

На правах рукописи



ПОЖИДАЕВ Илья Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОЗОННОЙ
ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

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

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

Официальные оппоненты: **Оськин Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой электрических машин и электропривода;

Мануйленко Александр Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», старший преподаватель кафедры электрооборудования и электротехнологий в АПК.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО ВГУИТ).

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=12699>.

Автореферат разослан 31 октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. Данный процесс осложняется тем, что зерновой материал подвержен влиянию вредителей. В период своей 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. Традиционный способ борьбы с насекомыми основан на применении химических технологий обеззараживания зерна. Однако их применение несет множество негативных последствий для здоровья человека и окружающей среды. 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. Трехатомная модификация кислорода является мощным антимикробным газом, поэтому он может быть использован при дезинсекции зерна. 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.

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. Саед, И.В. Баскаков, Н.Д. Романенко, М.А.М. Осман, А.А. Смирнов, A.F. Rozado, J.L. Paes 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 зерновки, 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 озонозовоздушной 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 озонозовоздушной 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 озонозовоздушной 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 озонозовоздушной 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.

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 про-граммы 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе «Анализ способов дезинсекции зерна и обоснование применения озонной обработки при борьбе с зерновыми вредителями» рассмотрены современные спосо-

бы дезинсекции зерна посредством термической обработки, фумигации, протравливания и т.д. Установлено, что данные технологии имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение по сравнению с озонной дезинсекцией зерна, обладающей высокой эффективностью, экономичностью и экологичностью при дозах озона до 28,8 г·с/м³ и имеющейся перспективой смягчения режимов озонной обработки за счёт последствий воздействия газа на зерновых вредителей.

Во втором разделе «Теоретические основы озонной дезинсекции зерна» проведённый обзор теоретических исследований по озонной обработке зернового материала показал, что на данный момент целостной теории, описывающей процесс взаимодействия озона с зерновым ворохом и вредителями, нет.

Процесс поглощения озона рассматривался со стороны диффузионных процессов применительно к адсорбции и абсорбции разбавленного растворенного вещества поверхностью или границей раздела в растворе.

Используя закон Фика, можно получить математическое выражение для диффузионного потока или скорости диффузии v_d , рассчитываемых как количество вещества на единицу площади за единицу времени:

$$v_d = -K_D \frac{dC_{\text{пор}}}{dx}, \text{ мг/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пор}}$ – концентрация молекул озона в порах зерна, мг/м³; K_D – коэффициент диффузии абсорбера, м²/с.

Градиент концентрации ($-dC_{\text{пор}}$), характеризующий изменение содержания озона в порах зерна, будет являться движущей силой одномерной диффузии при проникновении. В конечных величинах выражение имеет следующий вид:

$$v_d = 4K_D \frac{C - C_{\text{пор}}}{d_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр зерна, мм; C – концентрация озона в озоновоздушной смеси, мг/м³.

Применение второго закона Фика дает возможность предсказывать, каким образом диффузия приводит к изменению концентрации озона со временем:

$$C(x, t) = \frac{\rho_o \cdot \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi \cdot K_D \cdot t}} e^{-\frac{x^2}{4K_D \cdot t}}, \quad (3)$$

где ρ_o – парциальная плотность озона, мг/м³; t – время обработки, с; V – общий объем зерна, м³; S – площадь поверхности зерна, м².

Рассматривая концентрацию в смеси при $x = 0$, которая зависит только от времени и концентрацию в порах при $x = d_{\text{ср}}/4$ после преобразований получили уравнение скорости диффузии в следующем виде:

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

Если применить понятие коэффициента скважистости зернового вороха $k_{\text{СКВ}} = V_{\text{ЗМ}}/V$ и понятие коэффициента геометрии $k_f = S/V_{\text{ЗМ}}$, где $V_{\text{ЗМ}}$ – объем зерновой массы, (м³), после преобразований можно получить следующее уравнение изменение концентрации при заполнении пор в объеме:

$$v_{V_d}(t) = 4k_f \cdot k_{\text{СКВ}} \cdot K_D \frac{C(t) \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D \cdot t}} \right)}{d_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

Таким образом, фактическая скорость диффузии, отнесённая к объёму зерна, с учётом скважистости и соотношения площади поверхности к объёму одного зёрна, зависит от ряда

факторов: концентрации озона в озоновоздушной смеси, которая может меняться со временем, коэффициента диффузии K_D и средних размеров зёрен или семян.

