осложняется тем, что зерновой материал подвержен влиянию вредителей. В процессе жизнедеятельности насекомые наносят значительный урон. При этом снижается не только физическая масса зерна, но и ухудшается его качество. Токсины, вырабатываемые вредителями в процессе жизнедеятельности, приводят урожай в непригодное состояние [44, 86, 120]. Традиционный способ борьбы с насекомыми основан на применении химических технологий обеззараживания зерна. Однако их использование несет множество негативных последствий для здоровья человека и окружающей среды [94], поэтому поиск альтернативных методов борьбы с зерновыми вредителями является перспективным направлением исследований.

Одним из наиболее эффективных методов обработки зерна и семян зерновых культур при хранении являются озонные технологии [5, 36, 46, 94, 98, 103, 104]. Их применение в аграрном секторе стало возможным благодаря развитию способов генерации озона. Трехатомная модификация кислорода является мощным антимикробным газом, поэтому он может быть использован при дезинсекции зерна [20, 40]. При этом озонная обработка не оставляет вредных химических соединений и не оказывает негативных последствий для окружающей среды, а также не снижает качество обрабатываемой сельскохозяйственной продукции [18, 27, 110, 113, 123, 124].

В связи с постоянно растущими требованиями к эколого-технологическим процессам в сельском хозяйстве рационализация условий озонной обработки зерна, разработка эффективных режимов озонирования и теоретическое обоснование взаимодействия озона с зерновым материалом являются перспективными направлениями дальнейших исследований, которые на данный момент имеют ряд нерешенных вопросов, требующих совершенствования.

Использование озона при дезинсекции зерна позволит увеличить сроки безопасного хранения, сократить затраты на производство химических препаратов, поддержать качество хранящегося урожая на должном уровне, не нанося ущерб природе, что будет способствовать дальнейшему развитию сельского хозяйства в целом. В связи с этим совершенствование технологического процесса озонной дезинсекции зерна 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», п. 2.1 «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции растениеводства», которая утверждена учёным советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Проведенный анализ литературных источников показывает, что проблема обеззараживания зерна от вредителей может быть решена с применением различных методов, воздействующих на физиологическое состояние и жизнеспособность вредителей. На основании проанализированных данных установлено, что высокоэффективной альтернативой является технология озонирования. Исследованием озонной обработки зерна занимались: В.Н. Авдеева, С.В. Оськин, А.Н. Мануйленко, Г.А. Закладной, Е.К.М. Саеед, И.В. Баскаков, Н.Д. Романенко, М.А.М. Осман, А.А. Смирнов, А.Ф. Rozado, J.L. Raes и др. Однако, несмотря на подтвержденную эффективность озона против различных вредителей, не все аспекты практического применения данной технологии для защиты зерновых масс можно считать полностью исследованными. Это

объясняется сложностью процесса, включающего влияние концентрации озона в озоновоздушной смеси, времени обработки и видового состава вредителей. Следовательно, существует необходимость в более глубоких исследованиях озонной обработки при борьбе с зерновыми вредителями при различных режимах, а также в разработке технического средства, обеспечивающего озонную дезинсекцию зерна экологически безопасным способом.

Объектом исследования является технологический процесс озонной дезинсекции зерна.

Предмет исследования – закономерности взаимодействия озона с зерном при его дезинсекции.

Цель работы: снижение заражённости зерна при хранении путем совершенствования технологического процесса озонной дезинсекции.

Задачи исследований:

- проанализировать недостатки современных средств дезинсекции зерна и выявить наиболее перспективный способ обработки, который позволит уменьшить потери зерна с должной эффективностью, экономичностью и экологичностью операции;
- установить зависимости, определяющие скорость озонопоглощающей способности зерна и скорость разложения озона в зерновом ворохе;
- разработать алгоритм и компьютерную программу для обработки экспериментальных данных и определения режимов озонной дезинсекции зерна, обеспечивающих требуемую эффективность операции;
- обосновать технологическую схему озонной дезинсекции зерна при хранении;
- установить закономерности гибели зерновых вредителей при озонной обработке с различными режимами дезинсекции зерна.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- установлена зависимость скорости озонопоглощающей способности зерна на основе законов диффузии озона через поверхность зерна, отличающаяся учётом коэффициентов геометрии, скважистости, диффузии, среднего диаметра зер-

новки, времени озонирования, а также концентрации и скорости разложения озона;

- получена зависимость скорости разложения озона в зерновом ворохе на основе законов диссоциации газа, отличающаяся учётом концентрации озона в озоновоздушной смеси, времени обработки, конечной скорости разложения озона и константы разложения озона;

- разработан алгоритм обработки экспериментальных данных и определения режимов озонной дезинсекции зерна, отличающийся расчётом дозы озонной обработки в зависимости от вида вредителя, обеспечивающей требуемую эффективность обработки;

- обоснована технологическая схема озонной дезинсекции зерна при хранении, отличающаяся тем, что управление процессом озонной обработки осуществляется на основе оценки фактической зараженности зерна;

- установлены закономерности гибели различных зерновых вредителей от дозы озонной обработки, отличающиеся тем, что они получены при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси до 5 мг/м^3 и учитывают последствие озонной обработки на состояние вредителей.

Теоретическую значимость имеют зависимости скорости озонопоглощающей способности зерна и скорости разложения озона в зерновом ворохе, позволяющие рассчитать дозу озонной обработки, достигающую зерновым вредителям и дополняющие теорию взаимодействия озоновоздушной смеси с зерном и зерновыми вредителями.

Практическую значимость представляют алгоритм и компьютерная программа обработки экспериментальных данных и определения режимов озонной дезинсекции зерна, дающие возможность определить рациональные дозы озонной обработки при дезинсекции зерна; технологическая схема озонной дезинсекции зерна при хранении, обеспечивающая снижение заражённости зерна и его потери; режимы дезинсекции зерна при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси до 5 мг/м^3 , необходимые для настройки озонаторного оборудования.

Методология и методы исследований. В процессе выполнения диссертационной работы использовались методы системного анализа и математического моделирования, реализованного в пакете прикладных программ «MATLAB». Экспериментальные исследования, согласно теоретическим предпосылкам, проводились в лабораторных условиях кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в соответствии с требованиями действующих стандартов и разработанными частными методиками. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программ EXCEL, КОМПАС 3D, MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

- зависимости скорости озонопоглощающей способности зерна и скорости разложения озона в зерновом ворохе, позволяющие установить режимы озонной дезинсекции;
- алгоритм и компьютерная программа обработки экспериментальных данных и определения режимов озонной дезинсекции зерна, позволяющие определить рациональные дозы озонной обработки при дезинсекции зерна;
- технологическая схема озонной дезинсекции зерна при хранении, обеспечивающая снижение заражённости зерна;
- закономерности гибели различных зерновых вредителей от дозы озонной обработки, позволяющие обеспечить требуемую эффективность дезинсекции зерна;
- режимы дезинсекции зерна при средней концентрации озона в озоноздушном смеси до 5 мг/м^3 , позволяющие выполнить настройку озонаторного оборудования.

Степень достоверности и апробация результатов. Представленные в диссертационной работе результаты получены с применением современных теоретических подходов и согласуются с данными экспериментов. Достоверность выводов и правомерность логических рассуждений достигается методологической базой исследований и использованием общенаучных приёмов. Эмпирическая база

работы сформирована на основе опытных данных, полученных в ходе проведения исследований в лабораторных условиях.

Процесс озонирования при борьбе с зерновыми вредителями в период хранения используется учебно-научно-технологическим центром «Агротехнология» ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Разработанные режимы озонной дезинсекции зерна внедрены в КФХ «Виктория» Хлевенского района Липецкой области. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 35.04.06 «Агроинженерия» на агроинженерном факультете ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Результаты научных исследований внедрены в ООО «Воронежсельмаш» и используются консорциумом «KOBLiK GROUP» при проектировке и разработке инновационных зернохранилищ силосного типа (Приложение А).

Основные результаты исследований доложены, обсуждены и апробированы на научных конференциях и конкурсах:

- международная научно-практическая конференция «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» для АПК (Россия, Воронеж, 24–25 ноября 2020 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);
- национальная научно-практическая конференция «Теория и практика инновационных технологий в АПК» (Россия, Воронеж, 14–20 мая 2025 года);
- национальная научно-практическая конференция студентов и магистрантов «Молодежный вектор развития аграрной науки» (Россия, Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2021 года, 15 февраля – 31 марта 2024 года);
- международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии и технические средства для АПК» (Россия, Воронеж, 11–12 ноября 2021 года);

- национальная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК» (Россия, Воронеж, 23 октября 2023 года);

- в финале Всероссийского инженерного конкурса 2023/2024 (Россия, Москва, 13 июня 2024 года) (Приложение Б).

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и задачи исследования, анализе степени разработанности темы, выборе методов исследования, проведении экспериментов и анализе полученных результатов, формулировке выводов, выполненных лично автором; в проведении теоретических исследований, оценке эффективности озонной дезинсекции, разработке алгоритма и программы обработки экспериментальных данных и определения режимов озонной дезинсекции зерна, обосновании технологической схемы озонной дезинсекции зерна при хранении, выполненных при участии автора; подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе пять научных статей в российских журналах, включенных в перечень ВАК, два патента Российской Федерации на полезные модели и одно свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 130 источников, списка условных сокращений и приложений. Диссертация изложена на 145 страницах, включает 31 рисунок, 27 таблиц и два приложения.

1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ БОРЬБЕ С ЗЕРНОВЫМИ ВРЕДИТЕЛЯМИ

1.1 Влияние зерновых вредителей на качество зерна

Зерно является источником пищи для людей и животных [34]. Оно используется для производства хлеба, круп, макаронных изделий, комбикормов и других продуктов. Однако, сохранность качества зерна в процессе хранения одна из главных проблем сельского хозяйства. Зерно подвержено влиянию различных факторов, которые могут негативно сказаться на его качестве и пригодности для употребления. Наибольший вред наносят насекомые. В процессе своей жизнедеятельности они питаются крахмалом и белками. При этом насекомые выделяют токсины, которые негативно сказываются на качестве зерна [67]. Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации при ООН «Food and Agriculture Organization» ущерб от жизнедеятельности вредителей может быть весьма значительным. Ежегодные потери мирового урожая зерновых культур от жизнедеятельности вредителей достигают 15% [87]. В Российской Федерации недобор зерна из-за деятельности вредных насекомых в среднем составляет 9,3% [35]. Особенно активно зерновые вредители развиваются в повреждённых и влажных зерновках [6].

Наиболее распространенными зерновыми вредителями являются долгоносики, точильщики, хрущаки и т.д. Согласно ГОСТ 34165 - 2017 каждый из них имеет определенный коэффициент вредоносности (табл. 1.1), который определяет степень опасности насекомого для зерна [28].

Таблица 1.1 – Коэффициенты вредоносности основных разновидностей зерновых вредителей

№	Наименование вредителя	Коэффициент вредоносности
1	Зерновой точильщик (<i>Rhyzopertha dominica</i> F.)	1,7
2	Амбарный долгоносик (<i>Sitophilus granarius</i>)	1,5
3	Зерновая моль (<i>Sitotroga cerealella</i> Oliv)	1,1
4	Рисовый долгоносик (<i>Sitophilus oryzae</i>)	1,0
5	Булавоусый хрущак (<i>Tribolium castaneum</i> Hrbst)	0,4

Зерновой точильщик (рис. 1.1) является одним из наиболее распространенных и опасных вредителей зерна с коэффициентом вредоносности равным 1,7. На стадии имаго тело имеет овальную форму и коричнево-черный окрас. Длина насекомого около 2,5...3 миллиметров. Жуки хорошо летают. Их переднеспинка вытянута и похожа на капюшон, прикрывающий голову, который покрыт зубцами. Надкрылья имеют продольные ряды точечных ямок. Личинка жука червеобразная белого цвета, с небольшой головой. Передние сегменты тела существенно шире остальных, а задние сегменты крючкообразно загнутые. Три пары ног позволяют личинке свободно передвигаться.

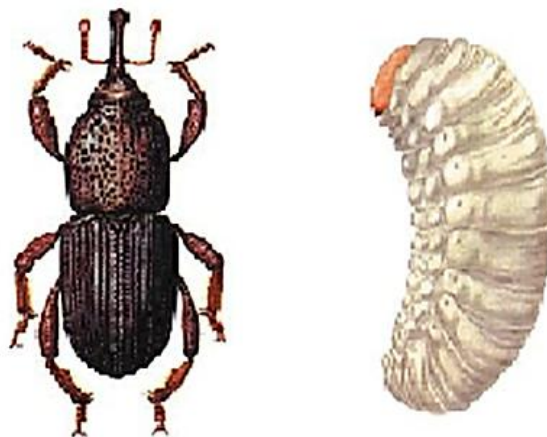


Рисунок 1.1 – Зерновой точильщик

Зерновой точильщик является одним из самых вредоносных насекомых. В Кубанском государственном технологическом университете провели исследования по изменению массы 1000 зерен пшеницы в результате обитания вредителей [67]. В ёмкость с зерном подсаживали жуков зернового точильщика. Опыт проводили в течении двух месяцев. Расчет потерь вели по разнице массы зерна до и после обитания вредителей. В результате установлено, что зерновой точильщик обладает значительной прожорливостью. За исследуемый период снижение массы зерна составило 66,9% от массы зерна. Г.А. Закладной также изучал влияние зернового точильщика на зерновую массу [31]. Для проведения исследования использовали 39,8 грамм крупно размолотого зерна пшеницы. Потери рассчитывали по разнице сухой массы зерна до и после обитания жуков. В результате установлено, что зерновой точильщик на стадии личинки съедает до 28% от массы зерна,

а на стадии имаго способен за сутки съесть 116 миллиграмм зерна. Следовательно, его обязательно нужно уничтожать. Развитие зернового точильщика может привести к значительным потерям зерна в процессе хранения. В период развития личинка уничтожает до 28% от зерновой массы, а на стадии имаго потери зерна достигают 66,9%.

Не менее опасным зерновым вредителем является амбарный долгоносик (рис. 1.2) с коэффициентом вредоносности равным 1,5. Длина имаго варьируется от 3,5 до 4,5 миллиметров. Размеры тела зависят от питания. У амбарного долгоносика развита только одна пара крыльев, что не дает ему возможности летать. Молодые особи имеют коричневый окрас, а старые – приближенный к черному. Личинка жука имеет окрас белого цвета, червеобразной формы без ног с коричневой головой и длиной тела около четырех миллиметров.



а) имаго амбарного долгоносика б) личинка амбарного долгоносика

Рисунок 1.2 – Амбарный долгоносик

Влияние амбарных долгоносиков на массу зерна изучали Л.А. Остафийчук и А.С Прокопец [67]. Для проведения исследования в специальный сосуд, засыпанный 1000 зернами пшеницы влажностью от 14,3 до 14,5%, помещали жуков амбарного долгоносика. Выдержка вредителей продолжалась в течение двух месяцев при температуре 25°C. В результате их жизнедеятельности потери зерна составили 31,7%. Также влияние амбарного долгоносика на зерновую массу изучал С.В. Пименов [83]. В ходе исследования насекомых помещали в ёмкости объёмом 200 мл с навесками пшеницы и ячменя весом по 1000 мг. Температура в помещении варьировалась в диапазоне 23...25°C. Взвешивание прово-

дилось каждые 10 дней без учета насекомых. В результате 120-дневной жизнедеятельности амбарного долгоносика в таких условиях было уничтожено 98,64 и 95,91% зерна пшеницы и ячменя соответственно. Также имеются исследования [31], в которых авторы указывают, что амбарный долгоносик в процессе своего развития уничтожил 56% зерна пшеницы. Следовательно, жизнедеятельность амбарного долгоносика способствует потерям зерна от 31,7 до 98,64%.

Немалый вред зерну при хранении может нанести зерновая моль (рис. 1.3). Коэффициент вредоносности данного насекомого составляет 1,1. Взрослая особь имеет размер тела около 9 миллиметров и молочно-белый цвет. У бабочки узкое тело с длинными усиками и крыльями. Гусеницы зерновой моли имеют длину около 8 миллиметров и узкое тело. Наличие ног позволяет им хорошо передвигаться.



Рисунок 1.3 – Зерновая моль

В Оренбургском ГАУ изучали влияние зерновой моли на зерновую массу [50]. При проведении опыта в мешочки помещали по 600 грамм зерна яровой пшеницы и открыто оставляли в опытной комнате с бабочками. Опыт проводили в течение полугода с оптимальной температурой обитания вредителей. Для определения степени поврежденности образца отбирали три партии зерна по 100 зёрен в каждой. Отобранные зерна анализировались на проедание эндосперма. В результате установлено, что в процессе своей жизнедеятельности зерновая моль способна уничтожить до 72% зерна. В период развития личинки зерновой моли

также уничтожается значительное количество зерна [31]. Для проведения данных исследований зараженное яйцами моли зерно в трёх повторностях помещали в стеклянную ёмкость и выдерживали в течение 30 суток при температуре 27°C. Потери рассчитывались по разнице зерновой массы до и после развития насекомых. В результате жизнедеятельности личинок потери от массы зерна составили 45% [31].

Часто встречающимся вредителем, образующим скрытую форму заражения, является рисовый долгоносик (рис. 1.4). Длина тела взрослой особи достигает 3,5 миллиметров. На надкрыльях имеются желтовато-бурые пятна. Жук имеет развитые задние крылья, что дает ему возможность летать. Личинки рисового долгоносика имеют белый цвет и длину до трех миллиметров. Коэффициент вредоносности рисового долгоносика равен 1.



Рисунок 1.4 – Рисовый долгоносик

Установлено [67], что рисовый долгоносик обладает высокой прожорливостью и вредоносностью. В ходе исследований 1000 зерен пшеницы с влажностью 14% засыпали в ёмкость и подсаживали 30 жуков рисового долгоносика. Их выдержка длилась в течение двух месяцев при температуре 25°C. Потери рассчитывались по разнице сухой массы зерна до и после жизнедеятельности насекомых. В таких условиях потери зерновой массы составили 27,4%. В пятигорском филиале ФГБУ «ВНИИКР» также проводили исследование по определению потерь зерна от жизнедеятельности рисового долгоносика [83]. Вредителей помещали в ёмкость объемом 200 мл заранее наполненную зерном массой 1000 миллиграмм. По

прошествию 120 дней убыль веса пшеницы и ячменя от первоначального значения, составила 961 мг и 931 мг соответственно. Переходя к процентному соотношению ущерб от жизнедеятельности рисового долгоносика составил 96,1 и 93,1%. G.D. White установил [130], что на последние девять дней развития личинок рисового долгоносика приходится 50% общих потерь в весе зерна пшеницы, при этом 68% зерна испорчено, когда нет явных признаков заражения зерна.

Не менее распространённым вредителем является булавоусый хрущак (рис. 1.5). У взрослой особи окрас варьирует от красно-бурого до ржаво-рыжего цвета. Переднегрудь по бокам равномерно закругленная, невыемчатая. Грудной щит в мелких и частых точках. Надкрылья точечно-бороздчатые. Этот вид похож на малого мучного хрущака, но отличается от него наличием трёхчлениковой булавь усиков и округлённой переднеспинкой с наибольшей шириной посередине.



Таблица 1.5 – Булавоусый хрущак

По данным Г.А. Закладного [31], после месячного обитания булавоусого хрущака в зерне пшеницы с массой 1000 зерен 39,8 г при температуре 27 °С потери зерна составили 26%. В среднем на стадии имаго это $0,15 \pm 0,01$ мг за сутки, а на стадии развития личинки $3,32 \pm 0,11$ мг. Также установлен вред от 150-дневной жизнедеятельности булавоусых хрущаков в ёмкостях по 200 мл с зерном по 1000 мг пшеницы, ячменя, овса, кукурузы и подсолнечника [83]. Убыль зерна в таких условиях составила 602, 586, 384, 318 и 140 мг соответственно, что в процентном соотношении составляет от 14 до 60,2%. Следовательно, в результате развития булавоусый хрущак способен уничтожить до 60% от всего объёма хранящегося зерна.

Следует учитывать, что даже при небольшой зараженности зерна, его не получится использовать даже на фураж, потому что токсины от вредителей негативно влияют на здоровье животных, вплоть до их смерти.

Таким образом, в процессе хранения зерна при отсутствии своевременного мониторинга и контроля в нём развиваются различные вредные насекомые, которые уничтожают значительную часть урожая. В худших случаях жизнедеятельность вредителей в зерновой массе может привести к полной порче всего хранящегося урожая. Ежегодные мировые потери зерна, вследствие жизнедеятельности вредных насекомых, в среднем составляют 15%. Заражённое зерно нельзя использовать даже на фураж, потому что токсины от вредителей отравляют его, что негативно влияет на здоровье и продуктивность животных. Для предотвращения развития насекомых необходимо применять современные способы озонной дезинсекции зерна.

1.2 Способы дезинсекции зерна

Как известно, зерно следует не только вырастить, но и сохранить. Процесс хранения является одним из самых ответственных этапов в обеспечении продовольственной безопасности страны. В настоящее время собственными хранилищами зерна стараются обзавестись как крупные агрохолдинги, так и небольшие фермерские хозяйства, чтобы иметь возможность придержать зерно до момента роста цен в условиях их рыночного колебания. Однако сохранение зерна без порчи и потерь – непростая и затратная задача [16, 33, 111]. Особую опасность во время хранения представляют амбарные вредители и микроорганизмы. Их развитию способствует повышенная влажность в зернохранилищах, наличие поврежденного зерна, повышение его температуры, заплесневение и другие факторы. Благодаря постоянному совершенствованию методов ведения сельского хозяйства на современном этапе развития агропромышленного сектора существует множество различных способов (рис.1.6), предотвращающих потерю зерна от жизнедеятельности вредителей [3, 7, 32, 57, 62, 65].

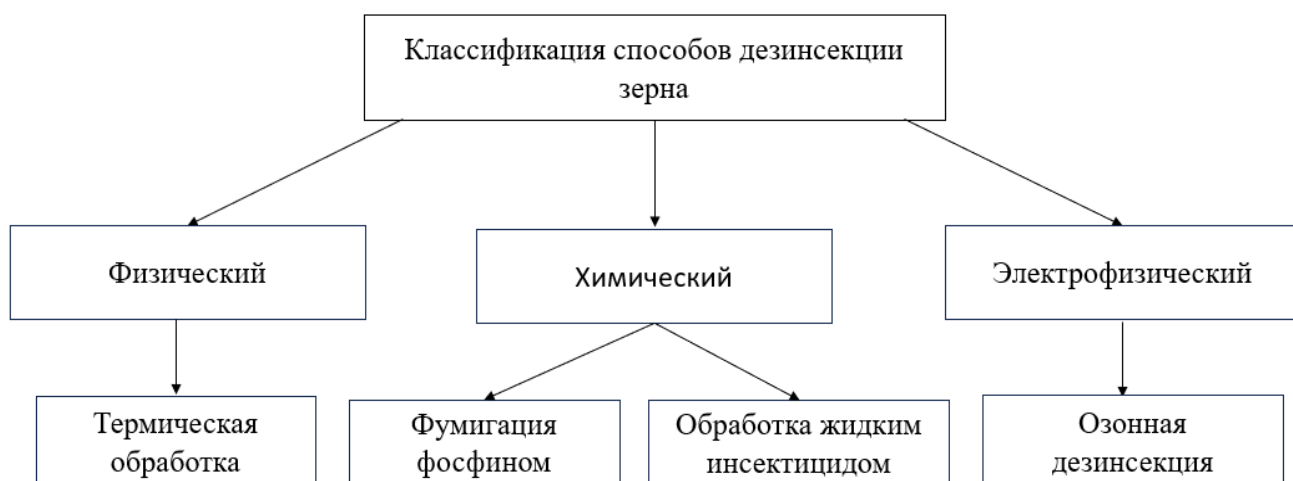


Рисунок 1.6 – Классификация основных способов дезинсекции зерна

Одним из способов обеззараживания зерна является его охлаждение с использованием систем активного вентилирования [2,3]. Главным условием при такой обработке является умеренный климат. Нижний температурный диапазон, при котором насекомые испытывают негативное воздействие имеет три периода. При температуре от 0 до 5°C вредители способны поддерживать низкий уровень метаболизма. Однако при данных условиях они не в состоянии восстановить полученные физические повреждения. При температуре от -10 до 0°C насекомые погибают в течение нескольких дней или недель. Это происходит вследствие неспособности вредителей акклиматизироваться к переохлажденной среде. При температуре от -25 до -15°C насекомые гибнут за короткий период времени. Причиной гибели вредителей становится замерзание воды в их телах, что приводит к мгновенной и необратимой остановке жизненных функций. Также стоит отметить, что при охлаждении зерна необходимо выделить несколько основных этапов. Сначала следует довести температуру зерновой массы до значения ниже 15°C. Это позволит исключить размножение насекомых и прервать их жизненный цикл. Потом необходимо снизить температуру зерна до отметки ниже 10°C. Такие низкие показатели создают крайне неблагоприятные условия даже для самых холодоустойчивых вредителей, вызывая их гибель [1].

К недостаткам процесса дезинсекции зерна посредством охлаждения можно отнести ограничение по климату, низкую теплопроводность зерновых культур,

влияющую на равномерность обработки и необходимость глубокого промораживания партий продукции, что увеличивает энергозатраты и снижает качество зерна. При этом гибель насекомых может длиться в течение нескольких недель или месяцев, что существенно увеличивает сроки обработки, ограничивая возможность применения данного способа.

Помимо охлаждения, существует и альтернативный метод борьбы с зерновыми вредителями, основанный на повышении температуры. Эта технология подобна ранее описанной и базируется на чувствительности насекомых к параметрам окружающей среды. Небольшое превышение температуры сверх оптимального диапазона жизнедеятельности насекомых негативно влияет на них, вызывая угнетенное состояние, прекращение питания и размножения. Дальнейшее нагревание приводит к тепловому оцепенению насекомых, вслед за этим наступает гибель вредителей, вызванная перегревом тела и свертыванием белка. Термическую дезинсекцию проводят при сушке зерна, руководствуясь режимами, представленными в таблице 1.2 [29].

Таблица 1.2 – Режимы термической дезинсекции зерна

Вредители	Режим термической дезинсекции					
	Температура, °C	Продолжительность сушки, мин	Температура, °C	Продолжительность сушки, мин	Температура, °C	Продолжительность сушки, мин
Амбарный долгоносик	50	55	55	10	60	-
Рисовый долгоносик		60		20		-
Мучной хрущак		-		10		-
Рыжий мукоед		190		25		10
Суринамский мукоед		40		10		7
Мучной клещ		20		10		5

Анализ таблицы 1.2 показывает, что при дезинсекции зерна температура по-разному влияет на вредителей. Продолжительность жизни насекомых после

нагревания до 50...60°C варьируется от 5 до 190 минут. При температуре 60°C большинство вредителей погибает сразу или в течение нескольких минут.

К недостаткам данной технологии можно отнести то, что зерно сушат только в тех случаях, когда оно имеет повышенную влажность. При этом применяемые температуры сушильного агента часто не соответствуют параметрам гибели вредителей. Перегрев сворачивает белок не только у насекомых, но и у зерна. Согласно инструкции по сушке продовольственного и кормового зерна, маслосемян, а также руководства по эксплуатации зерносушилок №9-3-82 максимальная температура нагрева сельскохозяйственных культур варьируется в диапазоне 25...60°C [38], что недостаточно для гибели большинства вредителей. При этом перегрев зерна оказывает неблагоприятное влияние на его качество, содержание белка, крахмала, жиров и т.д.

В настоящее время наиболее распространён химический метод дезинсекции зерна. Среди пестицидов одним из самых эффективных фумигантов, применяемых для борьбы с амбарными вредителями, является фосфин. В качестве источника газа используются специальные таблетки с действующим веществом фосфида алюминия. При фумигации зерна в складах и силосах элеваторов рекомендуемый расход фосфиносодержащих препаратов, например, магтоксина или фостоксина, составляет 9 г/т. Для уничтожения амбарного и рисового долгоносиков, капрового жука достаточно 10 таблеток на 1 т зерна. Для гибели малого мучного хрущака потребуется 6 таблеток на каждую тонну [52].

Технология дезинсекции зерна фосфином зависит от способа хранения. При фумигации внутри складов и амбаров фумигант вводят в зерновую массу на глубину не менее двух метров с помощью ручных зондов. После чего зерно укрывается пленкой для удержания паров газа внутри зерна. Контроль за эффективностью процесса дезинсекции осуществляется путем измерения концентрации фосфина в межзерновом пространстве. Для отбора газовоздушных проб из зерновой массы в двух-трех местах выводят за пределы склада специальные отводящие трубки. При дезинсекции силосных хранилищ в надсилосное оборудование элеватора непосредственно у загрузочного люка устанавливают автоматический доза-

тор гранул. По мере заполнения силоса через равные промежутки времени таблетки поштучно подаются в зерно [43]. В ходе фумигации периодически проводят измерения концентрации фосфина в межзерновом пространстве. При этом рассчитывают суммарный показатель произведения концентрации газа на время экспозиции ($\text{ПКЭ}_{\text{сум.}}$) и сравнивают его с нормативным ($\text{ПКЭ}_{\text{н.}}$), который обеспечивает гибель насекомых. Периодичность измерений составляет: 6, 12 и 24 часа и далее регулярно дважды в сутки. В отношении насекомых, которые в своем развитии не образуют скрытую форму зараженности зерна (мучные хрущаки, мукомеды и др.), показатель $\text{ПКЭ}_{\text{н}}$ равен $7 \text{ г} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$. Для вредителей, имеющих скрытую форму зараженности зерна (рисовый и амбарный долгоносики, зерновой точильщик и зерновая моль), величина $\text{ПКЭ}_{\text{н}}$ составляет $25 \text{ г} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ [32]. После обработки зерно следует дегазировать. Процесс выхода газа длится в среднем 10 суток при условии, что температура зерна была не ниже $+15^\circ\text{C}$. При более холодном зерне период дегазации может увеличиться до 1,5 месяцев. Максимально допустимый уровень фосфина в зерне составляет $0,1 \text{ мг/кг}$. При большем содержании газа следует продолжить дегазацию [45].

Недостатком данной технологии является применение высокотоксичных веществ, опасных для здоровья человека. Вдыхание даже небольших концентраций газов вызывает тяжелые отравления, в том числе со смертельным исходом. Также стоит отметить, что выход остаточных химических веществ в обработанном зерне при холодных условиях длится до 1,5 месяцев, что препятствует использованию сырья по назначению.

Другой разновидностью химического способа защиты от вредителей является нанесение на зерно жидких инсектицидов контактного действия. Они рассчитаны на отравление насекомых за счет проникновения пестицида в их организм через кожные покровы. Инсектицид, попадая в гемолимфу, разносится с ней к жизненно важным органам, вызывая интоксикацию. Наносится такой раствор с помощью опрыскивателей жидких инсектицидов. После обработки препарат, высыхая длительное время, сохраняется на зерне, тем самым защищает его от вредителей. В отличие от фумигации, жидкий инсектицид имеет эффект последствия,

что предотвращает повторное заражение. К одним из наиболее эффективных препаратов относится «Прокроп». Его норма расхода составляет 15 мл/т. При таком небольшом количестве его биологическая эффективность против всего комплекса вредителей 100%, в том числе скрытно живущих видов [57].

Наиболее перспективной технологией электрофизической дезинсекции зерна является озонирование [14, 46, 49, 72, 97]. Озонная обработка не образует токсинов в обрабатываемом продукте, не загрязняет окружающую среду, благоприятно сказывается на чистоте и качестве зерна. Экономически это более выгодная операция, чем химическая обработка [36, 48, 64]. Озоновоздушную смесь получают на месте потребления посредством применения специальных приборов, называемых озонаторами [47, 53, 54, 58, 73]. При этом исходным газом является кислород или обычный воздух. Количество производимого озона легко регулируется с помощью подключения или отключения отдельных модулей, из которых состоит озонатор. Озонную обработку можно объединить со многими операциями при послеуборочной обработке и хранении зерна [40, 70]. Продолжительность дезинсекции и концентрация озона зависят от вида культуры, степени заражения материала и его объёма. В процессе озонной обработки уничтожаются как вредители зерна, так и патогенные микроорганизмы, также разрушаются продукты их жизнедеятельности. Озонирование позволяет уничтожить до 100% зерновых вредителей при различных стадиях развития [30, 94]. Кроме того, обработка зерна озоном имеет ряд сопутствующих положительных качеств [22]. Озонирование позволяет увеличить всхожесть семян, повысить устойчивость растений к вредным внешним факторам, увеличить сроки безопасного хранения и т.д. [12, 13, 68]. После распада озон превращается в обычный кислород, обогащая тем самым воздух и не оставляя после себя токсичных соединений.