Коэффициент диффузии K_D характеризует способность зёрен поглощать озон через поверхность. При нормальных условиях хранения данная величина, зависящая от температуры, может считаться постоянной.

Способность зёрен поглощать озон не бесконечна и может зависеть от количества пор, площади поверхности зерна и его химического состава, что может характеризоваться константой поглощения K или её остаточной величиной.

Считая, что константа поглощения представляет собой среднюю концентрацию озона на единицу объёма зерна, считать её постоянной величиной возможно только относительно, поскольку она зависит от внешней концентрации озона в межзерновом пространстве. Тогда с учетом коэффициента пористости зерна $k_{\text{пор}} = V_{\text{пор}}/V_{\text{зм}}$, представляющем отношение объема пор $V_{\text{пор}}$ к объёму зерновой массы $V_{\text{зм}}$, зависимость от времени константы поглощения составит:

$$K(t) = k_{\text{пор}} \cdot k_{\text{скв}} \cdot C(t). \quad (6)$$

Скорость при полном заполнении пор в семенах не будет равна нулю, так как присутствует процесс разложения озона. Если известна скорость разложения озона $v_{\text{ор}}$, то

$$\frac{dK}{dt} = -v_{V_d} + v_{\text{ор}} = -4k_f \cdot k_{\text{скв}} \cdot K_D \frac{C(t) \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{\text{cp}}} + v_{\text{ор}}. \quad (7)$$

Следовательно, на основании теоретического анализа получена зависимость скорости поглощения озона зерновым ворохом dK/dt от коэффициента геометрии k_f , коэффициента скважистости $k_{\text{скв}}$, среднего диаметра зерна d_{cp} , 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.

Процесс разложения обычно может быть описан экспоненциальным законом, тогда скорость разложения в порах зерна можно записать следующим образом:

$$v_{\text{ор}} = - \left(C(t) e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}(t_0+t)}\right)}{t_1} + v_{\text{кор}} \right), \quad (8)$$

где $K_{\text{ор}}$ – константа разложения озона, с^{-1} ; t_0 – время от начала процесса разложения, с ; t_1 – коэффициент приведения к единицам измерения времени, $t_1=1 \text{ с}$.

Скорость поглощения с учётом скорости разложения

$$\frac{dK}{dt} = -C(t) \left(4k_f k_{\text{скв}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{\text{cp}}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}(t_0+t)}\right)}{t_1} \right) - v_{\text{кор}}. \quad (9)$$

Решить такое уравнение в общем виде достаточно сложно, однако возможны численные решения для поиска величины K , представляющей фактическое количество поглощенного озона за истекший промежуток времени.

Константу разложения можно определить в некотором конечном объеме по уравнениям в дифференциальной форме или при переходе к конечным величинам:

$$K_{\text{ор}} = - \frac{\ln \left(\frac{v_{\text{кор}} \Delta t + \Delta C}{\Delta t \frac{C_{\text{cp}}}{t_1}} + 1 \right)}{t + t_0}, \quad (10)$$

где C_{cp} – среднее значение концентрации за время t , мг/м^3 ; ΔC – изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси, мг/м^3 ; Δt – конечный промежуток времени, для которого определяется изменение концентрации, с .

В условиях разложения озона, если в конце $v_{\text{кор}}$ будет стремиться к 0, а процесс разложения начинается сразу после появления газа, получаем следующее решение:

$$K_{\text{ор}} = -\frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta C}{C_{\text{сп}} \cdot \Delta t}\right)}{t}. \quad (11)$$

Основываясь на полученной зависимости, представляется возможным экспериментально определить константу разложения озона. Результаты такого определения позволяют подтвердить её постоянство и проверить гипотезу об экспоненциальном характере скорости разложения.

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

В полученной модели время начала процесса t_0 отделено от времени эксперимента t . Это достаточно важный момент, так как фактического времени начала процесса разложения мы не знаем. Процесс начинается в озонаторе с появлением озона, однако в это время концентрация озона, его температура и другие параметры, влияющие 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.

Численное значение константы разложения $K_{\text{ор}}$, значения условного начального времени разложения и скорости разложения в момент окончания процесса может быть определено при рассмотрении динамики процесса с помощью методов оптимизации. Для нахождения недостающих параметров была разработана имитационная модель в программе Simulink. В ходе числительного эксперимента с использованием нелинейной оптимизации были установлены ключевые показатели: константа разложения озона $K_{\text{ор}}$, время начала процесса t_0 , концентрация озона в озоновоздушной смеси в начале наблюдения C_0 и скорости разложения озона $v_{\text{кор}}$ в конце процесса, соответствующие данным 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. Константа разложения озона $K_{\text{ор}}$ и конечная скорость разложения озона $v_{\text{кор}}$ определяются исследуемыми процессами и не зависят от эксперимента, но могут иметь ошибку из-за ошибок измерений. Эти величины определялись как единые для всех экспериментов.