Анализ способов дезинсекции зерна показал, что наиболее перспективным является электрофизический метод, который не оказывает вредного воздействия на окружающую среду и имеет высокую эффективность. Данным требованиям в полной мере соответствует применение процесса озонирования. Озонная обработка позволит значительно сократить использование стимуляторов роста, пести-

цидов, антибиотиков и прочих дорогостоящих химических препаратов, зачастую вредных для человека.

Таким образом, на данный момент такие технологии дезинсекции зерна, как охлаждение, нагревание, фумигация и нанесения инсектицидов контактного действия, имеют ряд недостатков, которые в основном связаны с длительностью смертности вредителей, зависимостью от погодных условий, негативным влиянием пестицидов на качество обрабатываемого зерна, высокой себестоимостью обработки, вредностью для экологии и т.д. Наиболее перспективно применение процесса озонирования. Эффективность озонной дезинсекции зерна достигает 100% при этом озон положительно влияет на качественные показатели обрабатываемой продукции и не оставляет после обработки токсинов. Операция экологически безопасна. Данные преимущества указывают на хорошие перспективы развития и необходимости дальнейшего изучения озонной дезинсекции зерна.

1.3 Анализ влияния качества зерна на его микрофлору при хранении

На качественные показатели зерна влияет множество факторов. Среди основных причин можно выделить природно-климатические условия, отклонение от технологии производства сельскохозяйственных культур, степень их травмирования в процессе уборки или дальнейшей обработки, качественные и количественные показатели зернового вороха, а также его сроки хранения, степень поражения микроорганизмами и т.д. По мере хранения качество зернового материала изменяется [10, 117]. Это связано с влиянием биологических и физико-химических законов на молекулярном и клеточном уровнях [15].

Сельскохозяйственная продукция является средой обитания множества микроорганизмов [23, 24, 59, 129]. Их развитие способствует отрицательному влиянию на качество хранящегося урожая. В процессе хранения незрелое зерно менее устойчиво к развитию микроорганизмов. Обычно оно имеет повышенную влажность и большую подверженность повреждению при уборке [41], что влияет на его заражение патогенами.

На нормально созревшем жизнеспособном зерне микрофлора содержится только на его поверхности. Это обусловлено достаточно прочной зерновой оболочкой, способствующей ограничению проникновения микроорганизмов внутрь зерновки. Развитие микрофлоры на полноценном зерне обычно начинается в области зародыша, где оболочка менее прочная и наиболее гигроскопична. При этом там содержится наибольшее количество питательных веществ. Образование плесневых грибов на зародыше приводит к полной порче жизненных функций зерна [65].

Присутствие в зерновом ворохе засорителей представляет собой источник инфекции и приводит к заражению зерна плесневыми грибами. Они активно развиваются при влажности 15...30%, которую имеют семена сорных растений. Дальнейшее повышение содержания влаги свыше 30% способствует развитию бактерий. При температуре в диапазоне 25...40°C наблюдается наиболее интенсивное развитие плесневых грибов и большинства бактерий. Охлаждение вороха до 5...10°C значительно замедляет развитие патогенов, при этом уменьшается интенсивность дыхания микроорганизмов [42].

На развитие микрофлоры влияет наличие травм зерновки. Зерновой ворох в своем составе весьма разнообразен [4]. Основным источником возникновения болезней и вредителей является щуплый и травмированный при обмолоте зерновой материал. Применение устаревших способов традиционной обработки приводит к механическим повреждениям зерна, что влечет за собой до 10% потерь от общего объема [7]. В своей работе О.П. Подъяпольская [84] при проведении опытов с зернами кукурузы влажностью 18%, хранившимися при 20°C, установила, что развитие микроорганизмов активизируется в зависимости от характера травмирования зерна. Установлено [56], что количество грибной микрофлоры в дроблённых зёрнах в 12 раз выше, чем у полноценного зерна. Это объясняется тем, что повреждения лишают его защиты от возможного поражения микрофлорой [41]. Микроорганизмы преодолевают защитную оболочку и быстро достигают питательных веществ, которые находятся во внутренней части зерна [26]. Проникая через повреждения эндосперма или зародыша, эта микрофлора приводит зерно в

полную негодность, как для посевных целей, так и для пищевых или фуражных нужд. При этом наличие травмированных зерновок в зерновом ворохе негативно сказывается на сроках его хранения. Снижается стойкость, усиливается интенсивность дыхания, развиваются микроорганизмы, микрофлора, клещи и другие зерновые вредители [91, 100, 101]. Так, в дроблёном зерне количество плесени превышает среднюю пробу в 55 раз, при прохождении через сито с отверстиями размером 1,7х20 мм – в 190 раз, в органической примеси – в 480 раз, а после прохождения через решето с отверстием диаметром 1 мм – в 600 раз [108]. Также стоит отметить, что при хранении травмированные зёрна наиболее подвержены развитию грибов рода *Aspergillus* и *Penicillium*, что приводит к увеличению дыхания всей зерновой массы и потере в ней сухого вещества [108].

Жизнеспособность зерна является одним из ключевых факторов в развитии на нем микроорганизмов. В случае отсутствия жизненных сил оно не противостоит развитию микрофлоры. М.Г. Голиком [25] установлено, что при одинаковых условиях хранения невсхожее зерно пшеницы плесневеет намного быстрее, чем всхожее зерно.

Высокая влажность зернового вороха и наличие микроорганизмов способствуют быстрому самосогреванию зерна и повышению температуры, которая в течение суток увеличивается на 6...10°C и на пятые сутки достигает 54°C. Присутствие свободной влаги способствует активному развитию микрофлоры. Это негативно сказывается на всхожести семян, которая у ячменя за это время снизилась с 92 до 2%. Зерно практически всех сельскохозяйственных культур при высокой исходной влажности уже на третий день хранения теряет свою ценность как семенной материал. Влажные зерновки сильнее поражаются плесневыми грибами. Их количество после трехдневного хранения при температуре 15...20°C достигла 47,7%, в то время как у зерна с влажностью 14% их было в 3,6 раза меньше [9].

Экспериментально доказано, что снижение всхожести семян при активном воздействии на зародыш плесневых грибов происходит при выделении ими продуктов своей жизнедеятельности, обладающих токсическими свойствами [100].

В зерновой массе содержатся не только сорные примеси, но и часть зерна основной культуры, которая не соответствует установленным качественным требованиям. Такое зерно может быть мелким, недоразвитым, поврежденным, раздавленным и т.д. В дальнейшем оно может использоваться в фуражных целях. Для этого следует применять послеуборочную обработку вороха. При этом выделяют неполноценное зерно и засорители, которые являются благоприятной средой для развития микроорганизмов. Поэтому их обязательно следует отделить от основного вороха. Установлено, что шелушеное и целое зерно проса с влажностью 17% после двух недель хранения поражено на 50...55% плесенью. При этом зерно, покрытое пленкой, было поражено плесневыми грибами только на 8...13% [4].

Л.А. Трисвятский установил [102], что поражение плесенью неочищенного зернового вороха на третьи сутки составило 25%, а у очищенного зерна – 3%. Спустя 3 дня температура неочищенного зернового материала составляла 43°C. При краткосрочном хранении количество бактерий на поврежденном зерне в сравнении с целым увеличилось в 3,5 раза, а плесени – в 52 раза.

Таким образом, на качество зерна при хранении оказывает влияние множество факторов. Микрофлора, которая развивается в зерновом материале, отрицательно сказывается на его качестве, особенно если зерно недозрелое или травмированное. Повышенная влажность и температура создают благоприятные условия для развития плесневых грибов, бактерий и микроорганизмов. Для угнетения развития микрофлоры необходимо применять современные способы озонной обработки хранящегося зерна.

1.4 Влияние озонной обработки на зерновых вредителей и микрофлору зерна

В процессе хранения зерна необходимо проводить своевременную обработку для борьбы с вредителями. Применение химических препаратов позволяет сохранять урожай в складских помещениях без заражения насекомыми. Однако это требует значительных затрат энергии и средств. Более того, такая химическая обработка в дальнейшем может негативно повлиять на баланс микрофлоры. В каче-

стве альтернативы пестицидам наиболее эффективным и экологически чистым способом является процесс озонной обработки зерна [69, 88, 96, 114, 127].

Штанько Р.И. установил [112], что зараженное вредителями зерно необходимо озонировать с концентрацией $0,12 \dots 1,35 \text{ г/м}^3$ при экспозиции один час. Спустя сутки эффективность при концентрации $0,12 \text{ г/м}^3$ оказалась незначительной, хотя в зерне присутствовали мертвые и парализованные особи амбарных и рисовых долгоносиков. Полное уничтожение жуков зафиксировано к третьему дню. Озонирование с концентрацией $1,35 \text{ г/м}^3$ позволило уничтожить всех жуков рисового долгоносика в процессе обработки. Оставшаяся часть жуков амбарного долгоносика после обработки не проявляли признаков жизни, хотя их малая часть находилась в глубокой парализации, что в последствие также приводило к их гибели.

Исследования по озонной дезинсекции также проводили М.А.М. Осман и Г.А. Закладной [66]. Концентрация озона в процессе эксперимента составляла 1 г/м^3 , а температура смеси – $18 \dots 22 \text{ }^\circ\text{C}$. После начала обработки садки с насекомыми постепенно вынимали из зоны воздействия газа. В течение последующей недели с суточным интервалом вёлся подсчёт количества живых, парализованных и умерших вредителей. Так за первые сутки количество парализованных особей было незначительным, тем не менее восстановиться они не смогли и затем погибли. Исследователями также были установлены статистические показатели, демонстрирующие зависимость смертности насекомых от произведения концентрации озона и времени экспозиции. Показатели доз озонной обработки, приводящие к гибели 50 и 99% популяции жуков различных видов, составили: при озонировании рисового долгоносика – $0,4 \dots 1,2 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$; суринамского мукоеда – $1 \dots 2,5 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$; амбарного долгоносика – $1,8 \dots 5,4 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$; зернового точильщика – $1,8 \dots 7,4 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$; булавоусого хрущака – $1,8 \dots 9,6 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$. Для уничтожения личинок насекомых требуется доза озонной обработки от 1,3 до $2,8 \text{ г}\cdot\text{ч/м}^3$.

Исследования Н.Д. Романенко [63] показывают, что воздействие озона на вредителей зерна зависит от их вида и нормы расхода газа. Озонная обработка в течение 15 минут при концентрации озона 400 мг/м^3 продемонстрировала 100%

эффективность. При этом частичная гибель имаго особей определенных видов амбарных вредителей была зафиксирована уже на четвертые сутки. При меньших концентрациях озона 50 и 200 мг/м³ эффективность озонной обработки уменьшалась и на десятый день наблюдений составила 66,7%. Следовательно, при увеличении концентрации озона увеличивается его дезинсекционная способность.

Исследования по влиянию озонной обработки на вредителей зерна также проводили в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» [6]. Насекомых помещали в ёмкость объёмом пять литров, оборудованную входным и выходным штуцерами. Концентрация подаваемой озонозовоздушной смеси составляла 5...15 мг/м³. Расход газа был постоянным 1,0 м³/ч. Температура воздуха +25°C. Озонирование проводили в течение 1 часа. Результаты проведенного исследования представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты лабораторного исследования дезинсекции зерна озонозовоздушной смесью

Вредители	Количество выживших вредителей после обработки, %			Парализованные и уничтоженные вредители, %		
	Через 1 ч.	Через 18 ч	Через 115 ч.	Через 1 ч.	Через 18 ч.	Через 115 ч.
Гусеницы зерновой моли	75	50	25	25	50	75
Амбарный долгоносик	13,9	10,9	3	86,1	89,1	97
Зерновая моль	9,5	0	-	90,5	100	-

Анализ данных таблицы 1.3 показывает, что после часовой дезинсекции с концентрацией озона в озонозовоздушной смеси 5...15 мг/м³ вредители постепенно погибают. Сразу было парализовано 86,1% амбарных долгоносиков и 90,5% зерновой моли, гусеницы которой оказались наиболее озоностойчивы. Поскольку озон воздействует на гемолимфу вредителей, то влияние газа прослеживалось и после обработки. Спустя 18 часов погибли еще 3% амбарных долгоносиков и последние особи зерновой моли, а также 25% их гусениц. По прошествии пяти суток погибли еще 7,9% амбарных долгоносиков и 25% гусениц зерновой моли. Таким образом, часовая озонная дезинсекция с концентрацией озона в озонозовоздушной

смеси 5...15 мг/м³ позволяет уничтожить от 75 до 100% рассматриваемых зерновых вредителей [6].

Во Всероссийском научно-исследовательском институте зерна и продуктов его переработки установили, что биологическая активность озона зависит от множества факторов: вида вредителя, стадии развития, концентрации озона, влажности продукта, температуры среды и длительности воздействия. Газ наиболее эффективен в сухом ворохе. Концентрация озона в диапазоне от 0,02 до 1,4 г/м³ поражает вредителей зерна. При низком содержании газа для уничтожения насекомых требуется большая продолжительность обработки. В течение 1 и 2 суток после озонирования наблюдается скрытый период воздействия озона, затем на 3 и 5 сутки вредители со временем начинают погибать и выглядят парализованно. При высокой концентрации озона вредители умирают в зависимости от их вида за несколько минут или нескольких часов экспозиции. Выжившие насекомые отличаются пониженной репродуктивной способностью [115, 128].

Озонирование зернового вороха эффективно влияет на снижение активности микроорганизмов. Озонная обработка в течение 30 минут с концентрацией газа 2 мг/м³ позволяет обеззаразить значительное количество зерновых культур [8]. Согласно данным Е.К.М. Саеда [94] девятичасовое озонирование с содержанием озона в озоновоздушной смеси 0,8 г/м³ приводит к угнетению 95% анаэробных, мезофильных и иных видов микроорганизмов. Также стоит отметить, что озон способен разрушать плазму микробов, тем самым сводя к минимуму вероятность их восстановления. Озонирование, в отличие от ядохимикатов, оказывает воздействие на оболочку микроорганизмов, что гарантирует нарушение их репродуктивной функции и отсутствию потомства. Следовательно, применение озонной обработки является эффективным методом обеззараживания зернового вороха от микроорганизмов.

Согласно данным исследований В.Н. Авдеевой [1] для эффективного угнетения грибов рода «*Penicillium*», «*Aspergillus*», «*Fusarium*», «*Alternaria*», «*Aspergillus*», «*Rhizopus*» рекомендуемая доза озона составляет 28,8 г·с/м³. В ходе эксперимента было отмечено, что на 7 и 14 сутки наблюдений снижение заражен-

ности составило 33...89% и 65...96,4% соответственно. Наиболее устойчивы оказались грибы рода «*Rhizopus*», «*Alternaria*» и «*Penicillium*». После обработки их количество уменьшилось на 65...70%. R. Gammon [119] отмечает, что устойчивость к озонированию проявляется у бактерий и некоторых грибных инфекций в стадии логарифмического роста.

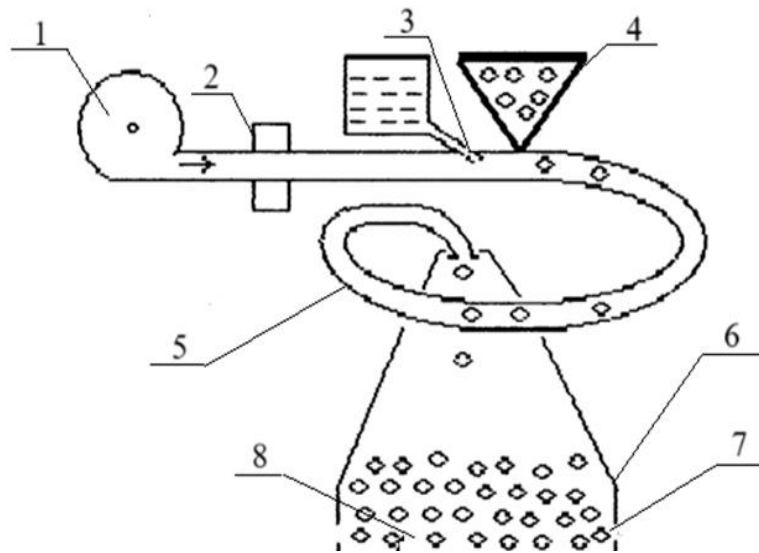
Из исследований, проведенных Е.К.М. Саеедом [94], следует, что грибы вида «*Aspergillus glaucus*» менее подвержены влиянию озонной обработки. Озонирование в течение девяти часов с концентрацией газа 0,8 г/м³ привело к сокращению споровых бактерий на 30% и грибных инфекций на 70%. Аналогичные результаты были получены С.В. Вербицкой [11]. В своих исследованиях ей удалось сократить зараженность семян фитопатогенной микрофлорой до 65% с помощью обработки озонном. Попытки совместить озонирование с другими способами не привели к значительным результатам, а только усложнили процесс [8]. Следовательно, озонная обработка способствует значительному сокращению содержания бактерий и грибов в зерновом ворохе.

Таким образом, анализ исследований по озонной дезинсекции зерна показал, что данный вид обработки является эффективным. При этом диапазон концентраций озона в озонозвоздушной смеси варьируется в очень большом диапазоне от 2 до 1400 мг/м³. С увеличением содержания газа эффект от обработки повышается. Для борьбы с микроорганизмами, бактериями и грибами необходимая доза озона достигает 28,8 г·с/м³.

1.5 Анализ патентных исследований по озонной обработке зерна и семян зерновых культур

Для изучения устройств и способов по озонной обработке зерна и семян зерновых культур в процессе хранения был проведен соответствующий патентный поиск на глубину 17 лет.

Известно [77] устройство для обработки семян озоном (патент РФ на изобретение №2341924), состоящее из вентилятора 1, озонатора 2, резервуара 3, бункера 4, спиралевидной рабочей камеры 5, ёмкости из воздухонепроницаемого материала 6 с отверстиями 7, заполненной семенами 8 (рис. 1.7).



1 – вентилятор; 2 – озонатор; 3 – резервуар; 4 – бункер; 5 – рабочая камера;
6 – ёмкость из воздухонепроницаемого материала; 7 – отверстия; 8 – семена

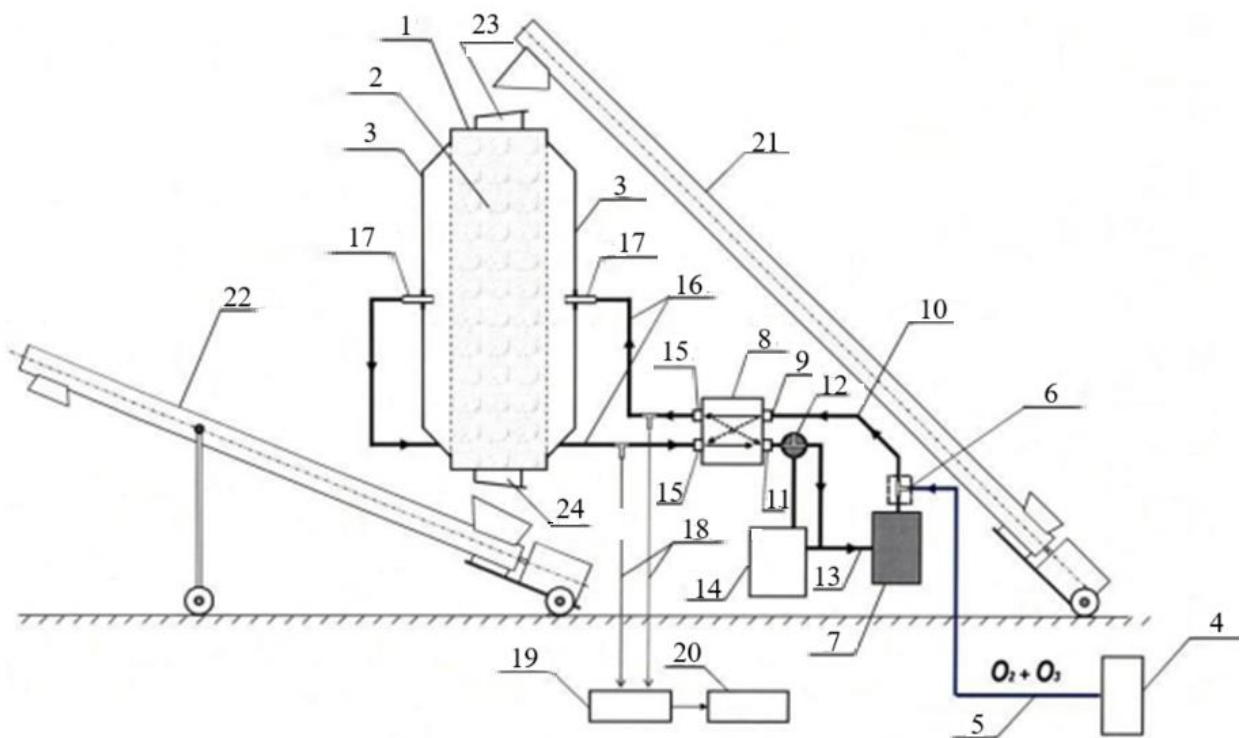
Рисунок 1.7 – Устройство для обеззараживания семян сельскохозяйственных культур озоновоздушной смесью, защищённый патентом РФ на изобретение № 2341924

Принцип работы данного устройства следующий. В бункер 4 (рис. 1.7) загружаются семена, которые под силой собственной тяжести поступают в спиралевидную рабочую камеру 5. Там они подвергаются смачиванию водой из резервуара 3. Данный процесс способствует лучшему влиянию озонной обработки на вредителей в семенном материале за счёт воспрепятствования окислительно-восстановительным процессам у насекомых. Нагнетание воздуха в озонатор происходит посредством вентилятора 1. Получаемый озоновоздушный поток с концентрацией озона $10...20 \text{ мг/м}^3$ перемещает семена по спиралевидной рабочей камере 5. Обработанные семена попадают в герметичную ёмкость, где находятся в течение 30 минут. Это увеличивает обеззараживающий эффект. Избыточное давление сбрасывается через отверстия 7 в ёмкости [77].

Отличительной особенностью данного устройства является его спиралевидная рабочая камера и ёмкость из воздухонепроницаемого материала с отверстиями в нижней части. Но у данной установки есть и определенные недостатки. Её производительность ограничена малым объемом ёмкости для обработанных семян. Кроме того, смачивание семян водой повышает вероятность забивания спи-

ралевидной рабочей камеры и требует проведения дополнительной операции сушки.

Известен [75] патент РФ на изобретение № 2556703, конструкция которого включает в себя бункер 1 (рис. 1.8), центральную ёмкость 2, боковые камеры 3, озонаторную установку 4, газопровод 5, устройство смешивания 6, вентилятор 7, блок коммутации 8, штуцеры 9, 11, 15, 17, магистрали нагнетания 10 и всасывания 13, трёхходовой кран 12, деструктор 14, трубопровод 16, шланги 18, измеритель концентрации озона 19, вычислительный блок 20, шнековые конвейеры 21, 22, люки 23, 24.



1 – бункер; 2 – камера озонирования; 3 – боковые камеры; 4 – озонаторная установка;
5 – озонопровод; 6 – устройство смешивания; 7 – вентилятор; 8 – блок коммутации потоков
озонсодержащей газовой смеси; 9, 11, 15 и 17 – штуцера; 10 и 13 – магистрали нагнетания и
всасывания; 14 – деструктор остаточного озона; 16 – трубопровод; 18 – шланги; 19 – измери-
тель концентрации озона; 20 – вычислительный блок; 21 и 22 – загрузочный и выгрузной шне-
ковые конвейеры; 23 и 24 – выгрузной и загрузочный люки

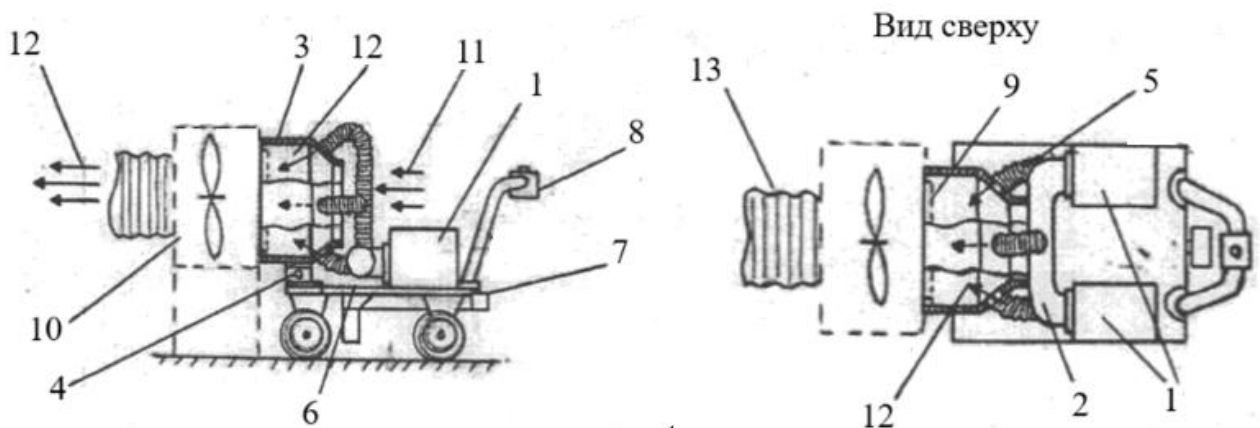
Рисунок 1.8 – Схема оборудования для обработки семян озонем, защищённая патентом РФ на изобретение № 2556703

Рабочий процесс установки осуществляется следующим образом. Поток семян сельскохозяйственных культур подается по шнеку 21 (рис. 1.8) в центральную камеру 2 бункера 1 через загрузочный люк 23. При заполнении всего объема подача семян останавливается. Далее загрузочный люк закрывается и включаются вентилятор 7, озонатор 4, измеритель концентрации озона 19 и вычислительный блок 20. При этом трехходовой кран 12 переводится в положение, при котором выходной штуцер блока коммутации 8 напрямую подключается к всасывающей магистрали 10. Далее озон подается по газопроводу 5 в смесительное устройство 6, где происходит формирование озонозоооздушной смеси для обработки семян. Конструкция установки даёт возможность поменять направление озонозоооздушного потока посредством блока коммутации 8 по сигналу от вычислительного блока 20. Последний также отвечает за контроль количества озона, поглощенного слоем семян. Измеритель концентрации газа 19 контролирует параметры озонозоооздушной смеси на входе и выходе из бункера 1. После завершения обработки озонатор 4 отключается. Затем трехходовой кран 12 переключается так, чтобы выход деструктора остаточного озона 14 соединялся с магистралью всасывания 13 вентилятора 7. В таком режиме выполняется разложение остаточного газа. По окончании этого процесса вентилятор 7 отключается и открывается люк выгрузки 24, через который семена выгружаются на разгрузочный конвейер 22.

Уникальность представленного изобретения заключается в его трёхкамерной конструкции бункера, поскольку его центральная часть отделена от боковых перфорированными стенками. Тем самым имеется возможность изменения направления подаваемого потока озонозоооздушной смеси, что позволяет обеспечить его равномерное распространение по всему объёму обрабатываемого семенного материала. У данной разработки тоже есть ряд недостатков. К одному из них относится использование шнековых механизмов для загрузки и выгрузки семян, которые могут их травмировать. Также в изобретении не предусмотрены датчики контроля влажности и температуры зерна. Кроме того, остается непонятным, каким образом озон поступает из озонатора в устройство смешивания. Анализ кон-

струкции показал, что несмотря на двухстороннюю подачу газа в центре ёмкости семена будут получать меньшую дозу, чем материал у перфорированных стенок.

Известна конструкция [78], защищенная патентом РФ на полезную модель №163357. Устройство состоит из тележки 6 (рис. 1.9), на которой установлены озонаторы 1, соединенные между собой коллектором 2. На установке предусмотрены раструб-смеситель 3, устройство перемещения 4, перфорированные трубки 5 и пульт управления 8.



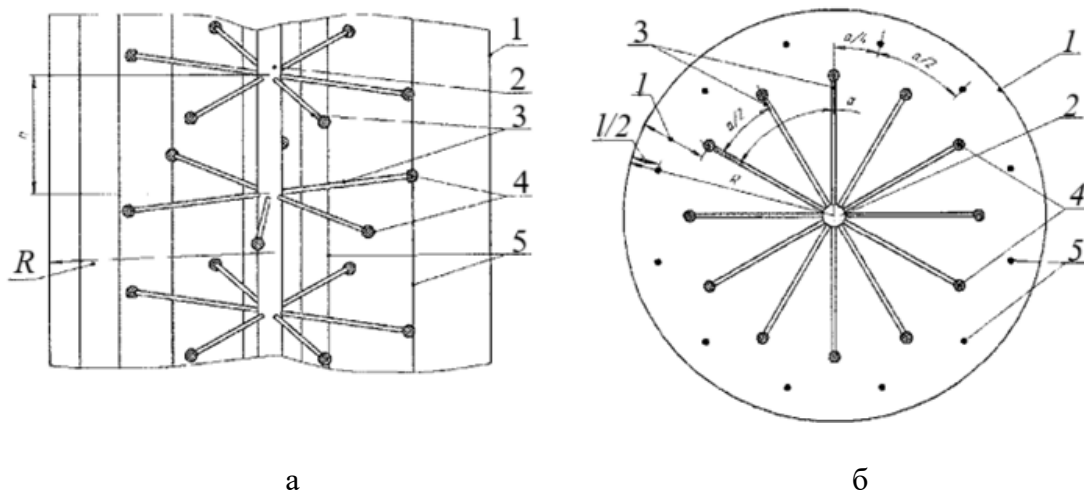
- 1 – озонатор; 2 – коллектор; 3 – раструб-смеситель; 4 – устройство перемещения;
 5 – перфорированные трубки; 6 – тележка; 7 – тормоз; 8 – пульт управления;
 9 – входная решетка; 10 – вентилятор зернохранилища; 11 – наружный воздух;
 12 – озоновоздушная смесь; 13 – перфорированная труба

Рисунок 1.9 – Мобильное устройство для обезвреживания зерна в зернохранилищах, защищенное патентом РФ на полезную модель №163357

Работает данная установка следующим образом. Раструб-смеситель 3 (рис. 1.9) фиксируется на входной решетке вентилятора 10 зернохранилища с помощью специального механизма. При этом устройство необходимо зафиксировать тормозом 7 и подключить к электросети с напряжением 220 В. После этого приводятся в действие озонаторы 1, которые вырабатывают озон, подаваемый через перфорированные трубки 5 в раструб-смеситель 3, где он смешивается с воздухом, нагнетаемым вентилятором 10. Далее озоновоздушная смесь поступает в перфорированную трубу 13 стационарной системы вентиляции и подается в обрабатываемое помещение или зернохранилище.

Отличительная особенность данной установки заключается в ее мобильности, что позволяет подключать оборудование к уже имеющейся стационарной системе вентиляции зернохранилища или помещения. К недостаткам данной модели относится отсутствие возможности регулировки концентрации озона в озоновоздушной смеси, что не позволяет установить рациональные режимы обработки. Кроме того, установка не имеет собственного вентилятора и осушителя воздуха. Эти ограничения сдерживают возможности применения данной мобильной установки.

Наиболее перспективной конструкцией является хранилище семян, защищенное патентом РФ на изобретение № 2659904 [76]. За основу взято силосное зернохранилище семян, в корпусе 1 которого (рис. 1.10) установлен воздухопровод 2 с отводами 3, снабженными форсунками 4. Последние служат для подачи озоновоздушной смеси в зерновую массу. Контроль температуры зерна ведется с помощью ряда датчиков 5.



а – фрагмент прямоугольной диметрической проекции продольного разреза; б – поперечный разрез;
1 – цилиндрический корпус; 2 – воздухопровод; 3 – отводы; 4 – форсунки; 5 – датчики температуры

Рисунок 1.10 – Хранилище семян, защищённое патентом РФ на изобретение № 2659904

Работает изобретение следующим образом. Озонаторная установка вырабатывает озоновоздушную смесь, которая подается в воздухопровод 2 (рис. 1.10). Затем газ распространяется по отводам 3 и с помощью форсунок 4 распыляется в массе

семян. Стоит отметить, что встроенные электромагнитные клапаны нормально-закрытые, что дает возможность подавать озоновоздушную смесь локализовано. Обработка заканчивается, когда показания датчиков температуры зерна в норме. Отработанная озоновоздушная смесь с остаточным неразложившимся газом направляется обратно в хранилище, но перед этим предварительно проходит через фильтрующие элементы, осушитель воздуха и устройство смешивания. Это позволяет стабилизировать концентрацию озона в подаваемой озоновоздушной смеси.