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

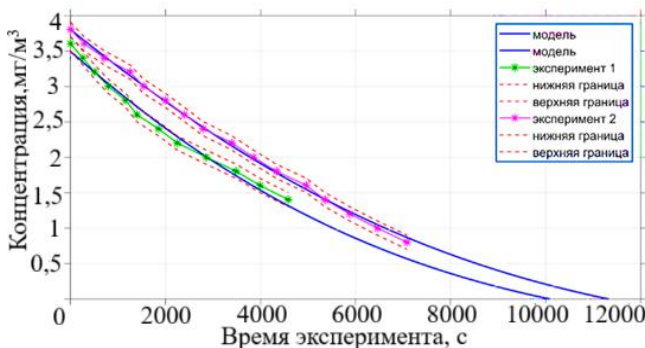


Рисунок 1 – Сравнение моделирования разложения озона в Simulink с экспериментальными данными

Графическое сравнение результатов моделирования и данных экспериментов представлено на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что рассчитанные по модели кривые хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Они практически полностью укладываются в диапазон, обусловленный экспериментальной погрешностью измерений. Полученная константа разложения $K_{\text{ор}}$ составляет $7,8947 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Это значение учитывает конечную скорость разложения озона $v_{\text{кор}} = 1,3903 \cdot 10^{-4} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Следовательно, результаты исследования адекватно описывают эмпирический характер процесса разложения, что позволяет использовать их для прогноза содержания остаточного озона в зерновой массе.

Для практического применения уравнения (8) и имитационной модели 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.

Начальные значения параметров t_0 и C_0 были определены описанным ранее методом для серии повторных экспериментов. Между величинами параметров t_0 и C_0 была найдена регрессионная зависимость

$$t_0 = 22991 - 2446,2C_0. \quad (12)$$

Статистический анализ показал, что коэффициенты регрессии имеют расчетный уровень значимости по критерию Стьюдента не выше 0,036 %, при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,936$, скорректированном коэффициенте детерминации $R_{\text{кор}}^2 = 0,923$ и критерии Фишера $F_{\text{расч}}$, составляющем 73,1 с уровнем значимости $3,605 \cdot 10^{-04}$.

Полученные параметры модели разложения позволяют вернуться к уравнению 8 и в случае разложения озона в порах получить зависимость для коэффициента диффузии, которая может быть описана следующим выражением:

$$K_D = - \frac{d_{\text{cp}}^2}{64t \ln \left(\frac{t_1 (v_{\text{кор}} + v_{\text{оп}})}{C(t) (e^{-K_{\text{оп}}(t+t_0)} - 1)} \right)}. \quad (13)$$

В данном случае входящая в уравнение концентрация – это внешняя для зерна концентрация, при которой прекратилось насыщение и начался процесс разложения и выхода озона из зерновой массы. Также это уравнение включает скорость разложения – это скорость разложения в условиях отсутствия внешнего нагнетания озоновоздушной смеси, т.е. определяемая по зависимости 8, исходя из концентрации насыщения озоном зерновой массы. Применение полученного уравнения для определения коэффициента диффузии экспериментальным путем сопряжено с рядом сложностей, поэтому больший интерес представляется при рассмотрении потока озона в озоновоздушной смеси.