Отличается данное хранилище семян имеющимися в корпусе отводами, которые расположены с определенным шагом, образуя ярусы для равномерной обработки. Недостатком изобретения является отсутствие контроля за зараженностью семян и зерна вредителями во время хранения.

Таким образом, проведя обзор различных разработок с возможностью озонной обработки зерна и семян можно сделать вывод, что во многих конструкциях имеется ряд схожего оборудования в виде озонаторов и вентиляторов. Однако имеются и значительные отличительные особенности. Каждая такая установка обладает своими недостатками. В большинстве случаев это связано с отсутствием систем автоматизации и ограниченной универсальностью применения. Современный уровень развития электронных технологий позволяет создавать системы, способные отслеживать степень заражения зерна и автоматически настраивать оптимальный режим обработки. Следовательно, для обеспечения эффективной озонной дезинсекции зерна необходимо активно внедрять современные системы распознавания вредителей зерна, тем самым совершенствуя используемое оборудование. Это позволит создать такие условия, при которых вредные насекомые будут уничтожаться, при этом качественные показатели зерна не будут ухудшаться. Наиболее перспективной конструкцией является хранилище семян, защищённое патентом РФ на изобретение № 2659904, которое снабжено в корпусе отводами, расположенными с определенным шагом, образуя ярусы для равномерной обработки озоновоздушной смесью, поэтому данное устройство будем использовать в качестве прототипа для дальнейшей модернизации.

1.6 Выводы по разделу

По результатам проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

- в процессе хранения зерна при отсутствии своевременных средств мониторинга и контроля в ворохе развиваются различные вредители, которые ежегодно уничтожают до 15% всего мирового урожая зерновых культур;
- технологии дезинсекции зерна посредством охлаждения, нагревания, фумигации, протравливания имеют ряд недостатков, которые препятствуют их применению, в то время как озонная обработка обладает 100% эффективностью, экологической безопасностью, экономической целесообразностью и детоксикационными свойствами, что делает её наиболее перспективной при борьбе с зерновыми вредителями;
- развитие микрофлоры негативно сказывается на качестве хранящегося зерна, особенно при наличии повреждений, высокой влажности и температуре, что требует применения современных средств дезинсекции для её подавления;
- озонная дезинсекция зерна доказала свою 100% эффективность при высоких концентрациях озона, достигающих 1400 мг/м^3 и дозах до $28,8 \text{ г}\cdot\text{с/м}^3$, что является чрезмерно опасным содержанием газа для обслуживающего персонала, поэтому особый интерес представляют исследования менее жестких режимов дезинсекции;
- проведённый патентный поиск показал, что установкам по дезинсекции зерна присущи общие недостатки, связанные с отсутствием систем автоматизации, поэтому для повышения эффективности процесса необходимо внедрение современных систем машинного зрения и распознавания вредителей, при этом наиболее перспективной конструкцией является устройство хранилища семян, защищённое патентом РФ на изобретение №2659904, которое следует взять за прототип при дальнейшем модернизации.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА

2.1 Анализ теоретических исследований по изменению концентрации озона в озоновоздушной смеси при дезинсекции зерна

В связи со значительным прогрессом в освоении озонных технологий сложилась устойчивая тенденция к использованию процесса озонирования при дезинсекции зерна [85, 109, 126]. При этом появились новые направления научных исследований [21, 55, 61, 71, 74, 90, 105, 106, 107]. Несмотря на это в настоящее время вопросы, касающиеся взаимодействия озоновоздушной смеси с зерном, все еще находятся на стадии изучения, хотя имеются некоторые разрозненные аналитические публикации по теории поведения озона в зерновом ворохе.

Смирнов А.А. исследовал процесс прохождения озоновоздушной смеси через слой зернового материала [95]. При этом изменение концентрации озона в зерне описывает следующим выражением:

$$C_i = C_o - \frac{(g_{\text{адс}} + g_{\text{разл}} + g_{\text{обм.}} + g_{\text{хим.р}}) \cdot t_{\text{конт}}}{W}, \quad (2.1)$$

где C_i – изменения концентрации озона в зерне, мг/м³;

C_o – начальная концентрация озона, мг/м³;

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

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

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

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

$t_{\text{конт}}$ – время контакта с зерновым слоем, с;

W – объемный расход озоновоздушной смеси через зерновой слой, м³/с.

Автор считает [95], что при прохождении озоновоздушной смеси через слой зерна каждый его уровень поглощает определенное количество поступающего озона, снижая его концентрацию на величину dp . Этот показатель соответствует содержанию газа, которое было поглощено и разложено в зерновом ворохе за время t . Следовательно, чтобы охарактеризовать снижение уровня озона, при

определенных допущениях, можно применять уравнение органического роста, т.е. в первом приближении пропорциональность начальному количеству газа:

$$\frac{dp}{dt} = -K_{\text{кпр}} \cdot g_t, \quad (2.2)$$

где $K_{\text{кпр}}$ – коэффициент пропорциональности расходования озона по толщине слоя;

g_t – количество озона в момент t .

В действительности зависимость 2.2 облегчает и упрощает понимание взаимосвязи между расходом озона на разных стадиях его прохождения через зерновые слои. Однако, физический смысл указанного коэффициента пропорциональности в последующих расчетах остается неизвестным. Соответственно, зависимости, изложенные в работе [95], недостаточно точные.

Д.А. Нормов в своих исследованиях утверждает, что скорость, с которой зерно поглощает озон, зависит от его сорбционной активности и уровня концентрации озона [39]. Он представил эту зависимость в следующем виде:

$$\frac{dC}{dt} = -K_C \cdot C_{\text{озон}} \cdot S_{\text{озм}}, \quad (2.3)$$

где dC/dt – скорость поглощения озона зерном;

$C_{\text{озон}}$ – концентрация озона в озоновоздушной смеси, мг/м³;

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

$S_{\text{озм}}$ – площадь обрабатываемого зернового материала, м².

К выражению 2.3 имеются вопросы с точки зрения теории размерностей. Известно, что размерности левой и правой частей этого уравнения должны совпадать, однако в текущем виде это не так. Возможно, имеются ошибки или опечатки.

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

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S}{V_{\text{обр}}} \cdot \left[v \cdot (C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}) - K_C \cdot C_{\text{вых}} \cdot V_{\text{обр}} \right], \quad (2.4)$$

где $V_{\text{обр}}$ – объем обрабатываемого зерна, м³;

v – скорость движения озоновоздушной смеси, м/с;

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

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

Решение представленного уравнения выражено в следующем виде:

$$C_{\text{вых}} = \frac{C_{\text{вх}} \cdot v}{v + K_C \cdot S \cdot V_{\text{обр}}} \left[1 - e^{-\frac{v + K_C \cdot S \cdot V_{\text{обр}}}{V_{\text{обр}}}} \right] \cdot t_{\text{обр}}, \quad (2.5)$$

где $t_{\text{обр}}$ – затраченное время обработки, с.

Несмотря на аналитические исследования, автору не удалось определить константу скорости поглощения озона единицей объема зерна (K_C). Было сделано заключение, что полученное выражение является трансцендентным, то есть его решение возможно только методом итерационных расчетов с помощью специальной компьютерной программы, а не аналитическим путем [39].

Посредством программы Matlab было получено решение данного уравнения, которое имеет следующий вид:

$$K_C = - \frac{v - \frac{C_{\text{вх}} \cdot t_{\text{обр}} \cdot v + C_{\text{вых}} \cdot V_{\text{обр}} \cdot W_1 \frac{C_{\text{вх}} \cdot t_{\text{обр}} \cdot v \cdot e^{-\frac{C_{\text{вх}} \cdot t_{\text{обр}} \cdot v}{C_{\text{вх}} \cdot V_{\text{обр}}}}}{C_{\text{вых}} \cdot V_{\text{обр}}}}{C_{\text{вых}}}}{S \cdot V_{\text{обр}}}, \quad (2.6)$$

где W_1 – функция Ламберта.

Проверка результатов аналитических расчётов показала, что предложенная зависимость 2.6 недостаточно точно описывает процесс взаимодействия озона с зерном. Показатели экспериментальных значений константы существенно варьировались, в том числе в зависимости от условий проведения опыта. Следовательно, данный теоретический подход требует дополнительного уточнения.

Многие учёные также изучают процесс растворения озона в жидкости [89, 93]. Например, подобные исследования были проведены в Московском государственном университете [60]. Согласно их работе, растворимость озона можно характеризовать коэффициентом Генри или коэффициентом растворимо-

сти (R_l). Данный показатель зависит от природы газа и его температуры. Для практических целей удобнее использовать эффективный коэффициент Генри, который при заданной температуре можно определить по следующей формуле:

$$R_l = C_{\text{ж}} / C_{\text{г}}, \quad (2.7)$$

где $C_{\text{ж}}$ и $C_{\text{г}}$ – концентрации озона в жидкой и газовой фазе соответственно, мг/м³.

Авторы [60] отмечают, что на растворимость озона в жидкости существенно влияют такие факторы, как температура, pH среды, её электропроводность, наличие примесей. Существующие расхождения в данных по растворимости озона обусловлены, в основном, различиями в проведении экспериментов и методиках определения искомых параметров. При этом подход, основанный на изменении концентрации озона за счет его растворения, не может быть применен для обработки зерна и семян.

Исследователи из Томского государственного университета предложили описывать разложение озона с помощью кинетического уравнения псевдопервого порядка [37]:

$$-(d[O_3]/dt) \cdot pH = k'[O_3]. \quad (2.8)$$

Из анализа зависимости следует, что устойчивость озона зависит от концентрации газа, pH среды, в которой проводится озонирование, и от состава обрабатываемого объекта. В данном случае разложение озона происходит в жидкости, поэтому применение кинетического уравнения к макропроцессам в семенной массе будет достаточно сложным.

Таким образом, несмотря на активное изучение процесса озонирования, на данный момент нет целостной теории, позволяющей описать изменение концентрации озона в зерновой массе и определить зависимости взаимодействия газа с зерном. Поэтому требуется проведение дальнейших теоретических исследований, без которых невозможно смоделировать процесс распада озона, что сдерживает разработку эффективной технологии озонной обработки зерна и определение рациональных режимов работы оборудования при дезинсекции.

2.2 Теоретическое обоснование взаимодействия озона с зерном

Анализ научных исследований взаимодействия озона с зерном показал, что в настоящее время нет целостной теории, описывающей процесс изменения концентрации озона в зерновой массе при озонировании. Для устранения выявленного недостатка использовали аналитические подходы, основанные на известных физических законах, которые описывают процесс диффузии. Эти закономерности могут быть адаптированы к процессу озонирования, учитывая специфические свойства зернового материала.

В процессе озонирования зернового вороха количество молекул, которое адсорбируется на поверхности зерна, может быть охарактеризовано уравнением Ленгмюра-Шефера [125]:

$$\Gamma = 2A \cdot C_{\text{мол}} \sqrt{\frac{K_D \cdot t}{\pi}}, \quad (2.9)$$

где Γ – количество молекул в единице массы, адсорбированных или абсорбированных за определённое время t , мг/с;

A – площадь поверхности, м²;

$C_{\text{мол}}$ – концентрация молекул озона в объеме, мг/м³;

K_D – коэффициент диффузии абсорбера, м²/с;

t – время обработки, с.

На краткосрочном пределе применяя дифференцирование по времени можно получить уравнение, описывающее скорость диффузии озона, которое имеет вид:

$$v_D = \frac{d\Gamma}{dt} = 2dC \sqrt{\frac{K_D}{dt \cdot \pi}}, \quad (2.10)$$

где v_D – удельная скорость озонной диффузии через площадь поверхности зерен (диффузионный поток), мг/(м²·с).

Математическую модель диффузионных процессов применительно к адсорбции и абсорбции разбавленного растворенного вещества поверхностью или границей раздела в газообразном или жидком растворе можно получить из двух законов Фика.

Первый закон Фика позволяет количественно описать процесс диффузии. В нём отражается важный факт того, что поток вещества в направлении оси X пропорционален градиенту концентрации, выраженному как dC/dx [92].

Математическое выражение для диффузионного потока или скорости диффузии, рассчитываемых как количество вещества на единицу площади за единицу времени, представляют в следующем виде [116, 118]:

$$v_d = -K_d \frac{dC}{dx}. \quad (2.11)$$

Движущей силой одномерной диффузии при проникновении в поры зерна будет являться разница концентраций содержания озона в порах зерна и на поверхности.

Для идеальных смесей величина $-dC_{\text{пор}}/dx$ рассматривается как градиент концентрации при изменении вдоль оси X . Она же является движущей силой, обеспечивающей проникновение озона в зерновой материал, если направление оси X принимается от поверхности зерна к его центру и зависит от размеров зерен и их пористости.

В данном случае при переходе к конечным величинам $dC_{\text{пор}} \approx \Delta C_{\text{пор}}$ – это разница концентрации в порах зернового материала и в озоновоздушной смеси. Также можно отметить, что проникновение осуществляется со всех сторон и среднее расстояние проникновения зернового материала составит:

$$dx = \frac{d_{\text{ср}}}{4}, \quad (2.12)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр зерна, мм.

Следовательно, разница концентраций в озоновоздушной смеси и в порах в данный момент времени

$$\Delta C_{\text{пор}} = C - C_{\text{пор}}, \quad (2.13)$$

где C – концентрация озона в озоновоздушной смеси на поверхности зерна, мг/м³;

$C_{\text{пор}}$ – концентрация молекул озона в порах зерна, мг/м³.

Таким образом, уравнение скорости на всем промежутке проникновения зернового слоя примет вид:

$$v_d = -K_D \frac{dC_{\text{пор}}}{dx}. \quad (2.14)$$

в конечных величинах выражение 2.14 имеет следующий вид:

$$v_d = 4K_D \frac{C - C_{\text{пор}}}{d_{\text{ср}}}. \quad (2.15)$$

Применение второго закона Фика дает возможность предсказывать, каким образом диффузия приводит к изменению концентрации озона со временем. Этот закон имеет идентичную математическую форму с уравнением теплопроводности, а его базовое решение схоже с решением для теплового ядра за исключением замены коэффициента теплопроводности k на коэффициент диффузии K_D [92]

$$C(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot K_D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4K_D \cdot t}}. \quad (2.16)$$

Проведем проверку полученного уравнения с точки зрения размерности:

$$\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \neq \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}}} \Leftrightarrow \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \neq \frac{1}{\text{м}}.$$

Из размерности не хватает мг/м³, так как концентрация не в молях, а в миллиграммах. Для корректного представления полученного уравнения введем в формулу парциальную плотность озона.

Тогда,

$$C(x, t) = \frac{\rho_o \cdot \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi \cdot K_D \cdot t}} e^{-\frac{x^2}{4K_D \cdot t}}, \quad (2.17)$$

где ρ_o – парциальная плотность озона, мг/м³;

V – общий объем зерна, м³;

S – площадь поверхности зерна, м².

Тогда уравнение в размерностях будет иметь корректный вид:

$$\frac{\text{МГ}}{\text{М}^3} = \frac{\frac{\text{МГ} \cdot \text{М}^3}{\text{М}^3 \cdot \text{М}^2}}{\sqrt{\frac{\text{М}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}}}.$$

Кроме того, не сложно доказать, что существует взаимосвязь между парциальной плотностью и количеством вещества озона, присутствующего в самой озоновоздушной смеси.

Концентрация в смеси при $x = 0$ зависит только от времени и равна

$$C(t) = \frac{\rho_o \cdot \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi \cdot K_D \cdot t}}, \quad (2.18)$$

а концентрация в порах при $x = \frac{d_{\text{cp}}}{4}$

$$C_{\text{пор}}(t) = \frac{\rho_o \cdot \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi \cdot K_D \cdot t}} e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}. \quad (2.19)$$

Предположив, что в месте соприкосновения с зерном диссоциация находится на начальной стадии и концентрация озона в озоновоздушной смеси рядом с зерном C , что обусловлено малыми пустотами в зерновом ворохе, то

$$C_{\text{пор}}(t) = C(t) \cdot e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}. \quad (2.20)$$

Таким образом, уравнение скорости диффузии будет иметь следующий вид:

$$v_d(t) = 4K_D \frac{C(t) - C_{\text{пор}}(t)}{d_{\text{cp}}} = 4K_D \frac{C(t) - C(t)e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}}{d_{\text{cp}}} = 4K_D \frac{C(t) \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}\right)}{d_{\text{cp}}}. \quad (2.21)$$

Скоростью заполнения пор относительно площади поверхности зёрен пользоваться достаточно неудобно. Более рационально оперировать скоростью диффузии, которая характеризует изменение концентрации при заполнении пор в объёме:

$$v_{V_d}(t) = v_d(t) \cdot \frac{S}{V}. \quad (2.22)$$

Если исходить из понятия скважистости зерна, можно применить понятие коэффициента скважистости зернового вороха $k_{\text{СКВ}} = V_{\text{ЗМ}}/V$, который представляет отношение объёма зерновой массы к объёму, занимаемому зерном с учетом наличия пространств между отдельными зёрнами. Коэффициент $k_{\text{СКВ}}$ всегда имеет значение меньше 1. Тогда,

$$\frac{V}{S} = \frac{V_{\text{ЗМ}}}{k_{\text{СКВ}} \cdot S}. \quad (2.23)$$

Примем соотношение $S/V_{\text{ЗМ}}$ коэффициентом геометрии:

$$k_f = \frac{S}{V_{\text{ЗМ}}}. \quad (2.24)$$

Коэффициент геометрии представляет собой среднее отношение площади поверхности зёрнышка к его объёму. Измеряется в размерности м^{-1} . Исходя из этого, получим следующее выражение:

$$\frac{V}{S} = \frac{V_{\text{ЗМ}}}{k_{\text{СКВ}} \cdot k_f \cdot V_{\text{ЗМ}}} = \frac{1}{k_f \cdot k_{\text{СКВ}}}. \quad (2.25)$$

И как следствие

$$\frac{S}{V} = k_f \cdot k_{\text{СКВ}}. \quad (2.26)$$

Тогда,

$$v_{V_d}(t) = v_d(t) \cdot k_f \cdot k_{\text{СКВ}}. \quad (2.27)$$

В результате проведенных преобразований получаем следующее уравнение

$$v_{V_d}(t) = 4k_f \cdot k_{\text{свб}} \cdot K_D \frac{C(t) \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}} \right)}{d_{\text{ср}}}. \quad (2.28)$$

Таким образом, фактическая скорость диффузии, отнесённая к объёму зерна, с учётом скважистости и соотношения площади поверхности к объёму одного зёрнышка, зависит от ряда факторов: концентрации озона в озоновоздушной смеси, которая может меняться со временем, коэффициента диффузии K_D и средних размеров зёрен или семян. Эти размеры известны и для некоторых культур приведены в таблице 2.1 [17].

Таблица 2.1 – Средние размеры зерен и семян [17]

Наименование растений	Размеры зерен и семян, мм		
	Длина	Ширина	Толщина
Пшеница	4,2–8,6	1,6–4,0	1,5–3,8
Рожь	5,0–10,0	1,4–3,6	1,2–3,5
Кукуруза	5,5–13,5	5,0–11,5	2,5–8,0
Ячмень	7,0–14,6	2,0–5,0	1,4–4,5
Овес	8,0–16,6	1,4–4,0	1,2–3,6
Рис	5,0–12,0	2,5–4,3	1,2–2,8
Просо	1,8–3,2	1,2–3,0	1,0–2,2
Чумиза	1,3–2,5	1,3–2,3	0,9–1,8
Гречиха	4,4–8,0	3,0–5,2	2,0–4,2
Горох	4,0–10,0	3,7–10,0	3,5–10,0
Чечевица	4,0–8,8	4,0–8,0	2,0–3,3
Фасоль	7,2–18,5	4,7–11,0	2,7–10,0
Соя	5,0–10,5	4,5–8,0	4,0–7,0
Подсолнечник	7,5–15,0	3,5–8,6	1,7–6,0
Клещевина	10,0–16,5	6,5–11,5	4,6–8,4
Рыжик	1,5–2,5	0,8–1,5	0,6–1,3

Коэффициент диффузии K_D характеризует способность зерен поглощать озон через поверхность, т.е. поры. При нормальных условиях хранения зёрен и семян в зернохранилище данная величина, зависящая от температуры, может считаться постоянной.

Однако способность зёрен поглощать озон не бесконечна и может зависеть, как минимум, от количества пор, площади поверхности зерна и химического состава зерна, что может характеризоваться условной константой поглощения или её остаточной величиной. Принятая авторами [39, 95] константа поглощения K является постоянной величиной для необработанных зёрен и измеряется в мг/м^3 . Константа определяет количество поглощённого озона, которое может определяться обратимыми (K_o) и необратимыми (K_n) процессами. То есть имеет как минимум две составляющие $K = K_o + K_n$.

В случае поглощения зёрнами озона способность поглощать теряется. Очевидно, это величина будет зависеть от дозы озона, которая уже принята при обработке. Очевидно, что в некоторых предельных условиях K будет равно нулю. Однако с течением времени обратимые процессы снова восстанавливают константу поглощения до значения K_o . Текущее (остаточное) значение возможного количества поглощения озона зернами обозначим $K_{\text{ост}} = K - \Delta K$.

Пренебрегая химическими процессами на данном этапе рассмотрения, можно предположить, что константа поглощения фактически представляет собой среднюю дополнительную концентрацию озона, которую возможно поглотить на единицу объёма зерна. Считать ее постоянной величиной возможно только относительно, поскольку она зависит от внешней концентрации озона в межзерновом пространстве. Вероятно, именно этот факт препятствует ее достоверному экспериментальному определению. Кроме того, озон внутри семени будет разлагаться со временем, освобождая место для поглощения новой порции газа, поступающего в процессе обработки.

Максимальная константа поглощения – это фактически максимальная концентрация озона, приходящаяся на весь объем зерна

$$K \cdot V = C_{\text{пор max}} \cdot V_{\text{пор}}, \quad (2.29)$$

где $C_{\text{пор max}}$ – максимальная концентрация в порах, мг/м^3 ;

$V_{\text{пор}}$ – объем пор, м^3 .

Таким образом, получаем некоторую связь с максимальной концентрацией в порах $C_{\text{пор max}}$

$$K = C_{\text{пор max}} \cdot \frac{V_{\text{пор}}}{V}. \quad (2.30)$$

Учитывая, что максимальная концентрация в порах зависит от концентрации озонородушной смеси вне зерна

$$K = C \cdot \frac{V_{\text{пор}}}{V}. \quad (2.31)$$

Примем понятие коэффициента пористости зерна. Данный коэффициент является аналогом скважистости, но скважистость характеризует пустоты между зёрнами, а коэффициент пористости учитывает наличие пор в зернах. Тогда коэффициент пористости зернового материала может быть описан в следующем выражении:

$$k_{\text{пор}} = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{зм}}}. \quad (2.32)$$

Следовательно, объём, который должен быть заполнен в зерне при обработке озоном, составит:

$$V_{\text{пор}} = k_{\text{пор}} \cdot V_{\text{зм}}. \quad (2.33)$$

Тогда с учетом изменения во времени

$$K(t) = C(t) \cdot \frac{V_{\text{пор}}}{V} = C(t) \cdot \frac{k_{\text{пор}} V_{\text{зм}}}{V} = C(t) \cdot \frac{k_{\text{пор}} k_{\text{скв}} V}{V} = k_{\text{пор}} \cdot k_{\text{скв}} \cdot C(t). \quad (2.34)$$

Таким образом, объёмная скорость заполнения пор является скоростью изменения остаточного значения константы поглощения:

$$K_{\text{ост}} = K - dK. \quad (2.35)$$

Продифференцировав (2.34) по времени, получим

$$\frac{dK}{dt} = -v_{V_d} = -4k_f \cdot k_{\text{скв}} \cdot K_D \cdot \frac{C \cdot \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}\right)}{d_{\text{ср}}}, \quad (2.36)$$

где dK/dt – скорость озонопоглощающей способности зернового вороха за счёт диффузии через поверхность зерна, мг/с.

Скорость при полном заполнении пор в семенах не будет равна нулю, так как присутствует процесс разложения озона. Допустим, известна скорость разложения озона $v_{\text{ор}}$, измеряемая в миллиграммах в секунду (мг/с). Тогда зависимость (2.36) примет вид:

$$\frac{dK}{dt} = -v_{V_d} + v_{\text{ор}} = -4k_f \cdot k_{\text{скв}} \cdot K_D \cdot \frac{C \cdot \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}}\right)}{d_{\text{ср}}} + v_{\text{ор}}. \quad (2.37)$$

Анализ зав. 2.37 свидетельствует о том, что скорость изменения озонопоглощающей способности зернового вороха за счёт диффузии озона через поверхность зерновки зависит от характеристик зернового материала, свойств зерна, времени озонной обработки, а также параметров озоновоздушной смеси. Поэтому зерновым вредителям из дозы обработки следует вычитать озонопоглощающую способность зернового вороха. Следовательно, часть озоновоздушной смеси абсорбируется самим зерном.

Таким образом, из проведённых теоретических исследований установлена зависимость скорости поглощения озона зерновым ворохом dK/dt от коэффициента геометрии k_f , коэффициента скважистости $k_{\text{скв}}$, среднего диаметра зерна $d_{\text{ср}}$, коэффициента диффузии K_D , времени озонирования t , а также концентрации C и скорости разложения озона $v_{\text{ор}}$, позволяющая установить режим озонной дезинсекции на основе законов диффузии озона через поверхность зерновки.

2.3 Теоретическое определение скорости разложения озона

Полученное вследствие теоретических рассуждений выражение 2.37 позволяет установить скорость озонопоглощающей способности зернового вороха. Однако для полного описания динамики данного процесса при дезинсекции необходимо определить теоретическую зависимость, описывающую скорость разложения озона v_{op} . Очевидно, что она будет зависеть от концентрации газа внутри зернового материала. При этом со временем скорость разложения будет стремиться к нулю. Похожие процессы обычно описываются экспоненциальным законом, который можно записать следующим образом:

$$v_{op} = -\left(C_{nop}(t)\left(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)}\right) + v_{кор}\right) \quad (2.38)$$

или

$$v_{op} = -\left(C(t)e^{\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\left(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)}\right) + v_{кор}\right), \quad (2.39)$$

где K_{op} – константа разложения озона, c^{-1} ;

t_0 – время начала процесса разложения, с.

После подстановки в уравнение 2.37 зависимости 2.39 и преобразования зависимость для скорости поглощения будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} = & -4k_f k_{ck6} K_D \frac{C(t) \left(1 - e^{\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{cp}} - C(t) e^{\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)}\right)}{t_1} - v_{кор} = \\ = & -C(t) \left(4k_f k_{ck6} K_D \frac{1 - e^{\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)}\right)}{t_1}\right) - v_{кор} \end{aligned} \quad (2.40)$$

где t_1 – коэффициент приведения к единицам измерения времени, $t_1=1$ с.

Решить такое уравнение в общем виде достаточно сложно, однако возможны численные решения для поиска величины K , представляющей фактическое количество поглощенного озона в виде изменения концентрации.

Если исходить из введённого понятия скорости разложения, то константу разложения можно определить в некотором конечном объеме, рассматривая уравнения в дифференциальной форме:

$$v_{op} = \frac{dC}{dt} = - \left(C(t) \frac{(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)})}{t_1} + v_{кор} \right). \quad (2.41)$$

Для решения данной зависимости существует два принципиальных подхода. Обратимся к первому из них и перейдем к конечным величинам:

$$v_{op} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = -C_{cp} \frac{(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)})}{t_1} - v_{кор}, \quad (2.42)$$

где C_{cp} – среднее значение концентрации за время t , мг/м³;

Δt – конечный промежуток времени, для которого определяется изменение концентрации, с.

Тогда

$$\Delta C = -C_{cp} \Delta t \frac{(1 - e^{-K_{op}(t_0+t)})}{t_1} - v_{кор} \Delta t. \quad (2.43)$$

Отсюда

$$K_{op} = - \frac{\ln \left(\frac{v_{кор} \Delta t + \Delta C}{\Delta t \frac{C_{cp}}{t_1}} + 1 \right)}{t + t_0}. \quad (2.44)$$

В условиях разложения, если в конце $v_{кор}$ будет стремиться к 0, то получаем следующее решение, с учетом что $t_1=1$, и если процесс разложения начинается сразу после создания озона $t_0=0$:

$$K_{\text{op}} = -\frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta C}{C_{\text{cp}} \cdot \Delta t}\right)}{t}. \quad (2.45)$$

Используя данную зависимость, можно рассмотреть определение константы разложения на основе эксперимента. Полученное таким образом значение может подтвердить постоянство данной величины. Данные исследования необходимо провести для подтверждения гипотезы об экспоненциальном законе скорости разложения озона.

Таким образом, на основании проведённых теоретических рассуждений установлена зависимость скорости разложения озона от концентрации озона в озоновоздушной смеси, времени обработки, среднего диаметра зерна, конечной скорости разложения озона и константы разложения озона, позволяющая определить режим озонной дезинсекции на основе диссоциации газа.

2.4 Теоретическое определение концентрации озоновоздушной смеси в потоке при дезинсекции зерна

В процессе дезинсекции зерна есть два важных показателя: время обработки и концентрация озона в озоновоздушной смеси. От их значения зависит эффективность уничтожения вредителей и сохранность качественных показателей самого зерна. Однако в процессе озонирования часть газа поглощается зерновой массой, поэтому необходимо определить остаточную концентрацию озона в озоновоздушной смеси, которая достанется вредителям. Из анализа возможных погрешностей измерения были получены закономерности изменения концентрации озона в процессе разложения, из которых установлено, что процесс разложения не завершается. Это не соответствует действительности. Вследствие этого модель требует уточнения и может быть основана на зависимости 2.41. В данном случае выделено время начала процесса t_0 , которое отделено от времени эксперимента $t_{\text{эксп}}$. Это достаточно важный момент, так как фактическое время начала процесса разложения неизвестно. Процесс начинается в озонаторе с появлением озона. Однако в это время концентрация озона, его температура и другие параметры, влия-

ющие на разложение, неизвестны. Кроме того, в озонаторе озон не будет равномерно распределён по всему объёму смеси. Таким образом, время начала разложения носит весьма условный характер, но для известных условий начала эксперимента может быть определено.

Решение ранее представленного дифференциального уравнения (2.41) в общем виде представляет собой следующее уравнение:

$$C(t) = C_1 \cdot e^{-\frac{e^{-K_{\text{оп}}(t+t_0)} + K_{\text{оп}} \cdot t}{K_{\text{оп}}}} - e^{-\frac{e^{-K_{\text{оп}}(t+t_0)} + K_{\text{оп}} \cdot t}{K_{\text{оп}}}} \int v_{\text{кор}} e^{t + \frac{e^{-K_{\text{оп}} \cdot t} \cdot e^{-K_{\text{оп}} \cdot t_0}}{K_{\text{оп}}}} dt, \quad (2.46)$$

где C_1 – концентрация озона в момент его образования, мг/м³.

Данное выражение характеризует изменение концентрации в зависимости от времени наблюдения. Первое слагаемое представляет собой концентрацию в начале наблюдения при $t = 0$

$$C_0 = C_1 \cdot e^{-\frac{e^{-K_{\text{оп}} \cdot t_0}}{K_{\text{оп}}}}. \quad (2.47)$$

Отсюда

$$t_0 = -\frac{\ln\left(-K_{\text{оп}} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C_1}\right)\right)}{K_{\text{оп}}}, \text{ а } C_1 = C_0 \cdot e^{\frac{e^{-K_{\text{оп}} \cdot t_0}}{K_{\text{оп}}}}. \quad (2.48)$$

Фактически C_1 – это концентрация в момент образования озона, учитывая принятый экспоненциальный закон, стремящаяся в бесконечность.

Теперь, считая скорость в конце процесса разложения постоянной величиной, выражение (2.46) может быть записано в виде

$$C(t) = e^{-\frac{e^{-K_{\text{оп}}(t+t_0)} + K_{\text{оп}} \cdot t}{K_{\text{оп}}}} \left(C_1 - v_{\text{кор}} \int e^{\frac{e^{-K_{\text{оп}}(t+t_0)} + K_{\text{оп}} \cdot t}{K_{\text{оп}}}} dt \right). \quad (2.49)$$

Поскольку C_1 и C_0 достаточно сложно определить, рассмотрение данного выражения не перспективно.

Рассмотрение зависимости 2.41 позволяет выразить t_0 для динамического процесса в следующем виде

$$t_0 = - \frac{\ln \left(\frac{\frac{dC}{dt} + v_{\text{орк}}}{\frac{C}{t_1}} + 1 \right) + K_{\text{ор}} t}{K_{\text{ор}}} . \quad (2.50)$$

В начальной точке

$$t_0 = - \frac{\ln \left(\frac{\frac{dC}{dt} + v_{\text{орк}}}{\frac{C_H}{t_1}} + 1 \right)}{K_{\text{ор}}} . \quad (2.51)$$

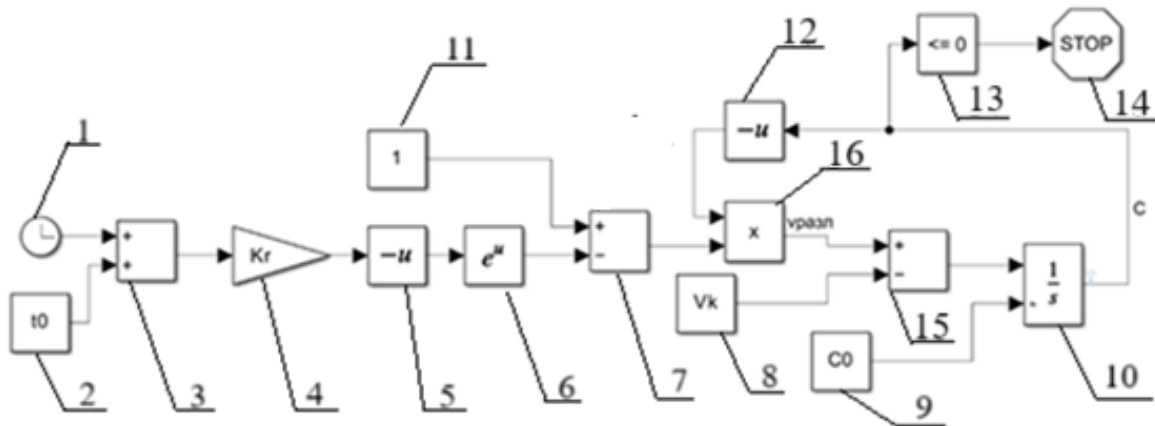
Полученные зависимости носят теоретический характер, но, к сожалению, не позволяют определить константу разложения и неизвестные параметры процесса аналитическим путем.

Численное значение константы разложения, значения условного начального времени разложения и скорости разложения в момент окончания процесса может быть определено при рассмотрении динамического процесса из уравнения 2.41, с помощью методов оптимизации.

Пакет System Identification Toolbox в составе системы автоматизированного моделирования Simulink позволяет подбирать параметры модели, проводить их калибровку применяя методы оптимизации.

Для нахождения недостающих параметров была разработана имитационная модель, описывающая динамику исследуемого процесса (рис. 2.1), основанная на положениях результатах раздела 4.2. Численное решение этой модели не вызыва-

ет затруднений и может быть эффективно выполнено, например, методом Рунге-Кутты с адаптивным шагом.



1 – время моделирования; 2, 8, 9, 11 – введение констант, 3, 7, 12 – операционные блоки сложения и вычитания, 4 – умножение на коэффициент, 5, 12 – унитарный минус, 6 – функция экспонента, 10 – блок интегрирования, 13 – блок проверки условия, 14 – остановка моделирования, 16 – операционный блок умножения

Рисунок 2.1 – Имитационная модель разложения озона в Simulink

Результаты опытов, представленные в главе 4.2, были использованы для настройки параметров в модуле Parameter Estimator. В ходе численного эксперимента с применением алгоритмов нелинейной оптимизации были установлены ключевые параметры модели: константа разложения озона K_{op} , время начала процесса разложения t_0 , концентрация озона в озоновоздушной смеси в начале наблюдения C_0 и конечная скорость разложения озона $v_{кор}$.

Оптимизационная задача была определена как минимизация суммы квадратов отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных для каждого натурного эксперимента.

Величины времени начала процесса t_0 и концентрации озона в озоновоздушной смеси в начале наблюдения C_0 уникальны для каждого эксперимента и подбирались независимо. Они определяются фактическими условиями эксперимента.

Константа разложения озона K_{op} и конечная скорость разложения озона $v_{кор}$ определяются исследуемыми процессами и не зависят от эксперимента, но могут

иметь ошибку из-за ошибок измерений. Эти величины должны определяться как единые для всех экспериментов.

Повтор подбора параметров с использованием различных оптимизационных алгоритмов привел к получению идентичных значений искомых параметров в рамках допустимой вычислительной погрешности.

Графическое сравнение моделируемых и экспериментальных данных представлено на рисунке 2.2.

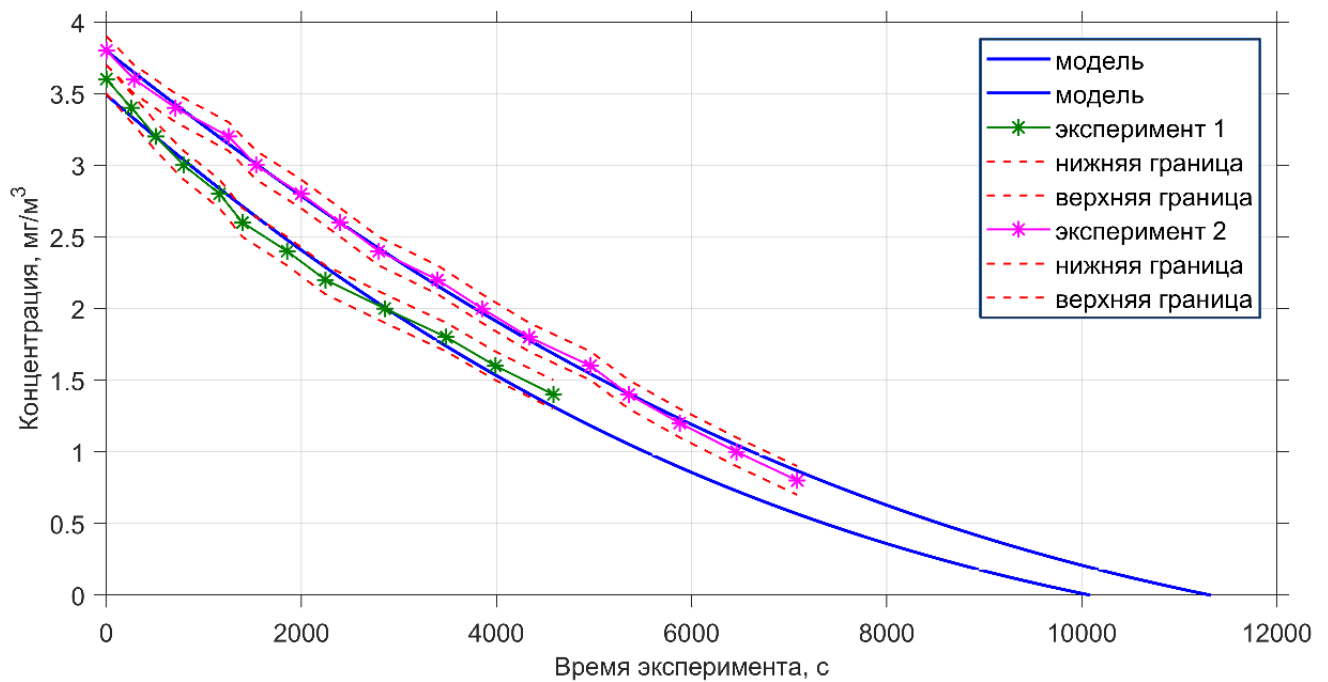


Рисунок 2.2 – Сравнение моделирования разложения озона в Simulink с экспериментальными данными в 2-х экспериментах

Из рисунка 2.2 видно, что процесс разложения оказался конечным, а рассчитанные по модели кривые хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Они практически полностью укладываются в диапазон, обусловленный экспериментальной погрешностью измерений.

Константа разложения $K_{ор}$, полученная для новой модели, составляет $7,8947 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Это значение учитывает конечную скорость разложения озона $\nu_{кор} = 1,3903 \cdot 10^{-4} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Данные параметры были определены при наличии 2-х динамических процессов, зафиксированных экспериментально.

Полученные результаты исследования адекватно описывают эмпирический характер процесса разложения, что позволяет использовать их для прогноза содержания остаточного озона в зерновой массе.

Для практического применения уравнения (2.41) и имитационной модели (рис. 2.1) требуется знание начальных условий: времени начала процесса t_0 и начальной концентрации озона в озоновоздушной смеси C_0 . Параметр C_0 соответствует моменту начала наблюдения за разложением озона и определяется на основе фактического состояния смеси.

Время начала процесса t_0 связано с начальной концентрацией озона C_0 в озоновоздушной смеси, так как оно определяется моментом входа в процесс наблюдения. Хотя теоретически установить зависимость между этими величинами не удалось, её можно вывести эмпирически с помощью уравнения регрессии.

Поскольку начальные значения параметров t_0 и C_0 были определены при подборе для двух экспериментов, количество значений этих величин может быть увеличено с использованием закономерностей на рисунке 2.2.

Так для второго эксперимента время начала процесса $t_0 = 13243$ с при концентрации озона в озоновоздушной смеси в начале наблюдения $C_0 = 3,7977$ мг·м⁻³. Из графика видно, что при $t = 6000$ с величина $C \approx 1,2$ мг·м⁻³. То есть, логично что, если бы процесс наблюдения начинался с $C_0 = 1,2$ мг·м⁻³, то $t_0 = 13243 + 6000 = 19243$ с.

Описанный подход позволяет, опираясь на результаты двух зафиксированных процессов, получить необходимый дополнительный объем информации для построения регрессионного уравнения, связывающего время начала процесса t_0 и начальную концентрацию озона C_0 . Был выполнен поиск зависимости на основе линейной регрессии

$$t_0 = a_0 + a_1 C_0. \quad (2.52)$$

Значения коэффициентов регрессии a_0 и a_1 приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты статистической обработки при подборе коэффициентов линейной уравнения регрессии

Показатель	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (<i>SE</i>)	Критерий Стьюдента (<i>tStat</i>)	Уровень значимости (<i>p-value</i>)
a_0	22991	723,6	31,77	$5,80 \cdot 10^{-7}$
a_1	-2446,2	286,12	-8,550	$3,605 \cdot 10^{-4}$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,936$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{кор}^2 = 0,923$

Критерий Фишера (*F*-statistic vs. zero model) $F_{расч} = 73,1$, уровень значимости (*p-value*): $3,605 \cdot 10^{-4}$

Статистический анализ подтверждает наличие тесной связи, что позволяет определять параметр t_0 по уравнению регрессии с достаточной точностью.

Для сравнения было проведено моделирование процесса. Графики показали незначительные отклонения от полученных оптимизацией значений. Это позволяет утверждать, что полученное регрессионное уравнение

$$t_0 = 22991 - 2446,2 \cdot C_n \quad (2.53)$$

может иметь практическое применение.

Полученные зависимости 2.48 и 2.49 описывают процесс разложения, а рассмотрение частного случая позволяет определить параметры модели разложения и, если вернуться к уравнению 2.39 в случае разложения озона в порах, получить зависимость для коэффициента диффузии, которая может быть описана следующим выражением:

$$K_D = - \frac{d_{ср}^2}{64t \ln \left(\frac{t_1 (v_{кор} + v_{ор})}{C(t) (e^{-K_{ор}(t+t_0)} - 1)} \right)}. \quad (2.54)$$

В данном случае входящая в уравнение концентрация озона – это внешняя для зерна концентрация, при которой прекратилось насыщение и начался процесс разложения и выхода газа из зерновой массы. Также это уравнение включает скорость разложения, которая в условиях отсутствия внешнего нагнетания озоновоздушной смеси определяется по зависимости 2.42, исходя из концентрации насыщения озоном зерновой массы.

Применение полученного уравнения 2.54 для определения коэффициента диффузии экспериментальным путем сопряжено с рядом сложностей, поэтому больший интерес представляет рассмотрение потока озона в озоновоздушной смеси.

Следовательно, все величины, входящие в зависимость 2.31 могут быть известны, что дает возможность определять количество озона, поглощаемого зерновой массой при озонировании.

В случае насыщения озоном некоторого объема и постоянным его нагнетанием происходит продувка зерновой массы озоновоздушной смесью. При движении озоновоздушной смеси вдоль зерновой массы происходит поглощение озона и его концентрация меняется. Изменение $dC(x)$ вдоль потока будет определяться $K(t)$ и скоростью потока. Скорость потока определяет время контакта озоновоздушной смеси с зерном.

Следовательно, уравнение (2.40) может быть взято за основу в дальнейших рассуждениях.

Обозначим количество поглощаемого озона в единицу времени $K_{\text{погл}}$. Тогда,

$$K_{\text{погл}} = -\int \frac{dK}{dt} = -\int \left(C(t) \left(4k_f \cdot k_{\text{св}} \cdot K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} \right) + v_{\text{кор}} \right) dt. \quad (2.55)$$

Изменение концентрации происходит за счет поглощения, если на входе концентрация не меняется, поэтому при прохождении элементарного участка dx за время. Следовательно,

$$dK_{\text{погл}} = dC. \quad (2.56)$$

При этом изменение концентрации озона происходит в момент прохождения элементарного участка dx за время движения $dt_{\text{дв}}$. Обозначим скорость потока $v_{\text{поток}} = dx/dt_{\text{дв}}$. Эта величина может быть легко определена через объемный расход озоновоздушной смеси

$$v_{\text{поток}} = \frac{dx}{dt_{\text{дв}}} = \frac{Q_{\text{поток}}}{S_{\text{поток}}}. \quad (2.57)$$

Площадь поперечного сечения потока $S_{\text{поток}}$ представляет площадь гидравлического сечения, а при известной площади поперечного сечения озонируемой массы $S_{\text{масс}}$ может быть определена через коэффициент скважистости, и тогда

$$v_{\text{поток}} = \frac{Q_{\text{поток}}}{S_{\text{поток}}} = \frac{Q_{\text{поток}}}{S_{\text{масс}}(1 - k_{\text{скв}})}. \quad (2.58)$$

Тогда из зависимости 2.55 следует, что

$$dK_{\text{погл}} = C(t) \left(4k_f k_{\text{скв}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} \right) dt + v_{\text{кор}} dt. \quad (2.59)$$

В данном случае $C(t)$ – концентрация озона в озоновоздушной смеси в момент времени на данном участке при $x=0$, а $dt = dt_{\text{дв}}$

$$dK_{\text{погл}} = C(t) \left(4k_f k_{\text{скв}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} \right) dt_{\text{дв}} + v_{\text{кор}} dt_{\text{дв}}. \quad (2.60)$$

Тогда фактически это уравнение характеризует изменение поглощения по длине

$$\frac{dK_{\text{погл}}}{dt_{\text{дв}}} = \frac{dK_{\text{погл}}}{dt_{\text{дв}}} \frac{dx}{dx} = v_{\text{поток}} \frac{dK_{\text{погл}}}{dx}. \quad (2.61)$$

Если учесть изменения по длине и по времени, то закономерность изменения концентрации озона по длине представим в следующем виде:

$$C(x, t) = C(t) - K_{\text{погл}}(x, t) \quad (2.62)$$

и так как

$$v_{\text{поток}} t_{\text{дв}} = x, \quad (2.63)$$

то в каждый момент времени t изменение по длине потока – это функция от $t - t_{\text{дв}}$

$$t - t_{\text{дв}} = t - \frac{v_{\text{поток}}}{x}, \quad (2.64)$$

а в дифференциальной форме

$$dt - dt_{\text{дв}} = dt - \frac{v_{\text{поток}}}{dx}. \quad (2.65)$$

Если общая длина потока $L_{\text{поток}}$, а текущее время моделирования $t_{\text{тек}}$, то время, определяющее место по длине потока

$$t = t_{\text{тек}} - \frac{v_{\text{поток}}}{l_{\text{поток}}}. \quad (2.66)$$

Из зависимостей 2.60, 2.61, 2.62 получаем следующее выражение:

$$\frac{dK_{\text{погл}}}{dt_{\text{дв}}} = v_{\text{поток}} \frac{dK_{\text{погл}}}{dx} = C(x, t) \left(4k_f k_{\text{свб}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} \right) + v_{\text{кор}}, \quad (2.67)$$

так как $C(t)$ не зависит от x , а может только изменяться во времени, то

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{поток}} \frac{dK_{\text{погл}}}{dx} &= C(x, t) \left(4k_f k_{\text{свб}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{cp}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{cp}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0 + t)}\right)}{t_1} \right) + v_{\text{кор}} \\ C(x, t) &= C(t) - K_{\text{погл}}(x, t) \\ t &= t_{\text{тек}} - \frac{x}{v_{\text{поток}}} \\ dt &= dt_{\text{тек}} \\ v_{\text{поток}} &= \frac{Q_{\text{поток}}}{S_{\text{масс}}(1 - k_{\text{свб}})} \\ t_0 &= 22991 - 2446,2 C_{\text{н}} \end{aligned} \right\}. \quad (2.68)$$

Решение данной системы алгебраических и дифференциальных уравнений позволяет определить концентрацию озона в озоновоздушной смеси $C(x,t)$ в разных точках потока с учетом поглощения и разложения озона, а ее интегрирование позволяет получить дозу обработки, которая достанется вредителям в конкретном сечении потока.

Следовательно, в результате проведенных теоретических исследований на основе законов диффузии, учитывая особенности зернового вороха, получены зависимости, характеризующие процесс озонирования с учетом разложения озона. Введены коэффициенты пористости, геометрии и скважистости, позволяющие обосновать особенности взаимодействия озона с зерновой массой, которые могут быть получены экспериментальным путем. Преимуществом полученных зависимостей является возможность их применения при экспериментальном определении значений коэффициентов.

Таким образом, основываясь на проведенном теоретическом исследовании и адаптации законов диффузии к озонной обработке зернового вороха, получена система алгебраических и дифференциальных уравнений для определения концентрации озона в озоновоздушной смеси $C(x,t)$, изменяющейся по времени и длине потока, учитывающая количество поглощаемого озона в единицу времени $K_{\text{полг}}$, параметры озоновоздушной смеси, константу разложения озона $K_{\text{ор}}$, коэффициент диффузии K_D , коэффициент геометрии k_f и коэффициент скважистости $k_{\text{скв}}$, позволяющая численным методом получить дозу озонной обработки, достаточную зерновым вредителям.

2.5 Выводы по разделу

На основе теоретических исследований, особенностей строения зернового вороха, адаптации законов диффузии применительно к озонной обработке зерна установлено следующее:

- на данный момент целостной теории, описывающей процесс взаимодействия озона с зерновым ворохом нет, что сдерживает разработку и применение озонной технологии дезинсекции зерна;

– скорость поглощения озона зерновым ворохом зависит от коэффициентов геометрии, скважистости, диффузии, среднего диаметра зерна, времени озонирования, а также концентрации и скорости разложения озона, что позволяет определить режим озонной дезинсекции на основе законов диффузии озона через поверхность зерновки;

– скорость разложения озона зависит от концентрации озона в озоновоздушной смеси, времени обработки, конечной скорости разложения озона и константы разложения озона, что позволяет определить режим озонной дезинсекции на основе диссоциации газа;

– система алгебраических и дифференциальных уравнений определения концентрации озона в озоновоздушной смеси, учитывающая количество поглощаемого озона в единицу времени, константу разложения озона, параметры озоновоздушной смеси, коэффициенты диффузии, геометрии, скважистости, что позволяет численным методом рассчитать дозу озонной обработки, достигающую зерновым вредителям.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа исследований процесса озонной дезинсекции зерна включает в себя последовательный и детально спроектированный ход экспериментов. Её главное назначение заключается в подтверждении и дополнении предложенных ранее теоретических изысканий.

К основным параметрам, которые необходимо учитывать при выполнении озонной обработки зернового вороха, относится константа разложения озона. Однако анализ литературных источников показал, что информации по применению озоноздушной смеси как средства дезинсекции сельскохозяйственных культур с учетом данного показателя практически нет. Поэтому была составлена программа экспериментальных исследований, выполнение которой позволит устранить данный недостаток.

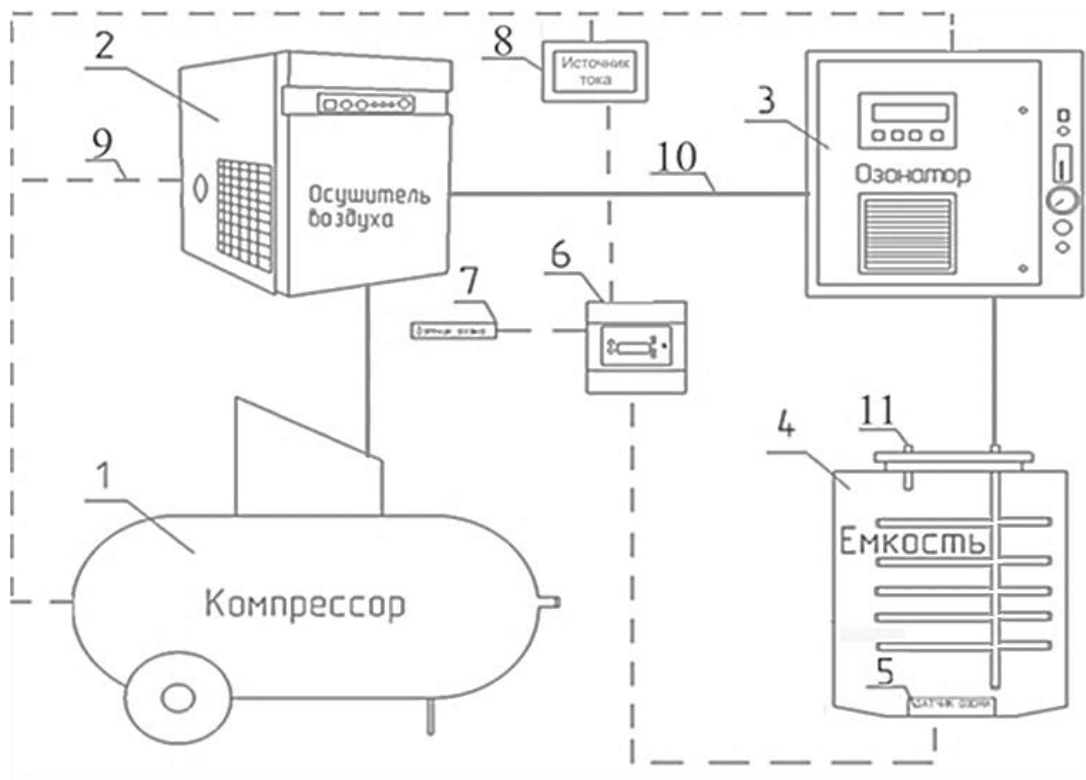
Программа экспериментальных исследований состоит в следующем:

- разработать лабораторную установку, позволяющую провести эксперимент по озонной обработке зерна и насекомых;
- разработать программу ЭВМ для обработки результатов экспериментов по озонной дезинсекции зерна;
- выявить численное значение константы разложения озона;
- определить влияние озонной обработки на вредителей зерна и микрофлору зернового материала.

Таким образом, выполнение вышеприведенной программы позволит решить поставленные задачи экспериментальных исследований. Последовательное выполнение каждого этапа приведет к определению рациональных режимов озонной дезинсекции зерна.

3.2 Экспериментальная установка для озонной обработки зерна и зерновых вредителей

С целью проведения экспериментальных исследований по озонной обработке зерна и вредителей была разработана лабораторная установка, состоящая из компрессора 1 (рис. 3.1), осушителя воздуха 2, озонатора 3, ёмкости 4, датчиков определения концентрации газа 5, 7, газоанализатора 6, источника питания 8, электрического кабеля 9, газовоздушной магистрали 10 и предохранительного клапана 11.



- 1 – компрессор; 2 – осушитель воздуха; 3 – озонатор; 4 – ёмкость; 5 и 7 – датчик озона;
 6 – газоанализатор; 8 – источник питания; 9 – электрический кабель;
 10 – газовоздушная магистраль; 11 – предохранительный клапан

Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки для озонирования зерна и вредителей

Назначение основных элементов лабораторной установки следующее. Компрессор служит для нагнетания воздуха в рабочую систему. Осушитель рефрижераторного типа предназначен для обезвоживания атмосферного воздуха. Выде-

лившаяся влага удаляется из технологического процесса. Озонатор вырабатывает озон из кислорода атмосферного воздуха. Генерация газа происходит благодаря нескольким импульсным преобразователям напряжения и частоты, а также нескольким разрядникам с керамическим барьером. При помощи импульсного блока питания на разрядники подаётся напряжение пробоя барьера, в результате чего из трёх молекул кислорода образуется две молекулы озона. Используемый озонатор серии ОВ имеет возможность регулировать подаваемую концентрацию озона. Для размещения обрабатываемого материала в замкнутом пространстве служит ёмкость.

Газоанализатор «Сигма 03» служит для контроля за концентрацией озона. Он включает в себя информационный блок и электрохимические датчики «Сигма-03 ДЭ». Между собой они соединены кабелем. Это обеспечивает подачу питания и параллельное считывание информации посредством аналогового токового сигнала, пропорционального измеряемому значению концентрации озона. Полученная информация считывается с информационного табло.

Принцип действия лабораторной установки следующий. Компрессор 1 (рис. 3.1) под давлением, составляющим не более двух атмосфер, нагнетает воздух в осушитель 2. Далее обезвоженный воздух поступает в озонатор 3. Полученная озоновоздушная смесь подаётся в ёмкость 4, где и происходит процесс озонной обработки. Концентрация озона фиксируется установленным внутри датчиком 5. Показания считываются с дисплея газоанализатора 6. Остаточный газ выводится за пределы рабочей зоны человека. Система озонирования максимально герметизирована. За превышением уровня предельно допустимой концентрации озона в рабочей зоне оператора следили посредством датчика 7. В случае сигнализации прибора экспериментальную установку отключали и устраняли причину утечки газа.

Таким образом, разработанная лабораторная установка позволяет проводить исследования по озонной дезинсекции зерна и определить рациональные режимы обработки.

3.3 Алгоритм программы для поиска рациональных доз при озонной обработке вредителей

Для автоматизации учета и обработки результатов исследований при дезинсекции зерна необходимо специализированное независимое программное средство. Приложение должно иметь достаточно простой интерфейс и работать по разработанному алгоритму, представленному на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Алгоритм работы электронной программы поиска рациональных доз озонной дезинсекции зерна

Согласно разработанному алгоритму (рис. 3.2), программа начинает работу с загрузки результатов исследований озонной дезинсекции зерна. При этом имеется возможность внести новые данные, либо использовать ранее внесенные значения. На следующем этапе проводится редактирование или дополнение массива данных. Далее запускается обработка результатов исследований и поиск параметров нормального распределения смертности вредителей при различных условиях. При этом используются алгоритмы глобального поиска. После обработки выводятся результаты расчетов с параметрами расчетов распределения и кривыми распределения. Полученные сведения необходимо сохранить. В дальнейшем их можно загрузить для дальнейшей работы согласно представленному алгоритму.

Таким образом, разработка программы ЭВМ по представленному алгоритму позволит обрабатывать результаты исследований при дезинсекции зерна озон-воздушной смесью, получить кривые распределения и статистические данные, автоматизировав и упростив обработку экспериментальных данных.

3.4 Методика проведения исследований и обработки экспериментальных данных

3.4.1 Общая методика проведения исследований и обработки экспериментальных данных

Статистическую обработку экспериментальных данных и построение графических закономерностей осуществляли с помощью применения программы «Matlab» и её прикладных пакетов.

Программа «Matlab» – одна из популярных и высокотехнологичных систем автоматизации математических расчетов, построенная на расширенном представлении и применении матричных операций. Система «Matlab» включает в себя возможности как процедурного, так и объектно-ориентированного языка программирования. Важную роль среди пакетов расширения «Matlab» занимает «Simulink», являющийся тесно интегрированной графической средой, предназначенной для моделирования и анализа аналоговых и дискретных динамических систем. В интерактивном графическом конструкторе «Simulink» выполняется создание моделей, суть которых заключается в перемещении в окно модели элементарных блоков из набора стандартных библиотек и настройкой связей между ними. При этом на автоматизированном уровне формируются системы дифференциальных уравнений, описывающие данную модель. Следить за происходящими в системе процессами при моделировании возможно за счет устройств наблюдения входящих в состав библиотеки «Simulink».

Таким образом, программа «Matlab» благодаря широкому спектру возможностей программирования позволит провести обработку массива данных, получаемых в ходе исследования, а расширение «Simulink» существенно упростит решение сложных математических уравнений.

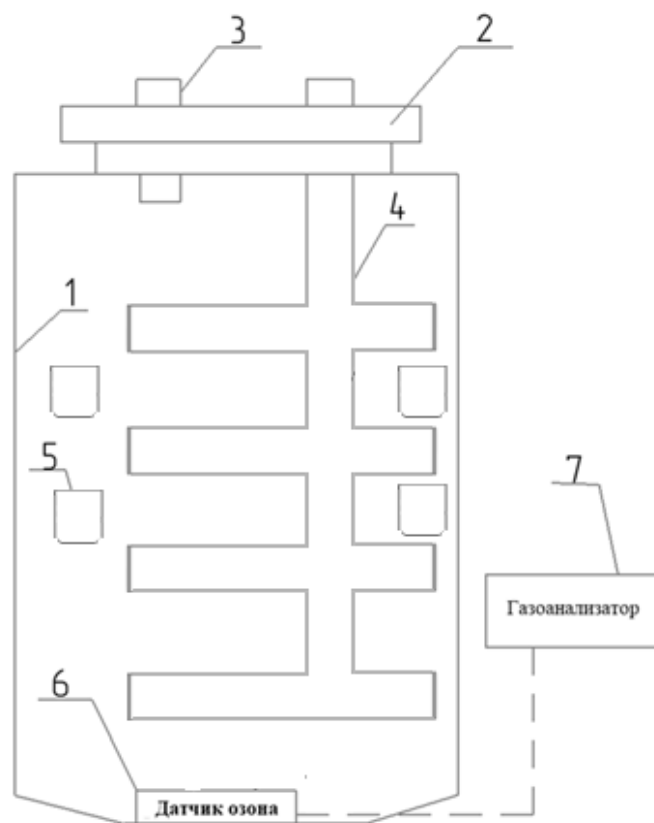
3.4.2 Методика проведения экспериментальных исследований по определению значения константы разложения озона

Эксперимент по нахождению константы разложения озона необходимо проводить на лабораторной установке, описанной в разделе 3.2. Для исследования потребуется пластиковая ёмкость объёмом пятьдесят литров, снабженная входным и выходным штуцерами и датчиком измерения концентрации озона. Перед началом проведения исследования необходимо установить определенное содержание газа. После того, как настройка озонатора проведена, от системы озонирования в ёмкость подается озоновоздушная смесь. При этом в процессе заполнения рабочего пространства ведётся регистрация показаний датчика с дисплея газоанализатора, соединённых между собой кабелем. При достижении определенной концентрации газа его подача прекращается. Поскольку озоновоздушная смесь нагнетается посредством компрессора, то перед началом последующих измерений необходимо выждать некоторый промежуток времени, чтобы исключить остаточное давление и дать газу «успокоиться». Когда процесс разложения озона перейдет в устойчивый темп снижения, фиксируется контрольная концентрация и засекается время разложения через каждые $0,2 \text{ мг/м}^3$.

Таким образом, вышеописанная методика позволит экспериментально определить значения константы разложения озона, которое в последующем будет использовано для подтверждения дальнейших теоретических исследований.

3.4.3 Методика проведения экспериментальных исследований по озонной дезинсекции зерна

Методика экспериментальных исследований по обработке зерновых вредителей озоновоздушной смесью следующая. На первом этапе необходимо подготовить несколько воздухопроницаемых контейнеров для разделения зараженного вредителями зерна по партиям. После этого они помещаются в ёмкость лабораторной установки, представленной в разделе 3.2, где проводится их озонирование (рис. 3.3).