Если все величины, входящие в зависимость (6) известны, то имеется возможность определить 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 концентрации озона в озоновоздушной смеси вдоль потока будет определяться его поглощением и скоростью потока. Скорость потока определяет время контакта озоновоздушной смеси с зерном. Учитывая полученные взаимосвязи и параметры потока, количество поглощаемого озона в единицу времени $K_{\text{погл}}$ связано с изменением концентрации озона в озоновоздушной смеси $C(t)$ и может быть смоделировано системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{поток}} \frac{dK_{\text{погл}}}{dx} &= C(x, t) \left\{ 4k_f k_{\text{свб}} K_D \frac{1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{\text{cp}}} + e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{cp}}}{4}\right)^2}{4K_D t}} \frac{(1 - e^{-K_{\text{оп}}(t_0+t)})}{t_1} \right\} + v_{\text{кор}} \\ C(x, t) &= C(t) - K(x, t) \frac{x}{v_{\text{поток}}} \\ t &= t_{\text{тек}} - \frac{x}{v_{\text{поток}}} \\ dt &= dt_{\text{тек}} \\ v_{\text{поток}} &= \frac{Q_{\text{поток}}}{S_{\text{масс}} (1 - k_{\text{свб}})} \\ t_0 &= 22991 - 2446,2C_0 \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где $S_{\text{масс}}$ – площадь поперечного сечения озонируемой массы, м^2 ; $v_{\text{поток}}$ – скорость потока, м/с ; $Q_{\text{поток}}$ – объемный расход озоновоздушной смеси, $\text{м}^3/\text{с}$; $t_{\text{тек}}$ – текущее время моделирования, с ; x – расстояние от места подачи до интересующего сечения потока, м^3 .

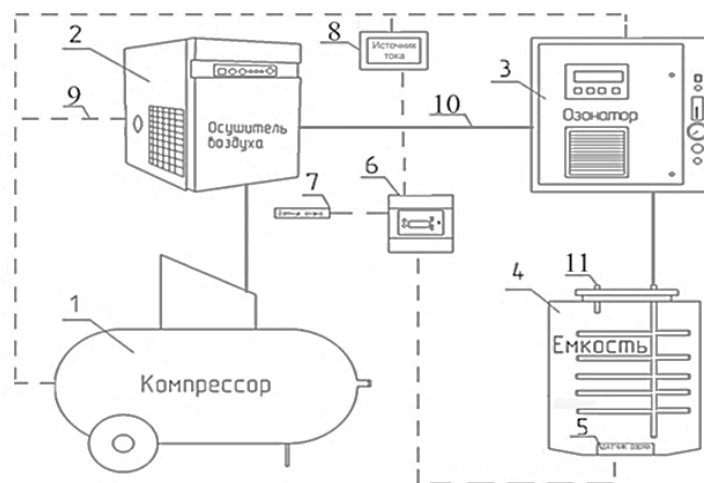
Решение данной системы алгебраических и дифференциальных уравнений позволяет определить концентрацию озона в озоновоздушной смеси $C(x, t)$ в разных точках потока с учетом поглощения и разложения озона, а её интегрирование позволяет получить дозу обработки, которая достанется вредителям в конкретном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

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 $K_{\text{погл.}}$, 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, достигающую зерновым вредителям.

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена программа экспериментальных исследований, описаны используемые приборы и оборудование, а также методика получения экспериментальных данных и их обработки.

Программа экспериментальных исследований включала проектирование лабораторной установки, позволяющей провести эксперимент по озонной обработке зерна и насекомых; разработку программы ЭВМ для обработки результатов экспериментов по озонной дезинсекции зерна; выявление константы разложения озона; определение влияния озонной обработки на вредителей зерна и микрофлору зернового материала.

Экспериментальную часть исследований по озонной обработке зерна и вредителей, а также определению константы разложения проводили на разработанной лабораторной установке (рис. 2).

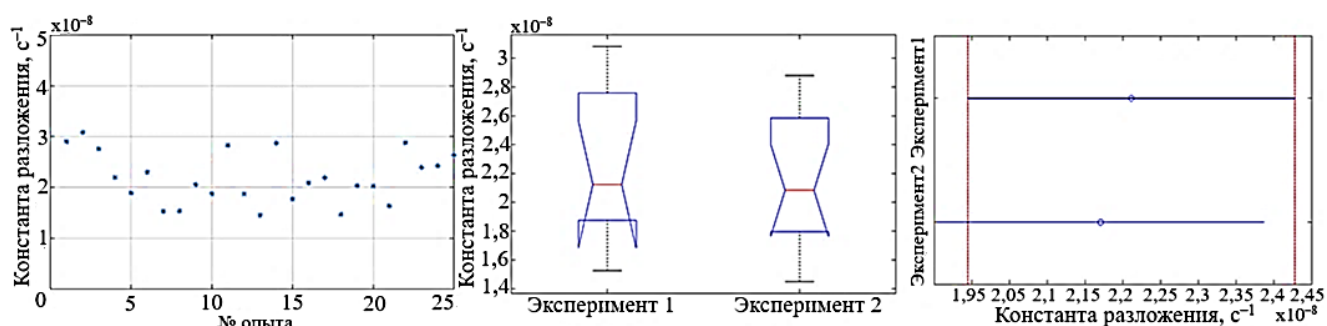


1 – компрессор; 2 – осушитель воздуха; 3 – озонатор; 4 – ёмкость; 5 и 7 – датчик озона; 6 – газоанализатор; 8 – источник питания; 9 – электрический кабель; 10 – газозвушная магистраль; 11 – предохранительный клапан