1 – ёмкость; 2 – герметичная крышка; 3 – предохранительный клапан; 4 – газовод;
5 – ёмкость с насекомыми; 6 – датчик концентрации озона; 7 – газоанализатор Сигма-ОЗ

Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки для озонной обработки зерновых вредителей

При проведении эксперимента контейнеры 5 (рис. 3.3) наполняются зараженным вредителями зерном. Далее их помещают в герметичную ёмкость 1 лабораторной установки, где происходит обработка озоновоздушной смесью, поступающей через газовод 4, встроенный в герметичную крышку 2. Концентрацию озона фиксируют посредством датчика озона 6 и экрана газоанализатора «Сигма - ОЗ» 7. В ходе эксперимента необходимо фиксировать время воздействия газа на вредителей и дозу озонной обработки. Избыточное давление газа сбрасывается из ёмкости посредством предохранительного клапана 3. При достижении определенных значений партии вредителей извлекают. После чего производится подсчёт выживших и погибших вредителей.

Для определения рациональной дозы озонной обработки при дезинсекции зерна, позволяющей уничтожить необходимый процент насекомых, в алгоритме

разработанной программы [97] используется закон нормального распределения, который применительно к рассматриваемому процессу имеет следующий вид:

$$P(D_p) = F(D_p | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{D_p} e^{-\frac{(D-\mu)^2}{2\sigma^2}} dD, \quad (3.1)$$

где P – вероятность уничтожения насекомых при дозе озонной обработки D_p ;

D_p – доза озона для уничтожения насекомых, мг/м³;

μ – математическое ожидание;

σ – стандартное отклонение.

Необходимая доза озонной обработки, при которой будет уничтожен определенный процент вредителей от количества насекомых, является обратной функцией от вероятности:

$$D(P_{иск}) = F^{-1}(P_{иск} | \mu\sigma), \quad (3.2)$$

где $D(P_{иск})$ – необходимая доза озонной обработки для искомой вероятности, мг·мин/м³.

Функционал пакета программы позволяет в автоматическом режиме рассчитать параметры математического ожидания μ и стандартного отклонения σ для каждого эксперимента по озонной дезинсекции зерна и получить эффективные дозы озонной обработки при дезинсекции зерна по описанному алгоритму.

Таким образом, вышеописанная методика позволит провести лабораторные исследования влияния процесса озонирования зерна на вредителей и определить рациональные режимы озонной обработки при дезинсекции зерна, обеспечивающие 100% эффективность.

3.4.4 Методика проведения экспериментальных исследований по определению влияния озонной обработки на микрофлору зерна

Для проведения лабораторного анализа микрофлоры зерна пшеницы на первоначальном этапе необходимо отобрать пять исследуемых партий по 100 штук в

каждой. Четыре из них должны быть подвержены озонной обработке. Пятая озонированию не подвергается и служит контрольной. Отобранные образцы необходимо поместить на увлажненную фильтровальную бумагу и разложить зародышами вниз в одну линию с расстоянием друг от друга 1...2 см. При этом расстояние от нижнего края должно составлять 2...3 см. Затем распределенное зерно накрывается такой же полоской увлажненной фильтровальной бумагой, поверх которой накладывается полиэтилен и скручивается в рулон. Полученные рулоны устанавливаются вертикально в сосуды и помещают в термостат при температуре 22...25°C на семь суток. Важной особенностью проращивания в таких условиях является поддержание постоянной влажности внутри рулона. По истечении установленного периода фильтровальную бумагу необходимо извлечь. Торчащие корешки обрезают и, развернув рулон, проводят анализ на патогены. Основные виды грибковых болезней зерна озимой пшеницы и их признаки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Грибковые болезни зерна озимой пшеницы и их признаки

Болезни зерна озимой пшеницы	<i>Fusarium</i>	<i>Helminthosporium</i>	<i>Alternaria</i>
Характерные признаки	Грибы рода фузариум проявляются в виде слегка пушистого налета белого или розового оттенка. Грибница окрашивает в розовый цвет бумагу.	Инфекция отчетливо видна в зерновках в виде черного бархатистого налета, который переходит и на бумагу. Болезнь проявляется в виде побурения корешков у основания.	Пораженные семена покрываются налетом от серого до почти черного цвета, визуально похожим на грибницу гельминтоспориума.

На основании данных, представленных в таблице 3.1, необходимо сделать заключение о болезнях, соответствующих конкретной партии зерна. Согласно вышеописанной методике, можно установить, какие дозы наиболее эффективны при борьбе с патогенами. Таким образом, можно дать рекомендации по применению процесса озонирования для подавления развития микрофлоры.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА

4.1 Разработка программы для ЭВМ по автоматизированному учёту и обработке результатов экспериментальных исследований озонной дезинсекции зерна

Для автоматизированного учета и обработки массива данных, получаемого в процессе исследований по озонной дезинсекции зерна, разработана программа для ЭВМ, которая функционирует на основе методики, описанной в подразделе 3.3.

Созданная программа для ЭВМ включает в себя интерфейс с возможностью внесения результатов исследования и последующим их формированием в виде таблицы (рис. 4.1). При необходимости данные могут быть сохранены в формате Matlab в виде переменных и затем загружены для их расширения и корректирования значений.

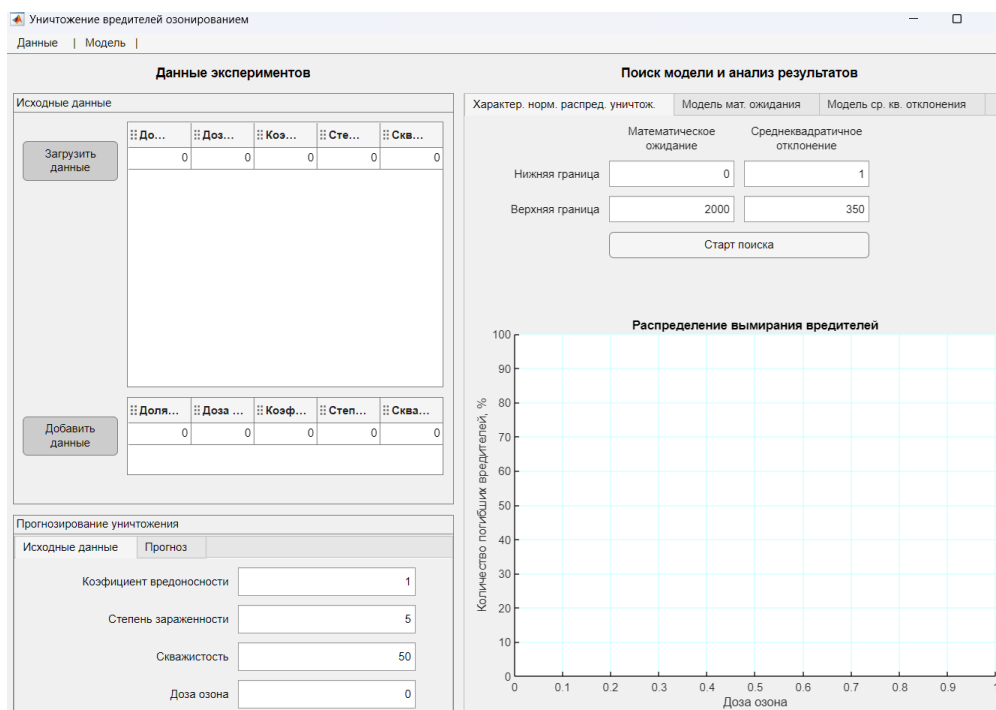


Рисунок 4.1 – Интерфейс программы ЭВМ

После того, как экспериментальные данные занесены в программу, пользователю предоставляется возможность провести поиск параметров распределения.

Для этого необходимо открыть вкладку «Характер. норм. распр. уничтож.» и задать требуемые параметры, а затем нажать «Старт поиска». В этот момент начинается расчёт параметров нормального распределения гибели вредителей при заданных условиях посредством алгоритмов глобального поиска. После поиска к исходным данным будут добавлены два столбца с параметрами распределения. В правом окне строятся графики распределений для разных условий (рис. 4.2).

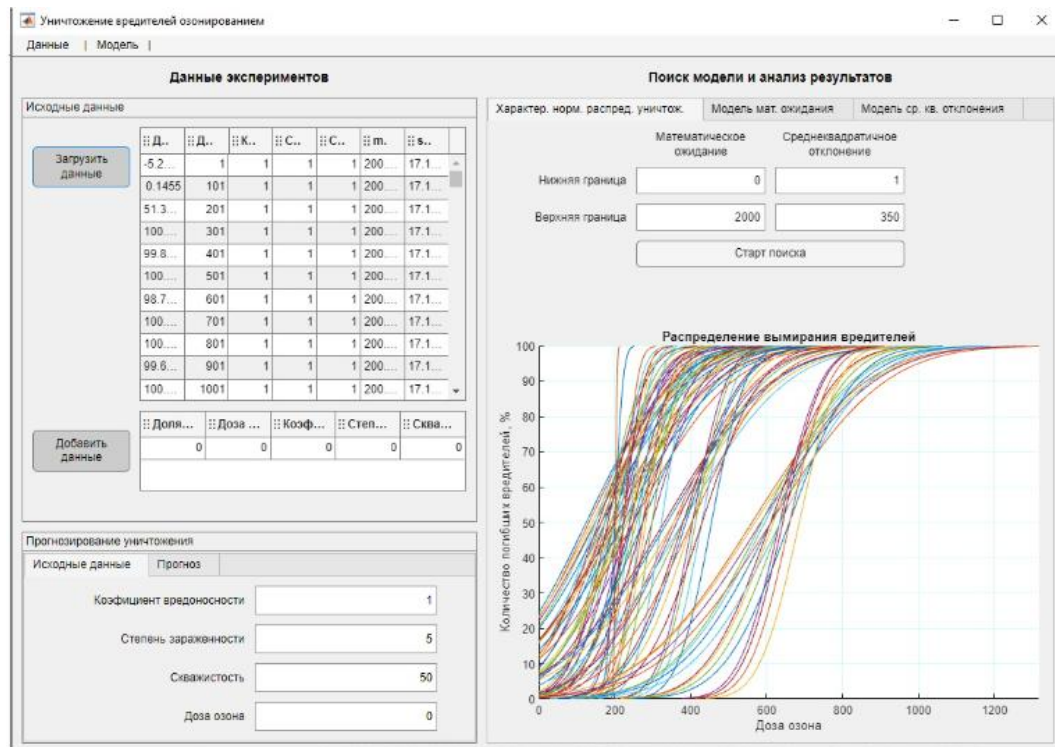


Рисунок 4.2 – Интерфейс программы при поиске параметров нормального распределения

Получив параметры распределения, можно перейти к подбору уравнений регрессии. Эти уравнения будут описывать зависимость математического ожидания и среднеквадратичного отклонения от различных факторов. Для этого требуется выбрать соответствующие вкладки в программе (рис. 4.3).

В программе предусмотрен поиск модели линейной регрессии с произвольным показателем степени для каждого фактора. Возможно определение вида уравнения и взаимодействия факторов с помощью описания «Уилкинсона». После получения модели без дополнительных действий в автоматическом режиме рассчитываются статистические параметры модели: число степеней свободы, среднее

квадратичное отклонения, коэффициент детерминации и скорректированный коэффициент детерминации.

The image shows two side-by-side screenshots of a software interface titled "Поиск модели и анализ результатов" (Model Search and Results Analysis). Each screenshot has a tabbed interface with "Поиск модели" (Model Search) and "Графический анализ модели" (Model Graphical Analysis) tabs. The "Поиск модели" tab is active in both.

Left Screenshot:

- At the top, there are three input fields: "Высшая степень в полиноме" (Highest degree in polynomial) set to 2, "Коефф.аре..." (Coefficients) set to 2, and "Связист..." (Linkage) set to 2.
- Below these, the "Вид модели по Уилкинсону" (Model type according to Wilkison) is set to $y \sim x1^3 + x2^3 + x3^3$.
- There is a checkbox "Улучшить автоматически" (Improve automatically) which is unchecked.
- The "Способ задания полинома" (Polynomial specification method) is set to "Степенями" (Degrees) and "Обозн. Уилкинсона" (Wilkison notation).
- A "Поиск уравнения" (Find equation) button is present.
- The "Модель $\mu = f(x)$ " (Model $\mu = f(x)$) field is empty.
- Statistical results: R^2_{adj} is 0, R^2 is 0, "Кол-во наблюдений" (Number of observations) is 0, "Кол-во коэфф." (Number of coefficients) is 0, and RMSE is 0.
- At the bottom, there are three buttons: "Коэффициенты и статистические параметры" (Coefficients and statistical parameters), "Дисперсионный анализ коэффициентов" (Coefficient dispersion analysis), and "Дисперсионный анализ модели" (Model dispersion analysis).

Right Screenshot:

- Similar to the left, but the "Улучшить автоматически" checkbox is checked.
- The "Вид модели по Уилкинсону" is set to $y \sim x1^3 + x2^3 + x3^3$.
- The "Модель $\sigma = f(x)$ " (Model $\sigma = f(x)$) field contains the equation $y \sim 1 + x1^2 + x1^2x2 + x1^2x3 + x2^2x3 + x3^2$.
- Statistical results: R^2_{adj} is 0.9978, R^2 is 0.9978, "Кол-во наблюдений" is 1800, "Кол-во коэфф." is 9, and RMSE is 2.823.
- The same three buttons are at the bottom.

Рисунок 4.3 – Вкладки поиска регрессионных моделей математического ожидания и среднеквадратичного отклонения

Для коэффициентов регрессии рассчитываются двухсторонние критерии Стьюдента, уровни значимости, критерии Фишера и уровни значимости по критерию Фишера. Кроме того, формируется ряд зависимостей, который необходим для анализа остатков в модели. Каждый из графиков может быть просмотрен в соответствующей вкладке и при необходимости сохранён.

В левом нижнем углу интерфейса программы (рис. 4.2) находится зона с двумя вкладками для прогнозирования уничтожения вредителей и поиска рациональной дозы озонирования при заданных условиях. После выполнения поиска модели на вкладке "Исходные данные" вводятся необходимые данные для расчета, а на вкладке "Прогноз" выводится результат с долей уничтоженных вредителей и необходимой дозой озонирования для эффективного уничтожения основной массы вредителей (более 99 %).

Таким образом, полученная программа для ЭВМ даёт возможность обработки большого количества данных с возможностью их сохранения, постоянного дополнения в процессе расширения исследований и определения рациональных

доз озонной дезинсекции зерна от основных вредителей в зависимости от условий обработки. Также имеется возможность проведения глубокого статистического анализа для принятия решения о проведении дополнительных экспериментов. Программа для ЭВМ зарегистрирована в федеральном институте промышленности собственности, что подтверждает свидетельство о государственной регистрации №2023611221 [97].

4.2 Результаты экспериментальных исследований по определению экспоненциального закона разложения озона через константу разложения

Согласно методике, представленной в подразделе 3.4.2, было проведено два эксперимента по определению константы разложения озона. Полученные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные по разложению озона в ёмкости

Изменение концентрации озона в ёмкости, мг/м ³		Средняя концен-трация озона, мг/м ³		Шаг измере-ний, мг/м ³		Время с начала фиксации разложения	
Номер эксперимента							
1	2	1	2	1	2	1	2
3,60	3,80	3,50	3,70	0		0	0
3,40	3,60	3,30	3,50	0,20		4:17,85	4:44,10
3,20	3,40	3,10	3,30	0,20		8:27,02	11:50,63
3,00	3,20	2,90	3,10	0,20		13:12,84	20:53,81
2,80	3,00	2,70	2,90	0,20		19:20,54	25:35,56
2,60	2,80	2,50	2,70	0,20		23:15,50	33:16,67
2,40	2,60	2,30	2,50	0,20		30:53,30	39:58,63
2,20	2,40	2,10	2,30	0,20		37:26,18	46:33,99
2,00	2,20	1,90	2,10	0,20		47:35,13	56:36,12
1,80	2,00	1,70	1,90	0,20		58:05,74	01:04:10,90
1,60	1,80	1,50	1,70	0,20		01:06:28,95	01:12:13,04
1,40	1,60	—	1,50	0,20		01:16:23,16	01:22:43,96
—	1,40	—	1,30	0,20		—	01:29:16,40
—	1,20	—	1,10	0,20		—	01:37:58,42
—	1,00	—	0,90	0,20		—	01:47:39,37
—	0,80	—	—	0,20		—	01:58:02,41

Данные из представленной таблицы позволяют определить константу разложения по формуле (2.45). Следует отметить, что в результатах существует методическая погрешность, обусловленная возможными отклонениями в моменте измерения, а также погрешностью самого датчика 0,02 мг/м³. Предполагается, что

влияние системной составляющей не является значительным. В таком случае ошибки имеют случайный характер и соответствуют нормальному закону распределения. Полученные значения константы разложения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные значения константы разложения озона

Экспериментальные значения константы разложения озона, c^{-1}	
Эксперимент 1	Эксперимент 2
$2,898 \cdot 10^{-08}$	$2,827 \cdot 10^{-08}$
$3,081 \cdot 10^{-08}$	$1,872 \cdot 10^{-08}$
$2,759 \cdot 10^{-08}$	$1,449 \cdot 10^{-08}$
$2,194 \cdot 10^{-08}$	$2,869 \cdot 10^{-08}$
$1,891 \cdot 10^{-08}$	$1,772 \cdot 10^{-08}$
$2,297 \cdot 10^{-08}$	$2,084 \cdot 10^{-08}$
$1,527 \cdot 10^{-08}$	$2,190 \cdot 10^{-08}$
$1,535 \cdot 10^{-08}$	$1,467 \cdot 10^{-08}$
$2,055 \cdot 10^{-08}$	$2,034 \cdot 10^{-08}$
$1,875 \cdot 10^{-08}$	$2,026 \cdot 10^{-08}$
—	$1,634 \cdot 10^{-08}$
—	$2,879 \cdot 10^{-08}$
—	$2,392 \cdot 10^{-08}$
—	$2,426 \cdot 10^{-08}$
—	$2,637 \cdot 10^{-08}$

Для обработки экспериментальных результатов были использованы методы базовой статистики и оценки. При сравнении результатов опытов применялись различные статистические критерии. Анализ таблицы 4.2 показывает, что на первый взгляд получен достаточно большой разброс значений константы разложения озона. Базовые критерии статистической оценки представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты статистической обработки результатов эксперимента по определению константы разложения озона

Показатели при статистической оценке	Для первого эксперимента	Для второго эксперимента
Среднее значение константы разложения озона, c^{-1}	$2,3078 \cdot 10^{-08}$	$2,1184 \cdot 10^{-08}$
Среднеквадратичное отклонение, c^{-1}	$6,0451 \cdot 10^{-09}$	$4,2279 \cdot 10^{-09}$
Среднеквадратичное отклонение среднего, c^{-1}	$1,5113 \cdot 10^{-09}$	$9,0140 \cdot 10^{-10}$

Анализ таблицы 4.3 показывает, что показатели имеют близкие значения, а отклонение на порядок меньше самого значения. Это свидетельствует о неплохой точности результата. Также по приведенным данным в таблице 4.3 была выполнена проверка по критерию Стьюдента на соответствие полученного среднего значения данным эксперимента. Полученные результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты проверки результатов эксперимента по определению константы разложения озона по критерию Стьюдента

Показатели при оценке по критерию Стьюдента	Для первого эксперимента	Для второго эксперимента
Значение критерия Стьюдента	1,7531	1,7207
Вероятность наблюдения тестовой статистики p	1	1
Стандартное отклонение по Стьюденту, c^{-1}	$6,0451 \cdot 10^{-09}$	$4,2279 \cdot 10^{-09}$
Границы доверительного интервала, c^{-1}	$1,986 \cdot 10^{-08}$	$1,931 \cdot 10^{-08}$
	$2,630 \cdot 10^{-08}$	$2,306 \cdot 10^{-08}$

Из таблицы 4.4 следует, что при проверке по критерию Стьюдента с уровнем значимости 0,05 данные с высокой вероятностью подчиняются закону нормального распределения. Оценка границы доверительного интервала в процентах от среднего показывает, что отклонение составляет для первого эксперимента 13...14 %, а для второго 8...9 %. Учитывая точности измерения, данные результаты можно считать вполне удовлетворительными.

Экспериментально полученные значения констант разложения озона немного отличаются друг от друга. В этом случае требуется убедиться, что данная величина является постоянной и что предложенная закономерность её определения адекватна. Поэтому для проверки гипотезы о различимости результатов экспериментов был проведен дисперсионный анализ.

Для визуального сравнения результатов двух экспериментов представим их в виде точечной диаграммы, демонстрирующей разброс экспериментальных значений. (рис. 4.4).

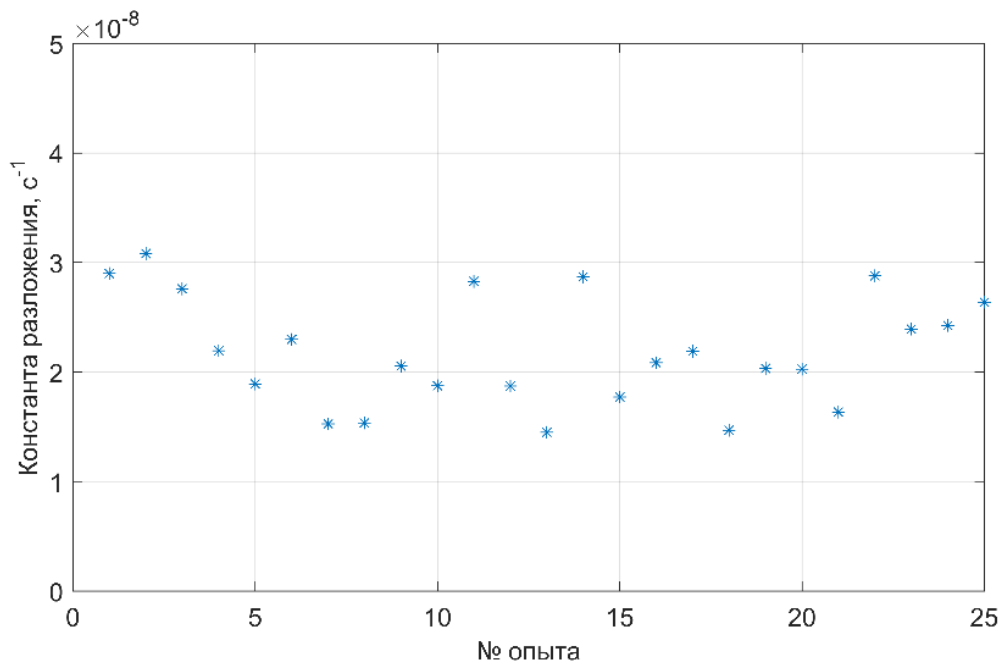


Рисунок 4.4 – Точечная диаграмма разброса значений константы разложения озона, определенной по результатам опытов двух экспериментов

Из анализа рисунка 4.4 видно, что несмотря на значительный разброс данных визуально средние значения примерно одинаковы. Для точного ответа на этот вопрос можно использовать тест по критерию Фишера [122]. Результат дисперсионного анализа представлен в таблице 4.5 и на рисунке 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты дисперсионного анализа

Источник	Сумма квадратов отклонения SS	Степени свободы df	Среднеквадратичное отклонение MS	Критерий Фишера F	Вероятность увеличения критерия $Prob>F$
Группы	$9,9194 \cdot 10^{-19}$	1	$9,9194 \cdot 10^{-19}$	0,0377	0,8478
Ошибки	$6,0534 \cdot 10^{-16}$	23	$2,6319 \cdot 10^{-17}$	—	—
Всего	$6,0634 \cdot 10^{-16}$	24	—	—	—

Как видно из таблицы 4.5, вероятность совпадения средних значений двух выборок выше 0,84. Фактически это значение сравнивается с уровнем значимости 0,05 гипотезы о том, что выборки различимы. Следовательно, выборки взяты из совокупности с одинаковыми средними значениями, а значит, они не различимы. Это же видно и на коробчатой диаграмме, представленной на рисунке 4.5.

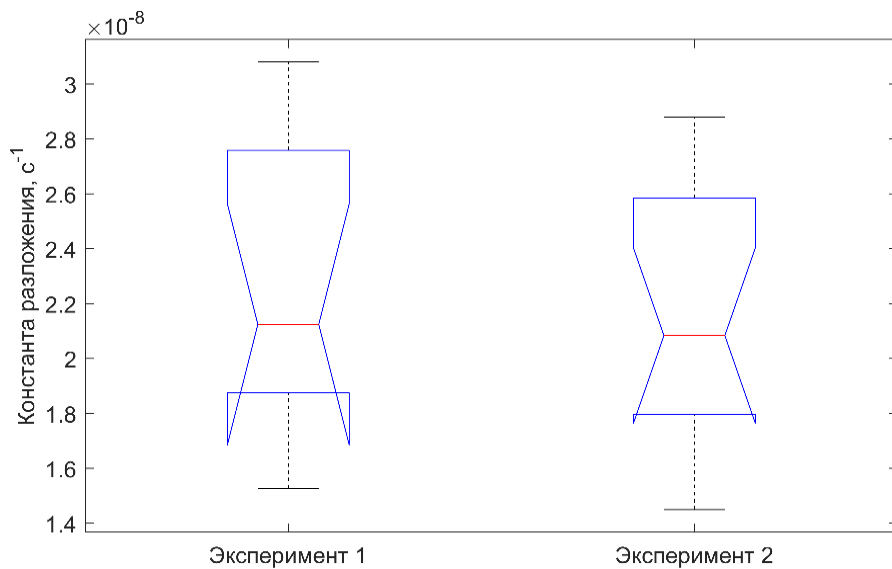


Рисунок 4.5 – Коробчатая диаграмма статистического сравнения результатов в экспериментах

Из рисунка 4.5 следует, что медианы значений, полученных в двух экспериментах, практически совпадают, а поскольку доверительные интервалы (выемки) на диаграмме перекрываются, можно сделать вывод, что истинные медианы статистически не различимы. Аналогичный результат был получен при проведении теста множественных сравнений средних по группам с использованием критерия Бонферрони [121] (рис. 4.6). В опытах эксперимента №2 нет значений, существенно отличающихся от опытов эксперимента №1.

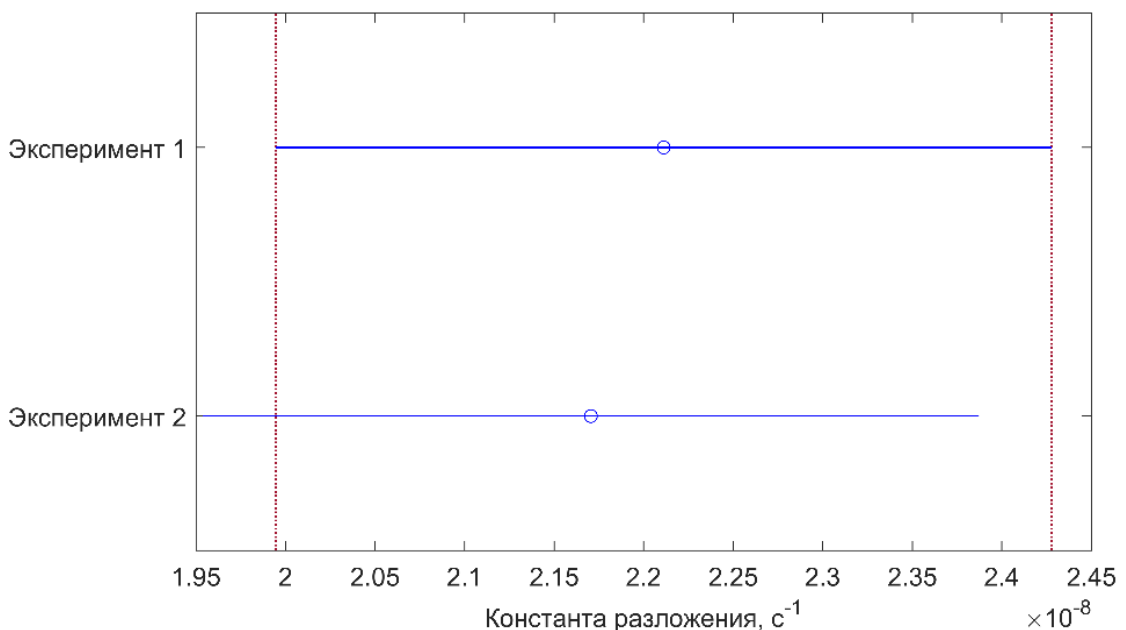


Рисунок 4.6 – Результаты многократного сравнения средних в экспериментах

Очевидно, что разброс данных для первого и второго экспериментов статистически не различим, что указывает на равенство их средних значений. Это свидетельствует о том, что величина K_{op} является константой при условиях, в которых проводились данные эксперименты. Следовательно, предложенный закон разложения озона достаточно точно описывает некоторую стадию процесса озонирования. В дальнейшем возможна совместная обработка результатов опытов для определения точного значения константы разложения. Однако в других условиях возможны иные значения этой константы разложения. Влияние различных факторов на значение константы в рамках данного исследования не рассматривалось.

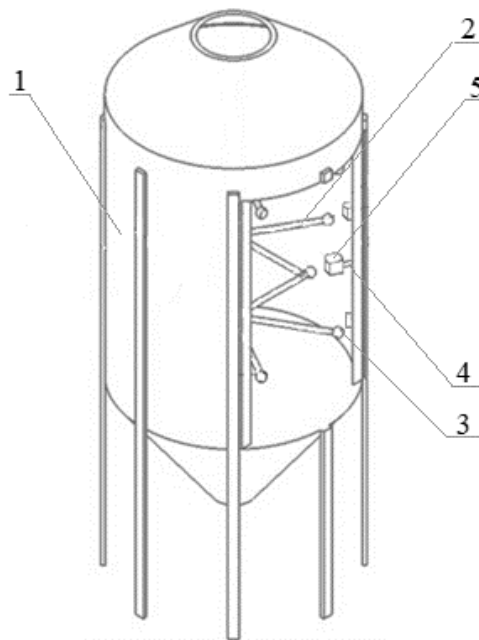
В результате экспериментального определения константы разложения озона по предложенной закономерности для конечных временных интервалов на основе статистического анализа двух экспериментов позволяют утверждать:

- величину K_{op} , характеризующую разложение озона, при данных условиях можно считать постоянной, то есть константой;
- средние значения константы разложения озона $K_{op}^{cp1}=2,3078 \cdot 10^{-08}$ и $K_{op}^{cp2}=2,1184 \cdot 10^{-08}$ в каждом из экспериментов определяется с точностью, сопоставимой с точностью измерений;
- полученные в результате двух экспериментов средние и медианы не различимы и в дальнейшем совместная обработка результатов исследований позволит более точно определить значения константы разложения.

Таким образом, предложенный ранее в теоретических исследованиях экспоненциальный закон разложения озона $K_{op} = - (\ln (1 + \Delta C / C_{cp} \cdot \Delta t) / t)$ при данных условиях достаточно точно описывает стадию процесса озонирования. При этом без учета конечной скорости разложения озона, константа разложения озона находится в интервале от $2,12 \cdot 10^{-08} \pm 0,6 \cdot 10^{-08}$ до $2,31 \cdot 10^{-08} \pm 0,42 \cdot 10^{-08}$. Поскольку теоретически установлена (подраздел 2.4), конечная скорость разложения озона $\nu_{кор} = 1,3903 \cdot 10^{-4} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, то значение константы разложения K_{op} (зав. 2.44) составит $7,8947 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$.

4.3 Проектирование устройства для хранения зерна и семян зерновых культур в регулируемой озоновоздушной среде

Проведенный патентный поиск устройств для озонной обработки зерна и семян позволил определить конструктивные недостатки анализируемых разработок и устранить их при проектировании предлагаемой конструкции. Для решения поставленной задачи диссертационной работы было спроектировано устройство для хранения зерна и семян зерновых культур, имеющее признаки интеллектуальной собственности, что подтверждается патентом РФ на полезную модель №230414. Принципиальная схема предлагаемой конструкции представлена на рисунке 4.7 [82].

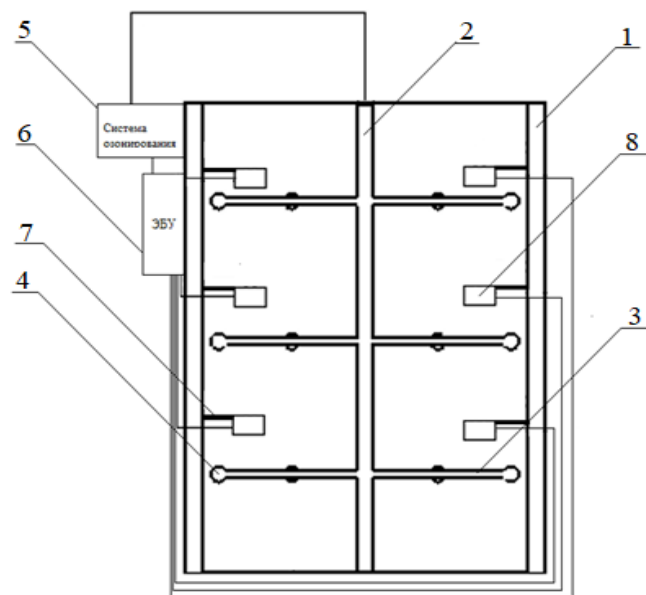


- 1 – цилиндрический корпус; 2 – газопроводы; 3 – электромагнитные форсунки;
4 – кронштейн; 5 – датчики зараженности насекомыми

Рисунок 4.7 – Устройство для хранения зерна и семян зерновых культур, защищённое патентом РФ на полезную модель №230414

Устройство для хранения зерна и семян зерновых культур конструктивно состоит из цилиндрического корпуса 1 (рис. 4.7) с расположенными внутри газопроводами 2, на концах которых расположены электромагнитные форсунки 3. В качестве рабочего агента выбрана озоновоздушная смесь. Газопроводы расположены таким образом, чтобы образовывать ярусы. Такое решение позволяет равномерно распределять озоновоздушную смесь во всех слоях зерновой массы. На

внутренней стенке корпуса над каждым ярусом установлены кронштейны 4, на которых размещены датчики 5, обеспечивающие контроль зараженности зерна насекомыми. Предлагаемое устройство работает следующим образом. В период хранения зерна и семян зерновых культур от датчиков зараженности насекомыми 8 (рис. 4.8), установленных на кронштейнах 7, данные о наличии вредителей поступают на электронный блок управления 6. При этом программное обеспечение в автоматическом режиме анализирует поступающие сигналы.



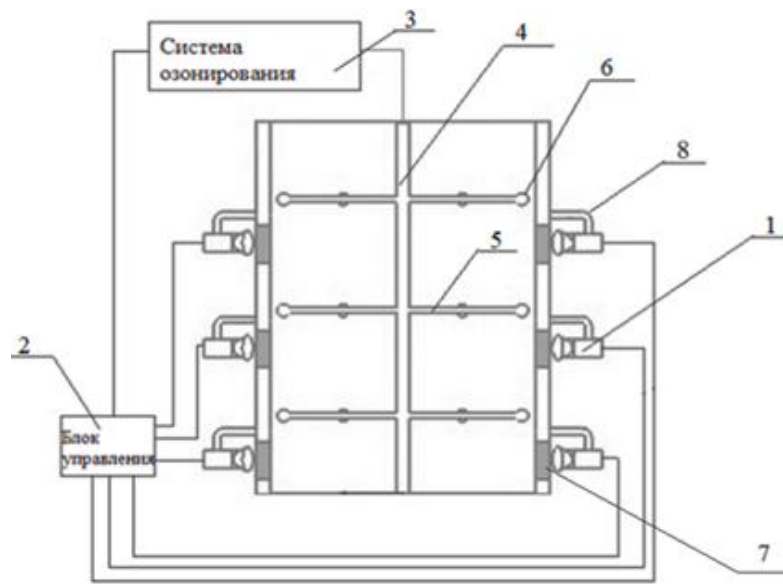
- 1 – цилиндрический корпус; 2 – центральный газопровод; 3 – прямые отводы;
4 – электромагнитные форсунки; 5 – система озонирования; 6 – электронный блок управления;
7 – кронштейн; 8 – датчики зараженности насекомыми

Рисунок 4.8 – Схема работы устройства для хранения зерна и семян зерновых культур

В случае обнаружения вредителей подается импульс на включение системы озонирования 5 (рис. 4.8). После чего начинается генерация и подача озоново-душной смеси через центральный газопровод 2 к прямым отводам 3 с форсунками 4. После проведения дезинсекции зерна отработанная смесь выводится из хранилища через деструктор.

В рамках расширения возможностей обнаружения вида насекомого была разработана более прогрессивная конструкция устройства для хранения зерна, защищенная патентом РФ на полезную модель №219219 [79]. Данная конструк-

ция может быть использована в перспективе с целью повышения эффективности озонной обработки. Схема работы устройства представлена на рисунке 4.9.



- 1 – цифровые камеры; 2 – электронный блок управления; 3 – система озонирования;
 4 – центральный газопровод; 5 – прямые отводы; 6 – форсунки;
 7 – смотровые окна; 8 – кронштейны

Рисунок 4.9 – Схема работы устройства для хранения зерна

Согласно представленной схеме отличительной особенностью данного устройства является функциональная возможность постоянного визуального мониторинга заражённости зерна, работающая следующим образом. В период хранения зерновой массы через смотровые окна 7 (рис. 4.9) цифровые камеры 1 формируют изображение, которое передают на электронный блок управления 2. Встроенное в него программное обеспечение автоматически анализирует поступившие изображения на наличие вредных насекомых. При выявлении заражения подаётся сигнал для активации системы озонирования 3. После чего происходит подача озоновоздушной смеси по центральной магистрали 4 к прямым отводам 5 с форсунками 6. По окончании дезинсекции отработанная смесь выводится из хранилища через деструктор.

Таким образом, разработанное устройство имеет признаки интеллектуальной собственности, что подтверждается патентом РФ на полезную модель №230414 и отличается тем, что оно дополнительно снабжено датчиками заражённости насекомыми, передающими сигнал на электронный блок управления по-

средством кабеля, установленными на кронштейнах над ярусами отводов, смонтированными на внутренней стенке цилиндрического корпуса. Использование данного запатентованного устройства позволит значительно повысить эффективность процесса дезинсекции зерна и семян зерновых культур. В качестве перспективы в дальнейших исследованиях совершенствования озонной дезинсекции зерна следует использовать разработанное устройство, защищённое патентом РФ на полезную модель №219219 с более прогрессивной конструкцией, позволяющей адаптировать дозу озонной обработки для отдельных вредителей зерна посредством применения искусственного интеллекта.

4.4 Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности озонной обработки при дезинсекции зерна

4.4.1 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от амбарного долгоносика

Исследования по озонной дезинсекции зерна проводились в соответствии с методикой, описанной в подразделе 3.4.3. Концентрация озона в озоновоздушной смеси варьировалась от 1 до 5 мг/м³ в зависимости от времени и режима работы озонатора. Расход агента дезинсекции составлял 1,0 м³/ч. Результаты исследований представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Режимы озонной дезинсекции зерна от амбарных долгоносиков

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
0-10	3,56	35,6
11-20	4,6	46
21-30	2,32	23,2
31-40	3,1	31
41-50	2,44	24,4
51-60	1,44	14,4
61-70	3,36	33,6
71-80	2,42	24,2
81-90	1,96	19,6
91-100	1,72	17,2
101-110	1,76	17,6
111-120	4,16	41,6

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
121-130	4,8	48
131-140	4,36	43,6
141-150	2,64	26,4
151-160	3,22	32,2
161-170	3,4	34
171-180	3,0	30
181-190	3,1	31
191-200	3,82	38,2
201-210	4,94	49,4
Средняя концентрация озона за 210 мин	3,15	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	661,2
Выемка 1 партии		
211-220	4,9	49
221-230	2,94	29,4
231-240	4,72	47,2
241-250	3,12	31,2
251-260	4,32	43,2
261-270	4,54	45,4
271-280	4,52	45,2
281-290	3,64	36,4
291-300	5,0	50
Средняя концентрация озона за 300 мин	3,46	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1038,2
Выемка 2 партии		
301-310	4,94	49,4
311-320	4,82	48,2
321-330	5,0	50
331-340	5,0	50
341-350	4,7	47
351-360	4,82	48,2
361-370	4,48	44,8
371-380	4,62	46,2
381-390	3,94	39,4
Средняя концентрация озона за 390 мин	3,75	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1461,4
Выемка 3 партии		
391-400	5,0	50
401-410	4,7	47

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
411-420	3,82	38,2
421-430	4,12	41,2
431-440	3,94	39,4
441-450	4,72	47,2
451-460	4,26	42,6
461-470	3,84	38,4
471-480	3,34	33,4
Средняя концентрация озона за 480 мин	3,83	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1838,8
Выемка 4 партии		

Анализ данных, представленных в таблице 4.6, показывает, что время озонирования первой партии вредителей составляет 210 минут. При этом средняя концентрация озона равна 3,15 мг/м³, а доза озонной обработки достигает отметки 661,2 мг·мин/м³. Спустя 300 минут озонирования была извлечена вторая партия вредителей. При этом средняя концентрация озона составила 3,46 мг/м³ при дозе озонной обработки 1038,2 мг·мин/м³. Дезинсекция третьей партии длилась 390 минут при средней концентрации озона 3,75 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 1461,4 мг·мин/м³. Последнюю, четвертую, партию вредителей извлекали по истечении 480 минут обработки со средней концентрацией озона в озоновоздушной смеси 3,83 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 1838,8 мг·мин/м³. Результаты эффективности озонной обработки для каждой партии вредителей занесены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Эффективность озонной обработки при дезинсекции зерна от амбарного долгоносика

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки мг·мин/м ³	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
210	3,15	661	44,44	44,44
300	3,46	1038	46,67	100
390	3,75	1461	42,86	100
480	3,83	1839	34,48	100

Анализ таблицы 4.7 показывает, что после 210 минутной озонной обработки при средней концентрации 3,15 мг/м³ и дозе озонной обработки 661 мг·мин/м³

удалось уничтожить только 44,44% амбарных долгоносиков. Причем через сутки наблюдений количество насекомых не изменилось. Дальнейшее озонирование повысило эффективность операции. Озонная обработка в течение 300 минут со средней концентрацией озона $3,46 \text{ мг/м}^3$ при дозе озонной обработки 1038 мг·мин/м^3 привела к уничтожению 46,67% насекомых на момент выемки. Спустя 24 часа смертность амбарных долгоносиков увеличилась до 100%. Озонирование на протяжении 390 минут при средней концентрации озона составила $3,75 \text{ мг/м}^3$ при дозе озонной обработки 1461 мг·мин/м^3 привело к гибели 42,86% амбарных долгоносиков. После суточного наблюдения гибель достигла 100%. После озонной дезинсекции вредителей зерна на протяжении 480 минут при средней концентрации озона $3,83 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки 1839 мг·мин/м^3 гибель вредителей составила 34,48%. Однако спустя 24 часа эффективность обработки возросла до 100%. Такой эффект последствия обусловлен тем, что озон воздействует на плазму вредителей и разрушает её структуру, что приводит к гибели насекомых после озонирования. По полученным результатам в разработанной программе ЭВМ была получена интегральная кривая эффективности озонной обработки от дозы озонной обработки (рис. 4.10).

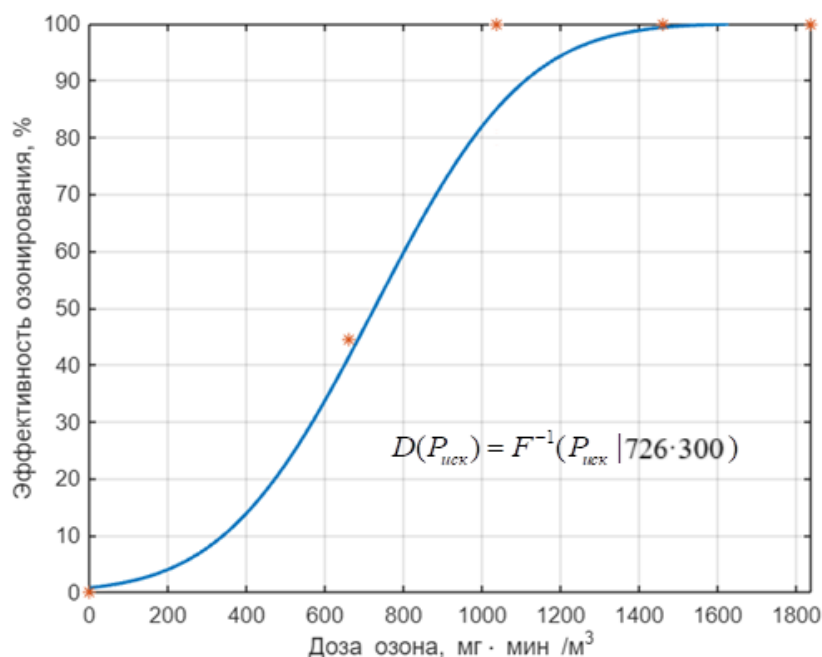


Рисунок 4.10 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от жуков амбарного долгоносика в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.10 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 726$ и $\sigma = 300$ соответственно, следовательно, необходимая доза озонной обработки, обеспечивающая 100% эффективность при борьбе с жуками амбарных долгоносиков, составляет 1420 мг/м^3 .

Таким образом, для 100% уничтожения амбарных долгоносиков необходимая доза озонной обработки составляет не менее $1420 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$ при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси от 1 до 5 мг/м^3 .

4.4.2 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от рисового долгоносика

В целях расширения спектра исследуемых вредителей был проведен эксперимент по озонной обработке жуков рисового долгоносика. Исследования проводили согласно методике, описанной в подразделе 3.4.6. Концентрация озона в озоновоздушной смеси варьировалась в диапазоне $1...5 \text{ мг/м}^3$. Результаты исследований занесены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Режимы озонной дезинсекции зерна от рисового долгоносика

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м^3	Доза озонной обработки, $\text{мг} \cdot \text{мин/м}^3$
0-10	4,0	40
11-20	5,0	50
21-30	3,72	37,2
31-40	3,5	35
41-50	4,0	40
51-60	4,0	40
61-70	3,5	35
71-80	4,0	40
81-90	5,0	50
91-100	4,26	42,6
101-110	4,0	40
111-120	3,82	38,2
121-130	4,0	40
131-140	4,52	45,2
141-150	4,76	47,6
151-160	5,0	50
161-170	5,0	50

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
171-180	4,5	45
181-190	4,72	47,2
191-200	5,0	50
201-210	4,0	40
Средняя концентрация озона за 210 мин	4,3	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	903
Выемка 1 партии		
211-220	5,0	50
221-230	4,2	42
231-240	3,16	31,6
241-250	4,6	46
251-260	4,9	49
261-270	4,0	40
Средняя концентрация озона за 270 мин	4,3	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1161
Выемка 2 партии		
271-280	4,12	41,2
281-290	1,14	11,4
291-300	2,04	20,4
301-310	4,5	45
311-320	3,0	30
321-330	2,1	21
Средняя концентрация озона за 330 мин	4,03	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1330
Выемка 3 партии		
331-340	3,92	39,2
341-350	3,86	38,6
351-360	4,44	44,4
361-370	4,48	44,8
371-380	4,0	40
381-390	4,46	44,6
Средняя концентрация озона за 390 мин	4,06	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1582
Выемка 4 партии		

Согласно данным, представленным в таблице 4.8, первая партия рисового долгоносика была извлечена при достижении дозы озонной обработки 903 мг·мин/м³, вторая – после 1161 мг·мин/м³, третья - при дозе 1330 мг·мин/м³, четвертая после 1582 мг·мин/м³. Результаты эффективности озонной дезинсекции от рисового долгоносика зафиксированы в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Эффективность озонной дезинсекции зерна от рисового долгоносика

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м³	Доза озонной обработки мг·мин/м³	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
210	4,3	903	30	33,33
270	4,3	1161	40	50
330	4,03	1330	60	70
390	4,06	1582	90	100

Анализ таблицы 4.9 показал, что дезинсекция зерна от рисового долгоносика в течение 210 минут при средней концентрации озона 4,3 мг/м³ и дозе озонной обработки 903 мг·мин/м³ способствовала гибели 30% жуков. Через сутки эффективность операции увеличилась на 3,33%. Озонирование в течении 270 минут при средней концентрации озона 4,3 мг/м³ и дозе озонной обработки 1161 мг·мин/м³ способствовало уничтожению 40% вредителей в процессе обработки. Через сутки наблюдений эффективность увеличилась ещё на 10% до 50%. Обработка озоно-воздушной смесью в течение 330 минут при средней концентрации озона 4,03 мг/м³ и дозе озонной обработки 1330 мг·мин/м³ уничтожило 60% жуков. Через 24 часа наблюдений показатель гибели составил 70%. Четвертая партия вредителей подвергалась озонированию в течение 390 минут при средней концентрации озона 4,06 мг/м³ и дозе озонной обработки 1582 мин/м³. При этом во время операции уничтожено 90% насекомых, а через сутки наблюдений погибла оставшаяся часть жуков.

Обработка результатов проведенного экспериментального исследования в разработанной программе ЭВМ позволяет получить закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от рисового долгоносика (рис. 4.11).

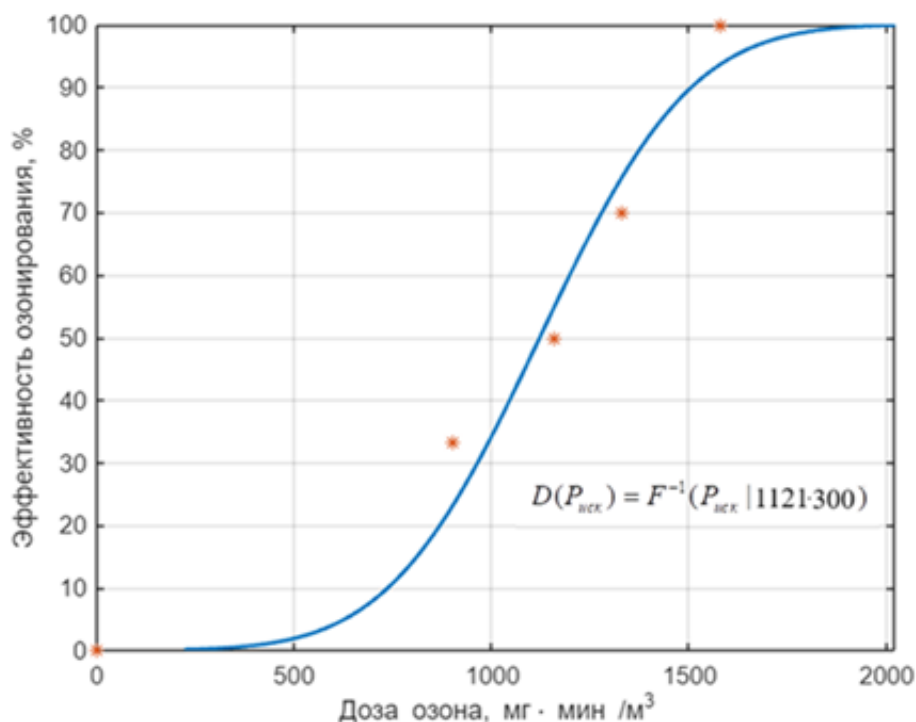


Рисунок 4.11 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от жуков рисового долгоносика в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.11 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 1121$ и $\sigma = 300$ соответственно. Следовательно, для полного уничтожения жуков рисового долгоносика при озонировании зерна необходима доза озонной обработки 1819 мг/м³.

Таким образом, для полного уничтожения жуков рисового долгоносика при озонной дезинсекции зерна со средней концентрацией от 1 до 5 мг/м³ необходима доза озонной обработки не менее 1819 мг·мин/м³.

4.4.3 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от булавового хрущака

С целью расширения спектра исследований вредителей проведён эксперимент по озонной дезинсекции зерна от жуков булавового хрущака. Концентрация озона в озоновоздушной смеси не превышала 5 мг/м³. Результаты исследований занесены в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Режимы озонной дезинсекции зерна от жуков булавоусого хрущака

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
0-10	4,3	43
11-20	2,86	28,6
21-30	3,04	30,4
31-40	3,62	36,2
41-50	5,0	50
51-60	3,6	36
61-70	5,0	50
71-80	4,22	42,2
81-90	3,64	36,4
91-100	3,8	38
101-110	4,2	42
111-120	3,96	39,6
121-130	4,0	40
131-140	5,0	50
141-150	4,26	42,6
151-160	4,12	41,2
161-170	3,88	38,8
171-180	4,06	40,6
181-190	5,0	50
191-200	3,6	35
Средняя концентрация озона за 200 мин	3,86	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	811
Выемка 1 партии		
201-210	5,0	50
211-220	4,72	47,2
221-230	4,74	47,3
231-240	5,0	50
241-250	4,8	48,1
251-260	5,0	50
261-270	4,92	49,2
271-280	4,68	46,9
Средняя концентрация озона за 280 мин	4,29	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1200
Выемка 2 партии		
281-290	4,82	48,2
291-300	5,0	50
301-310	5,0	50
311-320	4,7	47
321-330	4,02	40,2

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
331-340	3,82	38,2
341-350	4,92	49,2
351-360	5,0	50
361-370	3,92	39,2
Средняя концентрация озона за 370 мин	4,36	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1612
Выемка 3 партии		
371-380	4,36	43,6
381-390	4,86	48,6
391-400	5,0	50
401-410	3,72	37,2
411-420	4,26	42,6
421-430	3,96	39,6
431-440	2,88	28,8
441-450	5,0	50
451-460	5,0	50
Средняя концентрация озона за 460 мин	4,35	
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³		2002

Из анализа данных таблицы 4.10 следует, что при дезинсекции зерна от булавоусого хрущака первая партия вредителей получила дозу озонной обработки 811 мг·мин/м³, вторая – 1200 мг·мин/м³, третья – 1612 мг·мин/м³, четвертая – 2002 мг·мин/м³. Результаты эффективности при описанных показателях представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Эффективность озонной дезинсекции жуков булавоусого хрущака

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
200	3,86	811	14	16
280	4	1200	16	24
370	4,36	1612	30	40
460	4,35	2002	40	100

Анализ данных таблицы 4.11 показывает, что озоновоздушная обработка жуков булавоусого хрущака в течение 200 минут при концентрации озона

3,86 мг/м³ и дозе озонной обработки 811,6 мг·мин/м³ позволила уничтожить только 14% вредителей. После суточного наблюдения данный показатель вырос до 16%. При озонировании в течение 280 минут при средней концентрации озона 4 мг/м³, доза озонной обработки составляет 1200 мг·мин/м³. В таких условиях в процессе операции погибло 16% насекомых. По прошествии 24 часов наблюдений эффективность дезинсекции увеличилась на 8% и составила 24%. Озонирование на протяжении 370 минут при средней концентрации 4,36 мг/м³ доза озонной обработки достигла 1612 мг·мин/м³. Это способствовало гибели 30% жуков булавоусых хрущаков. За последующие сутки эффективность дезинсекции увеличилась до 40%. Озонирование в течении 460 минут при средней концентрации озона 4,35 мг/м³ и дозе озонной обработки 2002 мг·мин/м³ позволило уничтожить во время операции 40% жуков. Через 24 часа наблюдений показатель достиг 100%.

Исходя из результатов проведенного эксперимента, получена закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна (рис. 4.12).

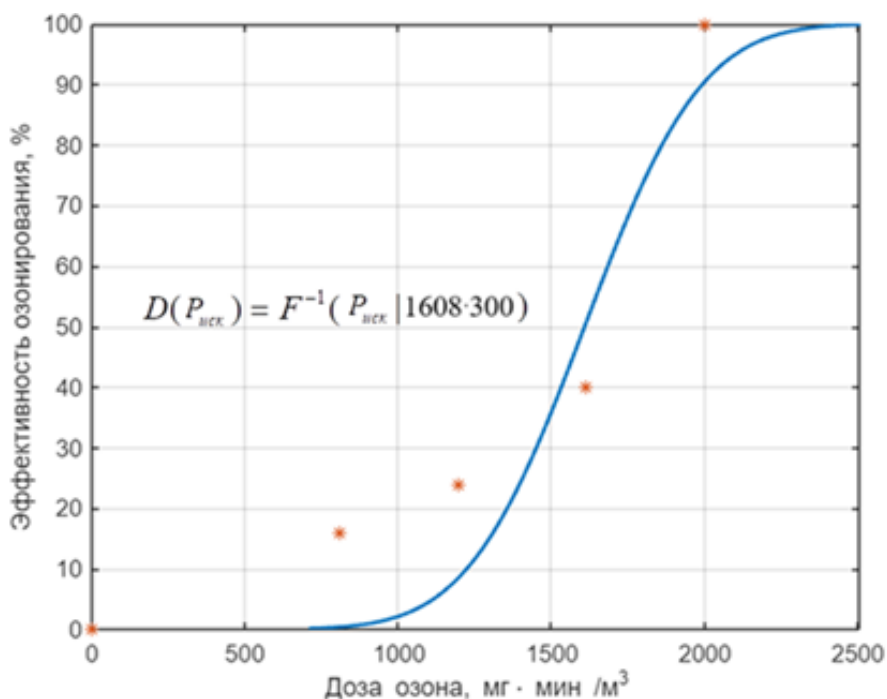


Рисунок 4.12 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от жуков булавоусого хрущака в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.12 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 1608$ и $\sigma = 300$ соответственно, следовательно, для полного уничтожения жуков булавоусого хрущака необходимая доза озонной обработки составляет 2306 мг/м^3 .

Таким образом, для гарантийного уничтожения жуков булавоусых хрущаков при озонной дезинсекции зерна при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси $1...5 \text{ мг/м}^3$ необходимая доза озонной обработки составляет не менее 2306 мг·мин/м^3 .

4.4.4 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от зернового точильщика

Для расширения спектра исследуемых вредителей была проведена озонная обработка жуков зернового точильщика. Концентрация озона в озоновоздушной смеси варьировалась в пределах $1...5 \text{ мг/м}^3$ в зависимости от времени и режима работы озонатора. Расход агента дезинсекции составлял 1 м^3 . Результат исследований представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Режимы озонной дезинсекции зерна от жуков зернового точильщика

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м^3	Доза озонной обработки, мг·мин/м^3
0-10	2,5	25
11-20	4,0	40
21-30	3,0	30
31-40	3,82	38,2
41-50	3,5	35
51-60	3,0	30
61-70	5,0	50
71-80	5,0	50
81-90	4,12	41,2
91-100	3,66	36,6
101-110	3,34	33,4
111-120	4,0	40
121-130	4,0	40
131-140	3,82	38,2
141-150	3,7	37
151-160	3,94	39,4
161-170	3,36	33,6
171-180	4,0	40
181-190	4,0	40

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
191-200	4,6	46
201-210	4,5	45
211-220	4,0	40
221-230	4,0	40
231-240	4,0	40
241-250	4,14	41,4
251-260)	4,26	42,6
261-270	4,2	42
271-280	4,0	40
281-290	3,92	39,2
291-300	5,0	50
301-310	4,7	47
311-320	5,0	50
321-330	4,58	45,8
331-340	4,86	48,6
341-350	5,0	50
Средняя концентрация озона за 350 мин	4,07	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1425
Выемка 1 партии		
351-360	4,2	42
361-370	4,32	43,2
Средняя концентрация озона за 370 мин	4,08	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1510
Выемка 2 партии		
371-380	4,22	42,2
381-390	5,0	50
391-400	4,74	47,4
401-410	4,5	45
Средняя концентрация озона за 410 мин	4,13	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1695
Выемка 3 партии		
411-420	3,6	36
421-430	4,18	41,8
431-440	4,54	45,4
441-450	4,28	42,8
451-460	4,06	40,6
461-470	4,6	46
Средняя концентрация озона за 470 мин	4,03	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1947
Выемка 4 партии		

Согласно данным таблицы 4.12, первая партия находилась в озонозвоздушной смеси в течение 350 минут при средней концентрации озона $4,07 \text{ мг/м}^3$. Данные условия эквивалентны дозе озонной обработки $1425 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$. После 370 минут озонирования была извлечена вторая партия, при этом средняя концентрация озона составила $4,08 \text{ мг/м}^3$. Данные условия равноценны дозе озонной обработки $1510 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$. Третья партия вредителей озонировалась в течение 410 минут при средней концентрации озона $4,13 \text{ мг/м}^3$. Эти условия эквивалентны дозе озонной обработки $1695 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$. Последняя партия вредителей была извлечена по прошествии 470 минут озонирования при средней концентрации озона $4,03 \text{ мг/м}^3$, что равнозначно дозе озонной обработки $1947 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$. Результаты эффективности озонной дезинсекции зерна от зернового точильщика зафиксированы в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Эффективность озонной обработки зерна от зернового точильщика

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м^3	Доза озонной обработки, $\text{мг} \cdot \text{мин/м}^3$	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
350	4,07	1425	53,33	63,33
370	4,08	1510	60	66,67
410	4,13	1695	80	86,67
470	4,03	1947	100	100

Анализ данных в таблице 4.13 показал, что при дезинсекции зерна озонозвоздушной смесью в течение 350 минут при средней концентрации озона $4,07 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки $1425 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$ в процессе обработки погибло 53,33% данных вредителей. После суточного наблюдения гибель насекомых увеличилась на 10% до 63,33%. За 370 минут обработки при средней концентрации озона $4,08 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки $1510 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$ во время операции было уничтожено 60% вредителей. По прошествии 24 часов этот показатель вырос до 66,67%. В третьей партии вредителей через 410 минут озонирования со средней концентрацией озона $4,13 \text{ мг/м}^3$ и дозой озонной обработки $1695 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$ погибло 80%. Через сутки наблюдений эффективность обработки увеличилась на 6,67% до 87,67%. Озонирование в течение 470 минут при концен-

трации озона $4,03 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки $1947 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$ привело к гибели 100% жуков зернового точильщика во время операции.

Статистическая обработка результатов проведенного эксперимента в разработанной программе ЭВМ позволила получить закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от жуков зернового точильщика (рис. 4.13).

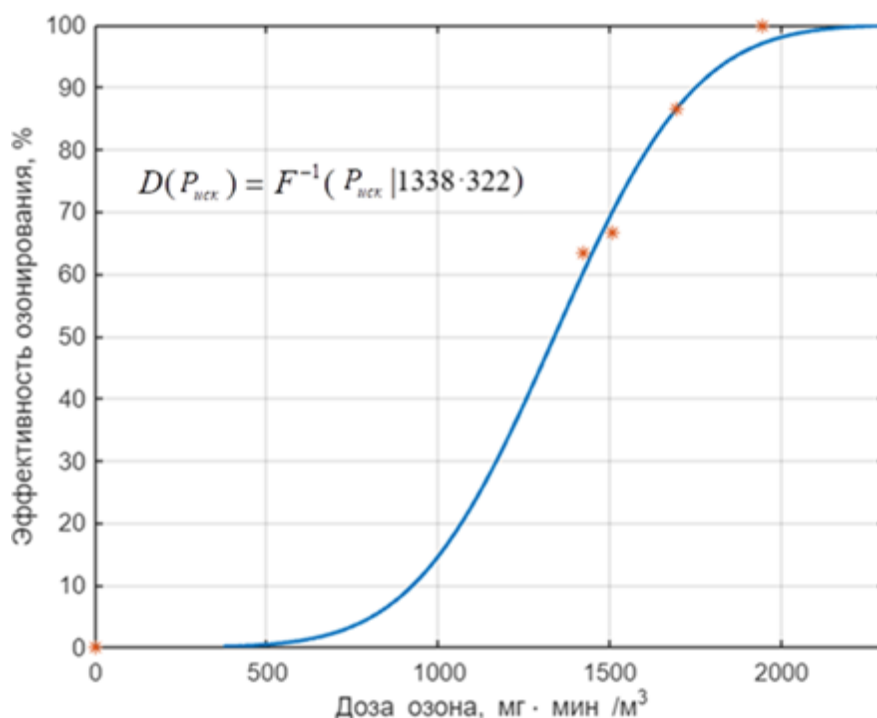


Рисунок 4.13 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от жуков зернового точильщика в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.13 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 1338$ и $\sigma = 322$ соответственно, следовательно, необходимая доза озонной обработки, при которой будут уничтожены все жуки зернового точильщика составляет $2087 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$.

Таким образом, для полного уничтожения жуков зернового точильщика при озонной дезинсекции зерна при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси $1 \dots 5 \text{ мг/м}^3$ необходимая доза озонной обработки должна быть не менее $2087 \text{ мг} \cdot \text{мин/м}^3$.

4.4.5 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли

С целью расширения перечня исследуемых вредителей в данном эксперименте была проведена озонная дезинсекция бабочек зерновой моли. Концентрация озона в озоноздушном смеси не превышала 5 мг/м³. Полученные результаты исследований в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Режимы озонной дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
0-10	5,0	50
11-20	5,0	50
21-30	3,02	30,2
31-40	3,78	37,8
41-50	3,4	34
51-60	2,96	29,6
61-70	4,08	40,8
71-80	4,24	42,4
81-90	4,76	47,6
91-100	4,98	49,8
101-110	5,0	50
111-120	5,0	50
121-130	4,66	46,6
Средняя концентрация озона за 130 мин	4,66	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	558
Выемка 1 партии		
131-140	3,08	30,8
141-150	2,7	27
151-160	3,84	38,4
161-170	4,04	40,4
171-180	4,04	40,4
Средняя концентрация озона за 180 мин	4,09	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	735
Выемка 2 партии		
181-190	4,52	45,2
191-200	4,98	49,8
201-210	4,8	48
211-220	4,62	46,2
221-230	5,06	50,6
231-240	5,06	50,6

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
241-250	4,44	44,4
Средняя концентрация озона за 250 мин	4,28	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1070
Выемка 3 партии		
251-260	3,96	39,6
261-270	3,88	38,8
271-280	3,64	36,4
281-290	3,72	37,2
Средняя концентрация озона за 290	4,22	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	1222
Выемка 4 партии		

Из таблицы 4.14 следует, что при озонной дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли первую партию вредителей извлекли при достижении дозы озонной обработки 558 мг·мин/м³, вторую – 735 мг·мин/м³, третью – 1070 мг·мин/м³, четвертую – 1222 мг·мин/м³. Результаты исследований при данных условиях представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Эффективность озонной обработки зерна против бабочек зерновой моли

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
130	4,66	558	60	60
180	4,09	735	70	80
250	4,28	1070	90	100
290	4,22	1222	100	100

Анализ таблицы 4.15 показал, что озонирование бабочек зерновой моли с продолжительностью 130 минут при концентрации озона 4,66 мг/м³ и дозе озонной обработки 558 мг·мин/м³ позволило уничтожить во время операции 60% вредителей. При дальнейшем наблюдении показатель остался неизменным. За 180 минут озонирования при средней концентрации озона 4,09 мг/м³ доза озонной обработки достигла 735 мг·мин/м³. В процессе обработки при таких условиях погибло 70% бабочек зерновой моли. По прошествии 24 часов наблюдений эффективность озон-

ной обработки увеличилась на 10% и составила 80%. При 250 минутах озонирования со средней концентрацией озона $4,28 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки 1070 мг·мин/м^3 сразу было уничтожено 90% насекомых. Через 24 часа наблюдений данный показатель вырос до 100%. При озонировании в течение 290 минут при средней концентрации озона $4,22 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки 1222 мг·мин/м^3 эффективность воздействия на бабочек зерновой моли составила 100%.

Статистическая обработка результатов проведенного эксперимента в разработанной программе ЭВМ позволила получить закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли (рис. 4.14).

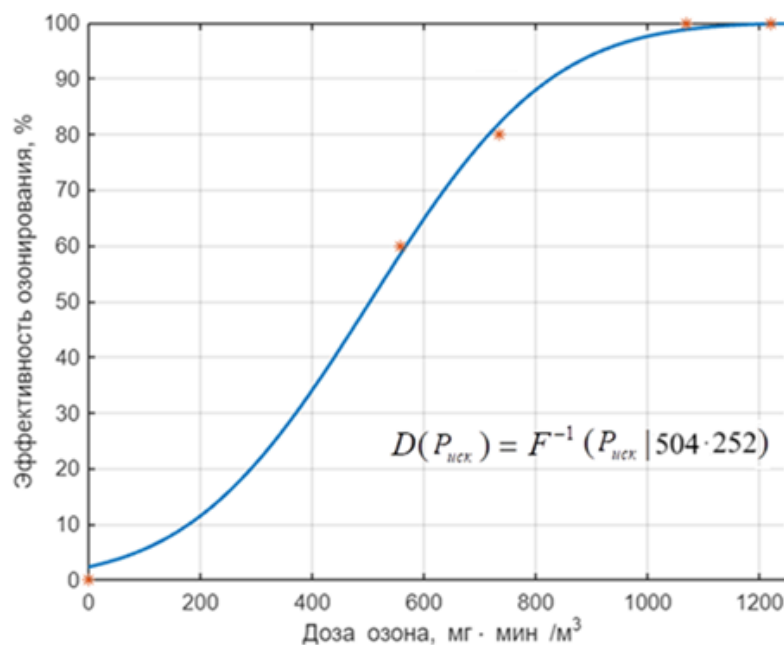


Рисунок 4.14 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от бабочек зерновой моли в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.14 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 504$ и $\sigma = 252$ соответственно, следовательно, доза озонной обработки для полного уничтожения бабочек зерновой моли составляет 1091 мг·мин/м^3 .

Таким образом, для 100% уничтожения бабочек зерновой моли при озонной обработке при средней концентрации озона в озоноздушном смеси $1...5 \text{ мг/м}^3$ необходимая доза озонной обработки должна быть не менее 1091 мг·мин/м^3 .

4.4.6 Результаты экспериментальных исследований при озонной дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли

С целью определения рациональных режимов озонирования при дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли был проведен соответствующий эксперимент. Концентрация озона в озоновоздушной смеси варьировалась в диапазоне 1...5 мг/м³. Результаты исследований в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Режимы озонной дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
0-10	5,0	50
11-20	5,0	50
21-30	2,82	28,2
31-40	3,78	37,8
41-50	3,4	34
51-60	2,96	29,6
61-70	4,08	40,8
71-80	4,24	42,4
81-90	4,7	47
91-100	4,98	49,8
101-110	5,0	50
111-120	5,0	50
121-130	4,65	46,5
131-140	3,08	30,8
141-150	2,72	27,2
151-160	3,84	38,4
161-170	4,04	40,4
171-180	4,04	40,4
181-190	4,52	45,2
191-200	4,98	49,8
201-210	4,8	48
211-220	4,62	46,2
221-230	5,0	50
231-240	5,0	50
241-250	4,44	44,4
251-260	3,96	39,6
261-270	3,88	38,8
271-280	3,64	36,4
281-290	3,74	37,4
291-300	3,42	34,2
301-310	4,46	44,6
311-320	3,43	34,3
321-330	4,16	41,6
331-340	3,94	39,4
341-350	4,78	47,8
351-360	4,28	42,8

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
361-370	4,46	44,6
371-380	4,22	42,2
381-390	4,0	40
391-400	3,24	32,4
401-410	1,78	17,8
411-420	2,02	20,2
421-430	5,0	50
431-440	5,0	50
441-450	4,88	48,8
451-460	5,0	50
461-470	4,82	48,2
471-480	4,0	40
481-490	3,62	36,2
491-500	3,72	37,2
501-510	4,54	45,4
511-520	4,5	45
521-530	4,74	47,4
531-540	5,0	50
541-550	5,0	50
551-560	5,0	50
561-570	4,42	44,2
571-580	3,82	38,2
581-590	2,98	29,8
591-600	5,0	50
Средняя концентрация озона за 600 мин	4,19	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	2511
Выемка 1 партии		
601-610	4,88	48,8
611-620	5,0	50
621-630	5,0	50
631-640	4,22	42,2
641-650	3,88	38,8
651-660	3,78	37,8
661-670	3,8	38
671-680	4,32	43,2
Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
681-690	4,22	42,2
691-700	4,0	40
701-710	5,0	50
711-720	4,08	40,8
Средняя концентрация озона за 720 мин	4,21	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	3033
Выемка 2 партии		
721-730	4,2	42

Время озонирования, мин	Концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³
731-740	4,34	43,3
741-750	4,96	49,6
751-760	4,56	45,7
761-770	5,0	50
Средняя концентрация озона за 770	4,24	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	3263
Выемка 3 партии		
771-780	4,44	44,4
781-790	3,82	38,2
791-800	3,84	38,4
801-810	4,02	40,2
811-820	5,0	50
821-830	5,0	50
Средняя концентрация озона за 830 мин	4,25	-
Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	-	3525
Выемка 4 партии		

Из таблицы 4.16 следует, что первую выемку вредителей провели при достижении дозы озонной обработки 2511 мг·мин/м³, вторую – 3033 мг·мин/м³, третью – 3263 мг·мин/м³, четвертую – 3525 мг·мин/м³. Результаты эффективности дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Эффективность озонной обработки против гусениц зерновой моли

Время обработки, мин	Средняя концентрация озона, мг/м ³	Доза озонной обработки, мг·мин/м ³	Эффективность озонной дезинсекции, %	
			В процессе обработки	Спустя 24 часа
600	4,19	2511	40	40
720	4,21	3033	60	70
770	4,24	3263	80	80
830	4,25	3525	90	100

Анализ таблицы 4.17 показал, что дезинсекция зерна от гусениц зерновой моли со средней концентрацией озона 4,19 мг/м³ в течение 600 минут, что соответствует дозе озонной обработки 2511 мг·мин/м³, не эффективна. В таких условиях погибает лишь 40% вредителей. За 720 минут озонирования в процессе обработки при концентрации озона 4,21 мг/м³, что равнозначно дозе озонной обработки 3033 мг·мин/м³, было уничтожено 60% гусениц. Спустя сутки наблюдений результат увеличился на 10% и составил 70%. Озонирование в течение 770 минут при

средней концентрации озона $4,24 \text{ мг/м}^3$ при дозе озонной обработки 3263 мг·мин/м^3 привело к гибели 80% гусениц зерновой моли. За следующие 24 часа наблюдений изменений не зафиксировано. Достичь эффективных показателей удалось при 830 минутах озонирования при средней концентрации озона $4,25 \text{ мг/м}^3$ и дозе озонной обработки 3525 мг·мин/м^3 . В таких условиях сразу погибло 90% гусениц. После суток наблюдений эффективность озонирования составила 100%.

Статистическая обработка результатов проведенного экспериментального исследования в разработанной программе ЭВМ позволила получить закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли (рис. 4.15).

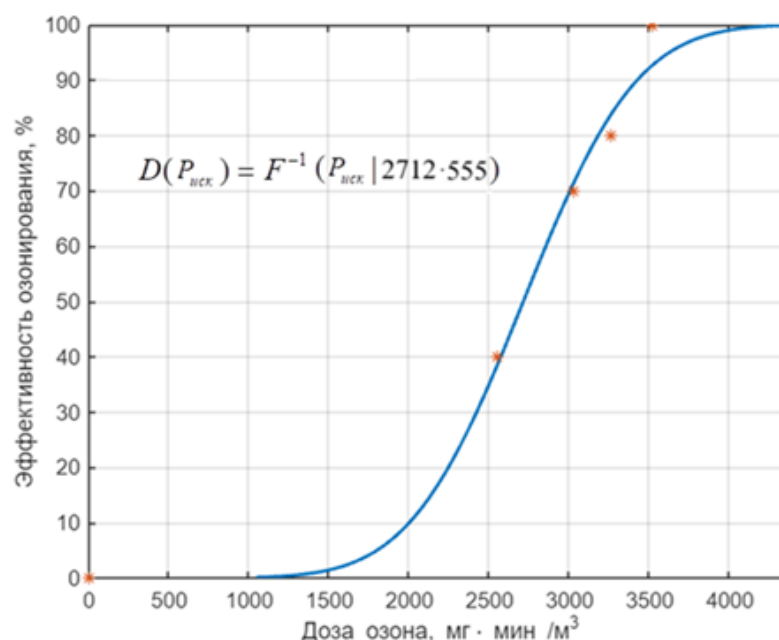


Рисунок 4.15 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна от гусениц зерновой моли в зависимости от дозы озонной обработки

Анализ рис. 4.15 показывает, что математическое ожидание и стандартное отклонение составляют $\mu = 2712$ и $\sigma = 555$ соответственно. Следовательно, доза озонной обработки, обеспечивающая полное уничтожение гусениц зерновой моли, составляет 4006 мг·мин/м^3 .

Таким образом, для полного уничтожения гусениц зерновой моли при озонной дезинсекции зерна при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси $1 \dots 5 \text{ мг/м}^3$ доза озонной обработки должна быть не менее 4006 мг·мин/м^3 .

4.5 Влияние озонной обработки на микрофлору зерна

Исследования по влиянию озонной обработки на микробиоту зерна пшеницы проводилось согласно методике, описанной в подразделе 3.4.4. Концентрация озона в озонозвоздушной смеси варьировалась в диапазоне 1...5 мг/м³ в зависимости от времени и режима работы озонатора. Расход агента дезинсекции составлял 1,0 м³/ч. Результаты фитопатологического анализа пшеницы на зараженность возбудителями болезней представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Результаты фитопатологического анализа зерна пшеницы

№ опыта	Доза озонной обработки, мин·мг/м ³	Микробиота, %		
		<i>Alternaria</i>	<i>Fusarium</i>	<i>Helminthosporium</i>
Контроль	0	22,5	11	9,75
1 партия	3600	22,25	11	8,5
2 партия	4800	20,75	9,75	8,25
3 партия	6000	16,25	8,25	7,25
4 партия	7200	15,55	7,75	4,25

Из анализа таблицы 4.18 следует, что в исследуемом зерне озимой пшеницы обнаружены грибковые заболевания, вызванные грибами родов *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium*. Озонирование зерна с дозой 3600 мин·мг/м³ способствовало снижению зараженности зерна грибами родов *Alternaria* и *Helminthosporium* на 0,25 и 1,25% соответственно. Снижение заболеваемости для других инфекций при заданных условиях не установлено. Увеличение дозы озонной обработки до 4800 мин·мг/м³ способствовало уменьшению содержания всех исследуемых грибов. Так, спорообразующий плесневый гриб рода *Alternaria* – снизился на 1,5% с 22,25 до 20,75%, грибы рода *Fusarium* – на 1,25% с 11,0 до 9,75%, а грибы рода *Helminthosporium* – на 1,5% с 9,75 до 8,25% относительно контроля. Доза озонной обработки 6000 мин·мг/м³ способствовала дальнейшему снижению заболеваемости. Относительно контроля грибковые инфекции уменьшились: у грибов рода *Alternaria* на 6,25% с 22,5 до 16,25%, у грибов рода *Fusarium* – на 2,75% с 11 до 8,25%, у грибов рода *Helminthosporium* на 2,5% с 9,75 до 7,25%. При достижении дозы озонной обработки 7200 мин·мг/м³ грибо-

вое заболевание рода *Alternaria* снизилось – на 6,95%, *Fusarium* – на 3,25% и *Helminthosporium* – на 5,5% относительно контроля.

Согласно результатам проведенного экспериментального исследования по влиянию озонной обработки на микрофлору зерна была получена закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки (рис. 4.16).

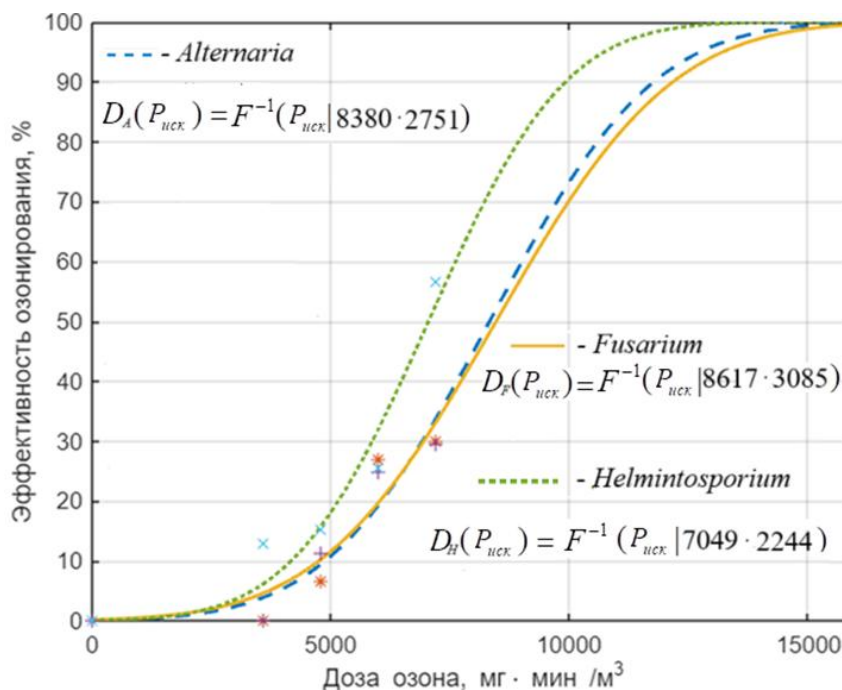


Рисунок 4.16 – Эффективность озонирования зерна от грибов родов *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium*

Статистическая обработка результатов исследования, показала, что математическое ожидание и стандартное отклонение грибов рода *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium* составляют $\mu_{Alt} = 8380$ и $\sigma_{Alt} = 2751$, $\mu_{Fus} = 8617$ и $\sigma_{Fus} = 3085$, $\mu_{Hel} = 7049$ и $\sigma_{Hel} = 2244$ соответственно, следовательно, для полного уничтожения доза озонной обработки для *Alternaria* составит 14782 мг·мин/м³, для *Fusarium* – 15795 мг·мин/м³, для *Helminthosporium* – 12270 мг·мин/м³.

Таким образом, озонная обработка оказывает положительное влияние на снижение зараженности зерна озимой пшеницы грибковыми заболеваниями. Содержание грибов рода *Alternaria* при дозе озонной обработки 7800 мин·мг/м³ удалось снизить на 30,9%, рода *Fusarium* – на 29,5% и *Helminthosporium* – на 56,6% относительно контрольных образцов. Для полного уничтожения исследуемых грибов необходимая доза озонной обработки не менее 15795 мг·мин/м³.

4.6 Выводы по разделу

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что:

- разработанная программа для ЭВМ, зарегистрированная в Федеральном институте промышленной собственности под свидетельством о государственной регистрации №2023611221, позволяет определить дозы озонной дезинсекции зерна, обеспечивающих полное уничтожение вредителей в зависимости от режимов обработки;

- предложенный ранее экспоненциальный закон разложения озона $K_{op} = -(\ln(1 + \Delta C / C_{cp} \cdot \Delta t) / t)$ в данных условиях достаточно точно описывает стадию процесса озонной обработки и имеет численное значение в интервале $2,12 \cdot 10^{-08} \pm 0,6 \cdot 10^{-08} \dots 2,31 \cdot 10^{-08} \pm 0,42 \cdot 10^{-08}$;

- разработанная технологическая схема устройства для хранения зерна, защищённая патентом РФ на полезную модель №230414, позволяет улучшить качество контроля заражённости зернового материала и эффективность озонной дезинсекции зерна и семян зерновых культур;

- для снижения заражённости зерна при хранении требуемые дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от жуков амбарного долгоносика составляет не менее 1420 мг·мин/м³, для жуков рисового долгоносика – не менее 1819 мг·мин/м³, для жуков булавосого хрущака – не менее 2306 мг·мин/м³, для жуков зернового точильщика – не менее 2087 мг·мин/м³, для бабочек зерновой моли – не менее 1091 мг·мин/м³, для гусениц зерновой моли не менее 4006 мг·мин/м³;

- при борьбе с грибковыми заболеваниями рода *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium* доза озонной обработки для их полного уничтожения должна превышать 15795 мг·мин/м³.

5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА

С целью определения экономической эффективности применения озонной дезинсекции зерна в сравнении с химической обработкой вредителей пестицидами был проведен расчёт экономической эффективности.

Базовый вариант заключается в газации хранящегося зерна пестицидом при помощи генератора тумана, который рабочую жидкость преобразует в газообразное состояние.

Суть проектируемого варианта состоит в обеззараживании зерна от вредителей путем аэрации озоновоздушной смесью. Газ нагнетается в систему вентиляционных каналов, которые смонтированы в конструкцию зернохранилища. Количество подаваемого озона регулируется за счет отдельных модулей, из которых состоит озонатор. Требуемое оборудование и его стоимость представлены в таблице 5.1.

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

Требуемое оборудование	Стоимость оборудования, руб	
	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Генератор тумана	520000	
Инсектицидный раствор	58000	
Вода для раствора	6000	
Озонаторная установка		480000
Газоанализатор		54000
Компрессор		60000
Осушитель воздуха		85000
Датчики определения концентрации озона		90000
Соединительные шланги		15000
Дополнительные расходы для газации	20000	
Итого затрат на оборудование	604000	784000
Затраты на монтаж, 10% от стоимости оборудования	-	78400
Затраты на пусконаладочные работы, 7% от стоимости оборудования		54880
Прочие расходы, 3% от стоимости оборудования		23520
Капитальные вложения, К		940800

Для расчёта экономической эффективности необходимо определить эксплуатационные издержки обоих вариантов.

Амортизационные отчисления для базового варианта определим по формуле

$$A_m = C_{об} \cdot N_a / 100, \quad (5.1)$$

где A_m – затраты на амортизацию, руб;

$C_{об}$ – затраты на оборудование (табл. 5.1), руб;

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

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

$$A_m^{баз} = 604000 \cdot 5 / 100 = 30200 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта амортизационные отчисления A_m^{np} составят

$$A_m^{np} = 784000 \cdot 5 / 100 = 39200 \text{ руб.}$$

Следовательно, дополнительные амортизационные отчисления, вызванные установкой оборудования, будут равны

$$A_m^{дон} = A_m^{np} - A_m^{баз} = 39200 - 30200 = 9000 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание определим по формуле

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

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

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

Для базового варианта затраты на ремонт и техническое обслуживание составят

$$P_m^{баз} = 604000 \cdot 6 / 100 = 36240 \text{ руб.}$$

Для проектируемого варианта затраты на ремонт и техническое обслуживание составят

$$P_m^{np} = 784000 \cdot 6 / 100 = 47040 \text{ руб.}$$

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

$$P_m^{don} = P_m^{np} - P_m^{баз} = 47040 - 36240 = 10800 \text{ руб.} \quad (5.4)$$

Затраты на электроэнергию определим по формуле:

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

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

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

$C_{эл}$ – средняя цена 1 кВт·ч в России, $C_{эл} = 7,88$ руб.

Исходя из данных производителя, суммарная потребляемая мощность базового варианта равна 1,2 кВт, а для проектируемого варианта 20 кВт.

Годовой расход электроэнергии определяем по формуле

$$Q_{эл} = G \cdot T \cdot J, \quad (5.6)$$

где G – суммарная потребляемая мощность базового варианта, кВт;

T – продолжительность рабочего времени, ч;

J – количество рабочих дней в году.

Для базового варианта годовой расход электроэнергии составит

$$Q_{эл}^{баз} = 1,2 \cdot 8 \cdot 247 = 2371,2 \text{ кВт·ч}$$

Для проектируемого варианта годовой расход электроэнергии составит

$$Q_{эл}^{np} = 20 \cdot 8 \cdot 247 = 39520 \text{ кВт·ч.}$$

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

$$C_{эл}^{баз} = 2371,2 \cdot 7,88 = 18685,05 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для проектируемого варианта $Q_{эл}^{np}$ составят

$$C_{эл}^{np} = 39520 \cdot 7,88 = 311417,6 \text{ руб.}$$

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

$$Q_{эл}^{доп} = Q_{эл}^{np} - Q_{эл}^{баз} = 311417,6 - 18685,056 = 292732,54 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

Суммарные эксплуатационные затраты базового варианта в год составят

$$\mathcal{E}_z^{баз} = A_m^{баз} + P_m^{баз} + C_{эл}^{баз} = 30200 + 36240 + 18685,05 = 85125,05 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Суммарные эксплуатационные затраты проектируемого варианта в год составят

$$\mathcal{E}_z^{np} = A_m^{np} + P_m^{np} + C_{эл}^{np} = 39200 + 47040 + 311417,6 = 397657,6 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

Таким образом, годовые дополнительные эксплуатационные издержки составят

$$\mathcal{E}_u = \mathcal{E}_z^{np} - \mathcal{E}_z^{баз} = 397657,6 - 85125,05 = 312532,54 \text{ руб.} \quad (5.10)$$

где $\mathcal{E}_u$ – дополнительные эксплуатационные издержки, руб.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что применение процесса озонирования влечет за собой удорожание базового процесса дезинсекции на 312532,54 рублей. Однако после обработки зерна пестицидом, его качество ухудшается, а озонная дезинсекция экологически чистая и отрицательного влияния не оказывает. За счет этого класс зерна сохраняется и позволяет продавать его дороже.

Расчет годовой экономической эффективности применения озонной дезинсекции зерна по сравнению с газацией пестицидом представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Годовой экономический эффект применения озонной дезинсекции зерна по сравнению с газацией пестицидом

Показатели	Базовый вариант	Проектируемый
Годовой объем обрабатываемого зернового материала, т:	1000	1000
- зерно товарное третьего класса	660	240
- зерно товарное второго класса	340	760
Цена тонны зернового материала, руб/т:		
- зерно третьего класса	11050	11050

Показатели	Базовый вариант	Проектируемый
- зерно второго класса	13100	13100
Стоимость продукции в год, руб:		
- зерно третьего класса	7293000	2652000
- зерно второго класса	4454000	9956000
Стоимость всей продукции, руб:	11747000	12608000
Разница в стоимости продукции в год, руб:	-	861000
Дополнительные эксплуатационные издержки:	-	312532,54
Годовой экономический эффект, руб:	-	548467,45

Таким образом, годовой экономический эффект применения процесса озонирования по сравнению с химической дезинсекцией зерна составляет $P_{rt} = 548467,45$ руб.

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

$$K_T = P_{rt} \cdot \frac{(1 + ND)^{T_3} - 1}{ND}, \quad (5.11)$$

где K_T – экономический эффект за срок эксплуатации, руб;

T_3 – срок эксплуатации оборудования; $T_3 = 10$ лет;

ND – требуемая норма доходности.

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

$$K_T = 548467,45 \cdot \frac{(1 + 0,1211)^{10} - 1}{0,1211} = 9676248,75 \text{ руб.}$$

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

$$D_p = \frac{K_T}{(1 + ND)^{T_3}} = \frac{9676248,75}{(1 + 0,1211)^{10}} = 3085059,17 \text{ руб} \quad (5.12)$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений определяется по формуле

$$ET = \sqrt[10]{\frac{K_T}{K_{\text{доп}}}} - 1 \quad (5.13)$$

где $K_{\text{доп}}$ – дополнительные капитальные вложения, $K_{\text{доп}} = 1253332,54$ руб.

$$ET = \sqrt[10]{\frac{9676248,75}{1253332,54}} - 1 = 1,23 - 1 = 0,23.$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений больше требуемой нормы доходности.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений найдем по следующей зависимости

$$T_{\text{ок}} = \frac{-\ln\left(1 - K_{\text{доп}} \cdot \frac{ND}{P_{rt}}\right)}{\ln(1 + ND)} = \frac{-\ln\left(1 - 1253332,54 \cdot \frac{0,1211}{548467,45}\right)}{\ln(1 + 0,1211)} = 2,8 \text{ года.} \quad (5.14)$$

Результаты расчётов экономической эффективности представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Экономическая эффективность применения озонной дезинсекции зерна

Наименование показателя	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Стоимость оборудования, руб.	604000	784000
Капитальные вложения, руб.	-	940800
Стоимость реализованной продукции, руб.	11747000	12608000
Разница стоимости реализованной продукции, руб.	-	861000
Годовой экономический эффект, руб.	-	548467,45
Коэффициент эффективности капитальных вложений	-	0,23
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	-	2,8

Таким образом, расчеты экономической эффективности озонной дезинсекции зерна показали, что при капитальных вложениях 940800 рублей срок окупаемости составит 2,8 года, а годовой экономический эффект 548467,45 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные способы дезинсекции зерна посредством охлаждения, нагревания, фумигации, протравливания имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение, что приводит к потерям 15 % мирового урожая, которые можно снизить путем применения озонной дезинсекции зерна, обладающей высокой эффективностью, экономичностью и экологичностью при дозах озона до $28,8 \text{ г} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ и имеющихся перспектив снижения режимов озонной обработки за счёт последствия воздействия газа на зерновых вредителей.

2. Полученная система алгебраических и дифференциальных уравнений для определения концентрации озона в озоновоздушной смеси учитывает количество поглощаемого озона в единицу времени, константу разложения озона, параметры озоновоздушной смеси, коэффициенты диффузии, геометрии, скважистости и позволяет определить дозу озонной обработки, достигающуюся зерновым вредителям.

3. Разработанная компьютерная программа (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611221) обеспечивает автоматизацию обработки результатов исследований по дезинсекции зерна озоновоздушной смесью и позволяет установить необходимую дозу озонной обработки с учётом параметров математического ожидания и стандартного отклонения, обеспечивающую 100% эффективность дезинсекции от конкретных зерновых вредителей.

4. Предложенное устройство для хранения зерна (патент РФ на полезную модель № 230414) позволяет улучшить качество контроля заражённости хранящегося зернового материала и повысить эффективность процесса озонной дезинсекции зерна и семян зерновых культур.

5. Для снижения заражённости зерна при хранении требуемые дозы озонной обработки составляют: для жуков амбарного долгоносика – не менее $1420 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$, для жуков рисового долгоносика – не менее $1819 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$, для жуков булавоусого хрущака – не менее $2306 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$, для жуков зернового точильщика – не менее $2087 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$, для бабочек зерновой моли – не менее $1091 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$, для гусениц зерновой моли – не менее $4006 \text{ мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$.

6. Для уничтожения грибов рода *Alternaria*, *Fusarium* и *Helminthosporium* посредством озонирования необходима доза озонной обработки не менее 15795 мг·мин/м³.

7. При совершенствовании зернохранилища вместимостью 1000 тонн зерна посредством внедрения озонной дезинсекции требуются капитальные вложения 940800 рублей, а годовой экономический эффект составит 548467,45 рублей при сроке окупаемости 2,8 года.

8. Полученные результаты диссертационной работы внедрены в производство, используются в учебном процессе и позволяют рекомендовать применение устройства для хранения зерна (патент РФ на полезную модель № 230414) с проведением озонной обработки при дозах не менее 4000 мг·мин/м³ для уничтожения зерновых вредителей и не менее 15800 мг·мин/м³ при борьбе с грибковыми заболеваниями, что сократит потери хранящегося зерна.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в оценке эффективности озонной обработки в различных условиях хранения при разных видах зерна, идентификации видов насекомых и определении степени заражённости зерна в хранилищах с применением искусственного интеллекта.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

РФ – Российская Федерация;

ФГБОУ – Федеральное государственное бюджетное учреждение;

ГАУ – государственный аграрный университет;

НИР – научно-исследовательская работа;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

КФХ – крестьянское фермерское хозяйство;

АПК – агропромышленный комплекс;

ВАК – высшая аттестационная комиссия;

ПКЭ_{сум} – суммарный показатель произведения произведение концентрации газа на время экспозиции;

ПКЭ_н – нормативный показатель произведения концентрации газа на время экспозиции;

ООН – Организация Объединённых Наций;

C_i – изменения концентрации озона в зерне, мг/м³;

C_o – начальная концентрация озона, мг/м³;

$g_{адс.}$ – количество адсорбированного озона, мг;

$g_{разл.}$ – количество разложившегося озона на поверхности зерна, мг;

$g_{обм.}$ – количество разложившегося озона в обрабатываемом объеме, мг;

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

$t_{конт}$ – время контакта с зерновым слоем, с;

W – объёмный расход озонородной смеси через слой зернового материала;

$K_{кпр}$ – коэффициент пропорциональности расходования озона по толщине слоя;

g_t – количество озона в момент t ;

dC/dt – скорость поглощения озона зерном;

$C_{озон}$ – концентрация озона в озонородной смеси, мг/м³;

K_C – константа скорости поглощения озона единицей объёма зерна, мг/(м³·с);

$S_{озм}$ – площадь обрабатываемого зернового материала, м²;

$V_{обр}$ – объём обрабатываемого зерна, м³;

v – скорость движения озонородной смеси, м/с;

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

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

$t_{\text{обр}}$ – затраченное время обработки, с;

W_1 – функция Ламберта;

$C_{\text{ж}}$ и $C_{\text{г}}$ – концентрации озона в жидкой и газовой фазе соответственно, мг/м³;

Γ – количество молекул в единице массы, адсорбированных или абсорбированных за определённое время t , мг/с;

A – площадь поверхности, м²;

$C_{\text{мол}}$ – концентрация молекул озона в объеме, мг/м³;

K_D – коэффициент диффузии абсорбера, м²/с;

t – время обработки, с;

ν_d – удельная скорость озонной диффузии через площадь поверхности зерен (диффузионный поток), мг/м²с;

$d_{\text{ср}}$ – средний диаметр зерна, мм;

C – концентрация озона в озоновоздушной смеси на поверхности зерна, мг/м³;

$C_{\text{пор}}$ – концентрация молекул озона в порах зерна, мг/м³;

ρ_o – парциальная плотность озона, мг/м³;

V – общий объем зерна, м³;

S – площадь поверхности зерна, м²;

$k_{\text{скв}}$ – коэффициент скважистости зернового вороха;

$V_{\text{зм}}$ – объём зерновой массы, м³;

k_f – коэффициент геометрии;

$C_{\text{пор max}}$ – максимальная концентрация в порах, мг/м³;

$V_{\text{пор}}$ – объем пор, м³;

dK/dt – скорость озонопоглощающей способности зернового вороха за счёт диффузии через поверхность зерна, мг/с.

$K_{\text{ор}}$ – константа разложения озона, с⁻¹;

t_0 – время начала процесса разложения, с;

Δt – конечный промежуток времени для которого определяется изменение концентрации, с;

C_{cp} – среднее значение концентрации за время t ;

C_0 – концентрации озона в озоновоздушной смеси в начале наблюдения, мг/м³;

$\nu_{кор}$ – конечная скорость разложения озона, с⁻¹;

R^2 – коэффициент детерминации;

$R_{кор}^2$ – скорректированный коэффициент детерминации;

$\nu_{поток}$ – скорость потока, м/с;

$K_{погл}$ – количество поглощаемого озона в единицу времени;

$S_{масс}$ – площадь поперечного сечения озонируемой массы;

$L_{поток}$ – общая длина потока;

$t_{тек}$ – текущее время моделирования, мин;

$\nu_{ор}$ – скорость разложения озона, мг/с;

D_p – доза озона для уничтожения насекомых, мг/м³;

μ – математическое ожидание;

σ – стандартное отклонение;

$D(P_{иск})$ – необходимая доза озонной обработки для искомой вероятности, мг·мин/м³;

A_m – затраты на амортизацию, руб;

$A_m^{баз}$ – амортизационные отчисления для базового варианта, руб;

A_m^{np} – амортизационные отчисления для проектируемого варианта, руб;

$A_m^{дон}$ – дополнительные амортизационные отчисления

$C_{об}$ – затраты на оборудование, руб;

N_a – годовая норма амортизации, %;

P_m – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб;

$P_m^{баз}$ – затраты на ремонт и техническое обслуживание для базового варианта, руб;

P_m^{np} – затраты на ремонт и техническое обслуживание для проектируемого варианта, руб;

$P_m^{дон}$ – дополнительные затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб;

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

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

$C_{эл}^{баз}$ – затраты на электроэнергию для базового варианта, руб;

$C_{эл}^{np}$ – затраты на электроэнергию для проектируемого варианта, руб;

$Q_{эл}^{доп}$ – дополнительные затраты на электроэнергию, руб;

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

$Q_{эл}^{баз}$ – годовой расход электроэнергии для базового варианта, кВт·ч;

$Q_{эл}^{np}$ – годовой расход электроэнергии для проектируемого варианта, кВт·ч;

$\mathcal{E}_2^{баз}$ – эксплуатационные затраты базового варианта, руб;

$\mathcal{E}_2^{np}$ – эксплуатационные затраты проектируемого варианта, кВт·ч;

$\mathcal{E}_u$ – дополнительные эксплуатационные издержки, руб;

$\Pi_{эл}$ – средняя цена 1 кВт·ч в России, руб;

G – суммарная потребляемая мощность базового варианта;

T – продолжительность рабочего времени;

J – количество рабочих дней в году;

P_{rt} – годовой экономический эффект;

K_T – экономический эффект за срок эксплуатации, руб;

T_3 – срок эксплуатации оборудования, лет;

ND – требуемая норма доходности;

D_3 – дополнительные затраты на модернизацию, руб;

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева В.Н. Применение экологических методов подавления патогенной микрофлоры зерна озимой пшеницы при хранении: дис. ... канд. с.-х.н: 03.00.16 / Авдеева Валентина Николаевна; [Место защиты: Ставропольский гос. аграр. ун-т]. – Ставрополь, 2009. – 141 с.
2. Аммосов И.Н. Технологические аспекты подавления насекомых-вредителей зерна аэрированием / И.Н. Аммосов, В.М. Дринча, И.Б. Борисенко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 2(66). – С. 537-544. – DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-00.
3. Антошин И.В. Особенности технологического процесса при активном вентилировании зерновых масс / И.В. Антошин, В.Б. Пойда // Инициативы молодых - науке и производству: сборник статей III Всероссийской науч.-практ. конф. для молодых ученых и студентов (Пенза, 20–21 июня 2022 г.). – Пенза: Пензенский гос. аграр. ун-т, 2022. – С. 7-10.
4. Акивис С.И. Особенности сорных примесей свежееубранного зерна / С.И. Акивис // Сообщения и рефераты ВНИИЗ. – М., 1955. – Вып.2. – С.18-23.
5. Автоматизация обработки данных и поиска рациональной дозы озона при дезинсекции зерна / И.А. Пожидаев, А.В. Химченко, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 24-31.
6. Баскаков И.В. Влияние озонной обработки на вредителей зерна / И.В. Баскаков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 3 (62). – С. 41-46. – DOI: 10.17238/issn2071-2243.2019.3.41.
7. Баскаков И.В. Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала: дис ... д-ра. с.-х.н: 05.20.01 / Баскаков Иван Васильевич [Место защиты: Воронежский гос. аграр. ун-т им. императора Петра I]. – Воронеж, 2019. – 339 с.

8. 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: Воронежский ГАУ, 2016. – С. 198-204.
9. Берзиньш Э.Р. Опыт обработки семян высокой влажности / Э.Р. Берзиньш, Н.А. Добычин // Селекция и семеноводство. – 1979. – № 1. – С. 46 - 47.
10. Бахчевников О.Н. Применение озона для обеззараживания кормового сырья (обзор) / О.Н. Бахчевников, А.В. Брагинец // Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – № 2(26). – С. 41-61. – DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-41-61.
11. Вербицкая С.В. Предпосевная обработка семян фасоли озоном и магнитным полем: дис. ... канд. с.-х.н: 05.20.02 / Вербицкая Софья Викторовна. – Зерноград, 2001. – 167 с.
12. 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. (Воронеж, 12 февраля 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 203-207.
13. 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 международной науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 февраля 2021 г.). – Ч. I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 55-60.
14. 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. (Воронеж, 29 ноября 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 117-121.
15. Влага в зерне: монография / А.С. Гинзбург [и др.]. – М.: Колос, 1969. – 224 с.

16. Вобликов Е.М. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов, А.С. Прокопец. – Ростов-на-Дону: Издательский центр «МарТ», 2003. – 231 с.
17. Волошин Е.В. Зерноведение с основами растениеводства: учебное пособие / Е.В. Волошин. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2019. – 97 с.
18. 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. 166-178. – DOI: 10.36107/spfp.2023.396.
19. 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 ГАУ. – 2021. – Т. 14, № 3(70). – С. 12-17. – DOI:10.53914/issn2071-2243_2021_3_12.
20. Влияние озонной обработки на заражённость зерна озимой пшеницы микрофлорой / И.В. Баскаков, А.Д. Головин, И.А. Пожидаев [и др.] // Наука в Центральной России. – 2024. – Т.72, №6. – С. 7-18. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-6-7-18.
21. 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.
22. Влияние параметров озонирования на грибковые заболевания пчелиных семей / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, Д.А. Овсянников [и др.] // Сельский механизатор. – 2025. – № 1. – С. 26-28. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-1-26-27-28.
23. Гагкаева Т.Ю. Заражённость грибами и загрязнение микотоксинами зерна овса на северо-западе России в 2014 г. / Т.Ю. Гагкаева, О.П. Гаврилова // Защита и карантин растений. – 2015. – №8. – С. 10-12.
24. Гагкаева, Т.Ю. Заражённость зерна грибами *Fusarium* в Краснодарском и Ставропольском краях / Т.Ю. Гагкаева, О.П. Гаврилова // Защита и карантин растений. – 2014. – №3. – С. 30-32.

25. Голик М.Г. Поточные методы обработки зерна на приемных пунктах / М.Г. Голик; под ред. П. В. Арзамасцева. – М.: Хлебоиздат, 1958. – 72 с.
26. ГОСТ 30483 - 97. Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зёрен и крупностей; содержания зёрен пшеницы; повреждённых клопом - черепашкой; содержания металломагнитной примеси. Взамен ГОСТ 13586.2-81; введ. 1998.07.01. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 21 с.
27. Головин А.Д. Влияние предпосевного озонирования семян нута на их энергию прорастания / А.Д. Головин, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Молодёжный вектор развития аграрной науки: материалы 73-й национальной науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 01-31 апреля 2022 г.). – Ч.І. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 440-448.
28. ГОСТ 34165 - 2017. Зерновые, зернобобовые и продукты их переработки. Методы определения загрязнённости насекомыми-вредителями: введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2018.– 17 с.
29. Данилов Д.Ю. Тепловая обработка сельскохозяйственных материалов и пути повышения её эффективности / Д.Ю. Данилов // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2, № 3(4). – С. 19-29.
30. Закладной Г.А. Биологическая активность озона в отношении вредителей зерна – рисового долгоносика и амбарного долгоносика / Г.А. Закладной, Е.К.М. Сасед, Е.Ф. Когтева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 4. – С. 59-61.
31. Закладной Г.А. Сколько зерна пшеницы кушают насекомые / Г.А. Закладной // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2017. – № 8(8). – С. 160- 166.
32. Закладной Г.А. Фумигация фосфином зерна в напольных сооружениях / Г.А. Закладной // Защита и карантин растений. – 2022. – № 11. – С. 16-19. – DOI:10.47528/1026-8634_2022_11_16.
33. Закладной Г.А. Актуальные проблемы сохранения зерна для хлебороба / Г.А. Закладной // АгроСнабФорум. – 2015. – № 7(135). – С. 41-43.

34. Значение озимой и яровой пшеницы в производстве продуктов питания / Н.В. Долгополова, В.А. Скрипин, О.М. Шершнева, Ю.В. Алябьева // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 5. – С. 52-56.
35. Защита зерновых культур от болезней: монография / А.Ю. Кекало, В.В. Немченко, Н.Ю. Заргарян, М.Ю. Цыпышева. – Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2017. – 172 с.
36. Изменение концентрации озона в ворохе зерна кукурузы в зависимости от параметров процесса озонирования / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4(59). – С. 134-140. – DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.134.
37. Исследование изменения pH воды при озонировании / А.В. Шабалина, Е.Д. Фахрутдинова, М.И. Федотова [и др.] // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 375. – С. 200-203.
38. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82 / Инструкция разработана лабораторией зерносушения ВНИИЗ при участии Сибирского, Казахского, Кубанского филиалов ВНИИЗ и ОТИПП. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. – 61 с.
39. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян / Д.А. Нормов, Д.В. Пожидаев, Р.В. Волон [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №112. – С.1438-1451.
40. К вопросу применения озонозооной 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. (Воронеж, 24–25 ноября 2020 г.) – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – С. 186-191.
41. Карпов Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна / Б.А. Карпов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 289 с.

42. Киреев М.В. Послеуборочная обработка зерна в хозяйствах / М. В. Киреев, С.М. Григорьев, Ю.К. Ковальчук. – Л.: Колос, 1981. – 223 с.
43. Когтева Е.Ф. Методологические основы фумигации зерна в силосах элеватора / Е.Ф. Когтева // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2017. – № 8(8). – С. 198-216.
44. Когтева Е.Ф. Защита хранящегося зерна от вредных насекомых с использованием смесей метопрена с инсектицидами: специальность: автореф. дис ... к.т.н: 05.18.03 / Когтева Елена Феодосьевна. – М., 2000. – 14 с.
45. Когтева Е.Ф. Методика фумигации зерна насыпью в зерноскладах / Е.Ф. Когтева // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2017. – № 8(8). – С. 217- 223.
46. Корбуш А.Д. Эффективность применения озоновой дезинфекции в зернохранилище / А.Д. Корбуш // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2018. – № 10. – С. 122-124.
47. Ксенз Н.В. Генерация озона коронным разрядом / Н.В. Ксенз, О.В. Меликова, И.Г. Сидорцов // Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе: материал VI Российской науч.-практ. конф. (г. Ставрополь, 22-24 апреля 2011 г.). – Ставрополь: Ставропольское изд-во «Параграф», 2011. – С. 70-73.
48. Ксенз Н.В. Электроозонирование воздушной среды животноводческих помещений: дис. ... д-ра т. н: 05.20.02 / Николай Васильевич Ксенз. – 1992. – 307 с.
49. 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. (Воронеж, 14–20 мая 2025 г.). – Ч. I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2025. – С. 386-390.
50. Лукьянцев В.С. Влияние сорта и предпосевной обработки семян яровой пшеницы на повреждаемость амбарными вредителями / В.С. Лукьянцев, А.П. Глинушкин, А.А. Соловых // Известия Оренбургского гос. аграр. ун-т. – 2012. – № 6. – С. 51-53.

51. Макарова А.С. Прогноз развития растениеводства в России / А. С. Макарова, Н.А. Садовникова // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2012. – № 5. – С. 123-126.
52. Маслов М.И. Защита растениеводческой продукции при перевозке и хранении / М. И. Маслов // Защита и карантин растений. – 2008. – № 1. – С. 36-38.
53. Мануйленко А.Н. Конструкция электрического озонатора для обеззараживания воздушных масс в животноводческом помещении / А.Н. Мануйленко, С.В. Вендин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 3. – С. 64-71.
54. Мануйленко А.Н. Результаты исследований по разработке электроозонаторного устройства для улучшения показателей качества воздушной среды в животноводческих помещениях / А.Н. Мануйленко // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 2. – С. 118-125. – DOI 10.28983/asj.y2024i2pp118-125.
55. Мануйленко А.Н. Результаты экспериментальных исследований автономного модуля электрического озонатора воздуха для животноводческих помещений / А.Н. Мануйленко, Ю.Н. Ульянов, С.В. Вендин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 4. – С. 42-50
56. Мерчалова М.Э. Снижение травмирования зерна пшеницы за счет совершенствования технологического процесса его послеуборочной обработки: дис. ... канд. техн. наук / Марина Эдуардовна Мерчалова; [Место защиты: Воронежский гос. аграр. ун-т]. – Воронеж, 1992. – 208 с.
57. Мордкович Я.Б. Основные методы обеззараживания зерна от вредителей запасов / Я.Б. Мордкович, П.А. Яковлев // Защита и карантин растений. – 2019. – № 12. – С. 24-25.
58. Модернизация озонатора для обработки пчелиных ульев / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, И.Н. Шишигин, А.А. Лоза // Сельский механизатор. – 2024. – №12. – С. 32-33. – DOI 10.47336/0131-7393-2024-12-32-33.
59. Назарова К.А. Транспортировка и хранение зерна / К.А. Назарова, Н.Л. Лопаева // Молодежь и наука. – 2022. – № 11. – 5 с.

60. О растворимости озона в воде / Г.В. Егорова, В.А. Вобликова, Л.В. Сабитова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 261-265.

61. 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 междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 01 апреля – 31 марта 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 115-119.

62. Одна технология – два вида защиты / А.П. Глинушкин, А.А. Соловых, В.С. Лукьянцев [и др.] // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. – 2012. – № 3(3). – С. 3-6.

63. Озон – эффективный фумигант для обеззараживания зернопродуктов от амбарных вредителей / Н.Д. Романенко, В.Г. Заец, Т.Н. Михальская [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2007. – №1-2. – С. 27-31.

64. Озоновоздушная смесь как эффективный инструмент для сушки зерна / Н.В. Ксенз, А.В. Белоусов, Н.Г. Леонтьев, И.Г. Сидорцов // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2014. – № 4. – С.49-50.

65. 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. аграр. ун-т им. К.Д. Глинки]. – Воронеж, 2007. – 334 с.

66. Осман М.А.М. Озон – альтернатива фумигантам / М.А.М. Осман, Г.А. Закладной // Защита и карантин растений. – 2008. – № 3. – С. 56.

67. Остафийчук Л.А. Особенности повреждения зерна вредителями хлебных запасов, образующих скрытую форму зараженности // Л.А. Остафийчук, А.С. Прокопец // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологической безопасности сельскохозяйственной и пищевой продукции: сб. материалов III междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Краснодар, 8-19 апреля 2019 г.). – Краснодар: ГНУ Всероссийский науч-

но-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий Российской академии сельскохозяйственных наук, 2019. – С. 408-413.

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. Озонная дезинсекция зерна от амбарного долгоносика и булавоусого хрущака / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, В.В. Василенко, А. М. Гиевский // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2022. – Т. 52, № 5. – С. 42-48. – DOI: 10.26898/0370-8799-2022-5-5.

70. 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. (Воронеж, 06–07 июня 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 94-104.

71. Параметры озонирования в пчеловодстве / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, И. Н. Шишигин [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 6. – С. 15-17. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-6-15-16-17.

72. Пожидаев И.А. Снижение зараженности зерна вредителями на этапе уборки за счет установки на ветра комбайна озонатора / И.А. Пожидаев, В.И. Оробинский // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 73-й науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2021 г.). – Ч. II. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 520-527.

73. 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 (Воронеж, 11–12 ноября 2021 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 236-240.

74. 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 (Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2021 г.) – Ч.І. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 200-205.

75. 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); заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Истра-Озон" (RU). – №2013139500/13: заявлено 27.08.2013; опубл. 20.07.2015. Бюл. №20. – 9 с.

76. Патент РФ на изобретение №2659904 С1, МПК А01С1/00, А01F25/14 (2006.01). Хранилище семян / Р.Л. Чишко, А.П. Тарасенко, И.В. Баскаков [и др.] (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2017111422; заявлено 04.04.2017; опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19. – 7 с.

77. Патент РФ на изобретение №2341924 С2, МПК А01С 1/00. Устройство для обработки семян озоном / В.А. Савельев, А.Х. Газиев (РФ): заявитель ФГОУ ВПО Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева (RU). – №2006145271/13; заявлено 19.12.2006; опубл. 27.12.2008. Бюл. № 36. – 4 с.

78. Патент РФ на полезную модель №163357 U1, МПК А01С 1/00. Мобильное устройство для обезвреживания зерна в хранилищах элеваторного типа и обеззараживания воздуха в помещениях / А.И. Безлепкин, А.Ю. Волков, Л.В. Говейлер, А.В. Шалларь (РФ): заявитель ООО "Научно-производственное объединение Экология, Наука, Техника", (RU). – № 2015125880/13: заявлено 29.06.2015; опубл. 20.07.2016. Бюл. № 36. – 4 с.

79. 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 ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2023107027; заявлено 23.03.2023; опубл. 05.07.2023. Бюл. №19. – 5 с.

80. 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 ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2023128000, заявлено 31.10.2023; опубл. 22.02.2024. Бюл. №6. – 5 с.

81. Патент РФ на полезную модель № 219336 U1, МПК A01F 25/14. (2006/01). Устройство для хранения зерна / А.Д. Головин, И.В. Баскаков, В. И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2023109316; заявлено 12.04.2023; опубл. 12.07.2023. Бюл. №20. – 5 с.

82. Патент на полезную модель РФ №230414 U1, МПК A01F 25/14 (2006/01). Устройство для хранения зерна и семян зерновых культур / И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский [и др.] (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2024131756; заявлено 23.10.2024; опубл. 03.12.2024. Бюл. № 34. – 4 с.

83. Пименов С.В. Вредоносность важнейших насекомых-вредителей зерна и продуктов его переработки / С.В. Пименов // Концептуальные и прикладные аспекты научных исследований и образования в области зоологии беспозвоночных: сборник статей V междунар. конф. (Томск, 26–28 октября 2020 г.). – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2020. – С. 126-130. – DOI: 10.17223/978-5-94621-931-0-2020-31.

84. Подъяпольская О.П. Микрофлора пшеничного зерна и ее изменение под влиянием влажности и температуры / О.П. Подъяпольская, В.А. Мирзоева // Труды ВНИИЗ. – М., 1955. – Вып. 30. – С. 13-39.

85. Пожидаев И.А. Озоновоздушная смесь как средство дезинсекции зерна / И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Ч.I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 255-263.

86. Пожидаев И.А. Потери зерна от жизнедеятельности основных вредителей зерновых культур / И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Воронеж, 29–30 апреля 2021 г.). – Ч.I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 43-50.

87. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций «Food and Agriculture Organization» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/home/ru/> (дата обращения: 17.04.2025).

88. 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 (Воронеж, 15 февраля – 31 марта 2024 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2024. – С. 372-376.

89. Пospelов А.В. Влияние температуры воды на растворимость озона / А.В. Пospelов // Передовые технологии и материалы будущего: сборник статей IV междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 09 декабря 2021 г.). – Т.2. – Минск: Белорусский ГТУ, 2021. – С. 140-143.

90. Распределение озонородной 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. науч.-практ. конф. (Воронеж, 30 ноября 2023 г.) – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 168-174.

91. Рубан В.С. Повышение качества семян зерновых культур / В.С. Рубан, Н.Н. Котляр, В.П. Шкурпела. – М.: Россельхозиздат, 1981. – 47 с.

92. Рубин А.Б. Теоретическая биофизика: учебник. / А.Б. Рубин – М.: Медицина, 1983. – 272 с.

93. Романовский В.И. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, А.Д. Гуринович // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3(176). – С. 113-118.

94. Саеяд Е.К.М. Биологическая активность озона как средства дезинсекции хранящегося зерна: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11 / Саеяд Емад Касим Мохаммад. – М., 2004. – 134 с.

95. Смирнов А.А. Электротехнологическая озонаторная установка для обеззараживания кормовых смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Смирнов Александр Анатольевич. – М., 2014. – 23 с.

96. Стародубцева Г.П. Озонирование как эффективный метод обеззараживания зерна озимой пшеницы / Г.П. Стародубцева, Ю.А. Безгина, В.Н. Авдеева // Актуальные вопросы экологии и природопользования: материалы междунар. на уч.-практ. конф. (Россия, Ставрополь, 21-25 октября 2005 г.). – Ставрополь: Изд-во Агрус, 2005. – С. 52-55.

97. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2023611221. Эффективность озонной обработки при дезинсекции зерна и определение рациональной дозы озонирования / И.А. Пожидаев, А.В. Химченко, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский (РФ); правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ – Заявка №2023610464; дата поступления 17.01.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.01.2023. Бюл. №1.

98. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2024614311. Расчёт формы очага обработки зернового вороха при озонировании / А.Д. Головин, А.В. Химченко, И.В. Баскаков [и др.] (РФ); правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ – Заявка №2024613287; дата поступления 21.02.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.02.2024. Бюл. №3

99. Тарасенко А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2003. – 331 с.

100. Трисвятский Л.А. Хранение зерна / Л.А. Трисвятский. – М.: Колос, 1975. – 399 с.

101. Трисвятский Л.А. Хранение зерна: учеб. для вузов / Л.А. Трисвятский. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1986. – 351 с.

102. Трисвятский Л.А. Комплексная система послеуборочной обработки: 6th International cereal and bread congress / Л.А. Трисвятский. – М.: ВНИИЗ, 1978. – 128 с.

103. Троцкая Т.П. Сушка зерна с помощью озонозооозушной смеси / Т.П. Троцкая // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – №1. – С. 36-39.
104. Троцкая Т.П. Электроактивирование процессов сушки растительных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Троцкая Таисия Павловна. – М., 1998. – 31 с.
105. Теоретические аспекты взаимодействия озона с зерном / И.А. Пожидаев, А.Д. Головин, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – № 1(67). – С. 90-101. – DOI:10.35887/2305-2538-2024-1-90-101.
106. Теоретические предпосылки определения размера и объёма распространения очага озона в зерновом ворохе и оптимизация времени озонирования / А.Д. Головин, И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – № 2(68). – С. 26-32. – DOI:10.35887/2305-2538-2024-2-26-32.
107. 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. – № 1(67). – С. 76-89. – DOI:10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.
108. Тухватуллин М.М. Изменение микрофлоры и интенсивность дыхания компонентов свежесобранной пшеницы при хранении / М.М. Тухватуллин, Л.В. Алексеева // Труды ВНИИЗ. – М., 1986. – Вып. 108 – С.35-39.
109. 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.
110. Цокур Е.С. Применение процесса озонирования в сельском хозяйстве / Е.С. Цокур // Colloquium-Journal. – 2019. – № 25-1(49). – С. 63-64.
111. Чернышов А.В. Альтернативные способы хранения зерна в хозяйствах / А.В. Чернышов, И.В. Баскаков // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных

и специалистов (Россия, Воронеж, 27-28 марта 2014 г.). – Ч. III. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2014. – С. 66-70.

112. Штанько Р.И. Использование озона в сельскохозяйственном производстве: учебное пособие / Р.И. Штанько, Ю.А. Судник. – М.: Российский государственный аграрный заочный университет, 2004. – 93 с.

113. 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.

114. Эффективность применения озоновоздушной смеси при фумигации зернового точильщика / И.А. Пожидаев, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А. В. Химченко // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК: материалы национальной науч.-практ. конф. (Воронеж, 23 октября 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 50-55.

115. Aplicação de ozônio contra *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em milho armazenado / A. F. Rozado, L. R. D. Faroni, W. M. I. Urruchi, R.N.C. Guedes, J.L. Paes // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. – 2008. – Vol.12. – Pp.282-285. DOI: 10.1590/s1415-43662008000300009

116. Atkins P.W. Physical Chemistry for the Life Sciences / Atkins P.W., Julio de Paula. – 2006. – New York. – 642 p.

117. Chahal B.C. Effect of different level of grain moisture on viability of wheat seed / B. C. Chahal, M. Ramzan // Bull. Grain Technol. – 1986. – №1. – P. 11-12.

118. Conlisk A.T. Essentials of Micro- and Nanofluidics: With Applications to the Biological and Chemical Sciences / A.T. Conlisk. – 2013. – New York: Cambridge University Press. – 572 p.

119. Gammon R. Gaseous sterilization of food / R. Gammon, K. Kereluk // American Institute of chemical engineers Sump. – 1973. – Vol.132. – Pp.91-99.

120. Grain disinfestation with ozone-air mixture / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference "Environmental Problems

of Food Security"(Russia Voronezh, 21–22 february 2022). – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012037. – DOI:10.1088/1755-1315/1043/1/012037.

121. Hochberg Y. Multiple Comparison Procedures / Y. Hochberg, A.C. Tamhane. – New York, New Jersey: Wiley, 2011. – 450 p.

122. Hogg R.V. Engineering Statistics / R.V. Hogg, J. Ledolter. – New York: MacMillan, 1987. – 420 p.

123. Influence of ozone on germination and germinating energy of winter wheat seeds / V.N. Avdeeva [et al.] // Engineering for Rural Development series 17: proceedings 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2018. – P. 543-546.

124. Justification of using the ozonation process when manufacturing corn for the grain / P.C. Жданов [и др.] // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов (на иностранных языках) (Россия, Воронеж, апрель 2018 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – С 75-79.

125. Langmuir I., The Effect of Dissolved Salts on Insoluble Monolayers / I. Langmuir, V.J. Schaefer // Journal of the American Chemical Society. – 1937. – Vol. 59 (11). – Pp. 2400-2414. – DOI:10.1021/ja01290a091.

126. Modelling the ozone penetration in a grain layer / A. Steponavičienė, D. Steponavičius, A. Raila, A. Kemzūraitė // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2012. – Vol. 20(4). – Pp. 292-300. – DOI:10.3846/16486897.2011.645826.

127. Monteiro D.B.M. Fluid dynamic models of ozone application in stored maize / D.B.M. Monteiro, L.D.S. De. Alcantara // Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental. – 2024. – Vol. 28, №9. – DOI:10.1590/1807-1929/agriambi.v28n9e275829.

128. 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). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 422. – №012009. – 9 p. – DOI:10.1088/1755-1315/422/1/012009.

129. Stuke F. Sortenmishungen im Weizenanbau / F. Stuke, H. Fehrmann // Mitt. Biol. Bundensamst. Land-und Forstwirt. – Berlin: Dahlem, 1986. – Vol 232. – Pp. 134.

130. White G. D. Weight loss in stored wheat caused by insect feeding / G.D. Weight // Journal of Economic Entomology. – 1953. – Vol.46 (4). – Pp. 609-610.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Внедрение научных исследований в учебный и производственный процесс

РЕКОМЕНДОВАНО Учебно-методической комиссией агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, протокол от <u>11.09.2025</u> года № <u>1</u> Председатель <u>Костиков О.М.</u>	УТВЕРЖДАЮ Врио ректора ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» <u>Воронина А.А.</u> 
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 В.И. Оробинского, профессора А.М. Гиевского и членов учебно-методической комиссии агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ Д.Н. Афоничева, В.Г. Козлова составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований, выполненных на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ аспирантом Пожидаевым И.А. под руководством профессора Баскакова И.В., внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия». Результаты исследований используются при изучении обучающимися разделов дисциплины «Механизация и автоматизация технологических процессов в растениеводстве», связанных с хранением и дезинсекцией зерна. Кроме того, результаты научных исследований используются при чтении лекций и 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: <u>Афоничев Д.Н.</u> <u>Козлов В.Г.</u>	Представители кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ: <u>Оробинский В.И.</u> <u>Гиевский А.М.</u>

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный аграрный университет
имени императора Петра I»

Агионов А.Б.

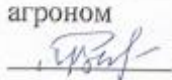
Акт о внедрении научно-исследовательской работы

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» подтверждает, что учебно-научно-технологическим центром «Агротехнология» при хранении зерна использован процесс озонной дезинсекции, рекомендованный аспирантом ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» Пожидаевым И.А.

Применение обоснованной дозы озонной обработки на уровне $4000 \text{ мин} \cdot \text{мг}/\text{м}^3$ позволило обеспечить полную сохранность от амбарного долгоносика и зерновой моли на протяжении всего срока хранения.

Учитывая важность проблемы, обеспечения сохранности зерна считаем целесообразным дальнейшее внедрение в производство результатов научных исследований по совершенствованию технологического процесса озонной дезинсекции зерна, опубликованных аспирантом Пожидаевым И.А. в различных научных изданиях, а также приведённых в рукописи его диссертационной работы.

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
 Орбинский В.И.



Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

КФХ «Виктория» подтверждает, что аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» Пожидаев И. А. предоставил предприятию результаты научного исследования по совершенствованию технологического процесса озонной дезинсекции зерна и разработке технического средства для его реализации

Комплекс проектируемых мероприятий предполагает применение озонной дезинсекции зерна в период хранения. Обоснованная доза озонной обработки свыше $4000 \text{ мин} \cdot \text{мг/м}^3$ позволяет обеспечить полную сохранность зернового материала от амбарных долгоносиков, рисовых долгоносиков, булавоусых хрущаков, зерновых точильщиков и зерновой моли. При этом реализация данной технологии также обоснована в конструкции для хранения зерна и семян зерновых культур и защищена патентом РФ на полезную модель №230414 «Устройство для хранения зерна и семян сельскохозяйственных культур».

Учитывая важность проблемы, снижения заражённости зернового вороха, считаем целесообразным в дальнейшем приобретение озонирующего оборудования и внедрение в производственный процесс при послеуборочной обработке и хранении зерна. При обосновании режимов работы озонаторной установки рекомендуем использовать результаты исследований аспиранта Пожидаева И.А., которые опубликованы в различных научных изданиях и рукописи его диссертационной работы.

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.

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**

Группа компаний «KOBLIK GROUP» в лице ООО «Воронежсельмаш», подтверждает, что на основе проведенных научных исследований аспирантом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ И.А. Пожидаевым обоснованы и предоставлены предприятию практические рекомендации по совершенствованию технологического процесса озонной дезинсекции зерна и разработке технического средства для его реализации. Предложенная автором конструкция имеет признаки интеллектуальной собственности, что подтверждается полученным вузом патентом РФ на полезную модель №230414 «Устройство для хранение зерна и семян сельскохозяйственных культур». Аспирантом И.А. Пожидаевым была аргументирована необходимость применения озонной дезинсекции зерна в период хранения с дозой озонной обработки свыше 4000 мин·мг/м³ при концентрации озона в озонородной смеси до 5 мг/м³. Использование озонородной смеси при рекомендуемых режимах дезинсекции зернового материала обеспечивает 100% эффективность при борьбе с амбарным долгоносиком, рисовым долгоносиком, булавовусым хрущак, зерновым точильщиком, зерновой молью.

Полученные результаты научных исследований аспирантом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ И.А. Пожидаевым предприятия сельхозмашиностроения консорциума «KOBLIK GROUP», в частности ООО «Воронежсельмаш», использует при разработке и проектировке инновационных хранилищ силосного типа.

Технический директор



Р.Н. Карпенко

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Наградная документация