Рисунок 2 – Схема лабораторной установки для озонирования зерна и вредителей

Для автоматизированного учета и обработки массива экспериментальных данных, получаемых в процессе исследований по озонной дезинсекции зерна, разработан алгоритм программы для ЭВМ, позволяющий обрабатывать результаты исследований при дезинсекции зерна озоновоздушной смесью, получать кривые распределения и статистические данные, автоматизировав и упростив обработку данных.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований озонной дезинсекции зерна» определена константа разложения озона и проведён статистический анализ полученных результатов исследования, который представлен на рисунке 3.



I - Точечная диаграмма разброса значений константы разложения озона II - Коробчатая диаграмма статистического сравнения результатов в экспериментах III - Результаты многократного сравнения средних в экспериментах

Рисунок 3 – Статистическое сравнение экспериментальных данных при определении константы разложения

По результатам полученных данных установлено, что предложенный в теоретических исследованиях экспоненциальный закон разложения озона $K_{\text{ор}} = -(\ln(1 + \Delta C / C_{\text{ср}} \cdot \Delta t) / t)$ при данных условиях достаточно точно описывает стадию процесса озонирования. При общей обработке данных экспериментов поскольку теоретически установлена конечная скорость разложения озона $v_{\text{кор}} = 1,3903 \cdot 10^{-4} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ значение константы разложения составит $7,8947 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$.

В процессе выполнения диссертационной работы было разработано устройство, обеспечивающее эффективное и безопасное хранение зернового материала, отличающееся тем, что на высоте каждого яруса оно дополнительно снабжено датчиками зараженности зерна (рис. 4).



Рисунок 4 – Схема устройства для хранения зерна и семян зерновых культур

На разработанную конструкцию получен патент РФ на полезную модель №230414. Технологическая схема устройства для хранения зерна и семян зерновых культур позволяет значительно улучшить качество мониторинга зернового материала и эффективность озонной дезинсекции. В рамках расширения возможностей обнаружения вида насекомого была разработана более прогрессивная конструкция устройства для хранения зерна, защищенная патентом РФ на полезную модель №219219, отличительной особенностью которого является функциональная возможность постоянного визуального мониторинга зараженности зерна. Данная конструкция может быть использована в качестве перспективы в

дальнейших исследованиях совершенствования озонной дезинсекции зерна.

Результаты экспериментального исследования по озонной дезинсекции зерна представлены в таблице 1.

Статистическую обработку полученных результатов экспериментальных исследований проводили с использованием разработанной программы для ЭВМ, имеющей свидетельство о государственной регистрации №2023611221. Функционал пакета программы позволяет в автоматическом режиме рассчитать параметры математического ожидания μ и стандартного отклонения σ для каждого эксперимента по озонной дезинсекции зерна, а затем рассчитывать необходимую дозу озонной обработки, при которой будет уничтожен определенный процент вредителей от количества насекомых из обратной функции от вероятности:

$$D(P_{\text{иск}}) = F^{-1}(P_{\text{иск}} | \mu, \sigma), \quad (15)$$

где $D(P_{\text{иск}})$ – необходимая доза озонной обработки для искомой вероятности, $\text{мг} \cdot \text{мин} / \text{м}^3$.

Полученные закономерности эффективности озонирования от дозы озонной обработки при дезинсекции зерна от различных вредителей с отдельными характеристика математического ожидания и стандартного отклонения представлены на рис. 5.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по озонной дезинсекции зерна

Вредитель	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
Амбарный долгоносик	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
Рисовый долгоносик	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
Булавоусый хрущак	200	3,86	811	14	16
	280	4	1200	16	24
	370	4,36	1612	30	40
	460	4,35	2002	40	100
Зерновой точильщик	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
Бабочки зерновой моли	130	4,66	558	60	60
	180	4,09	735	70	80
	250	4,28	1070	90	100
	290	4,22	1222	100	100
Гусеницы зерновой моли	600	4,19	2511	40	40
	720	4,21	3033	60	70
	770	4,24	3263	80	80
	830	4,25	3525	90	100

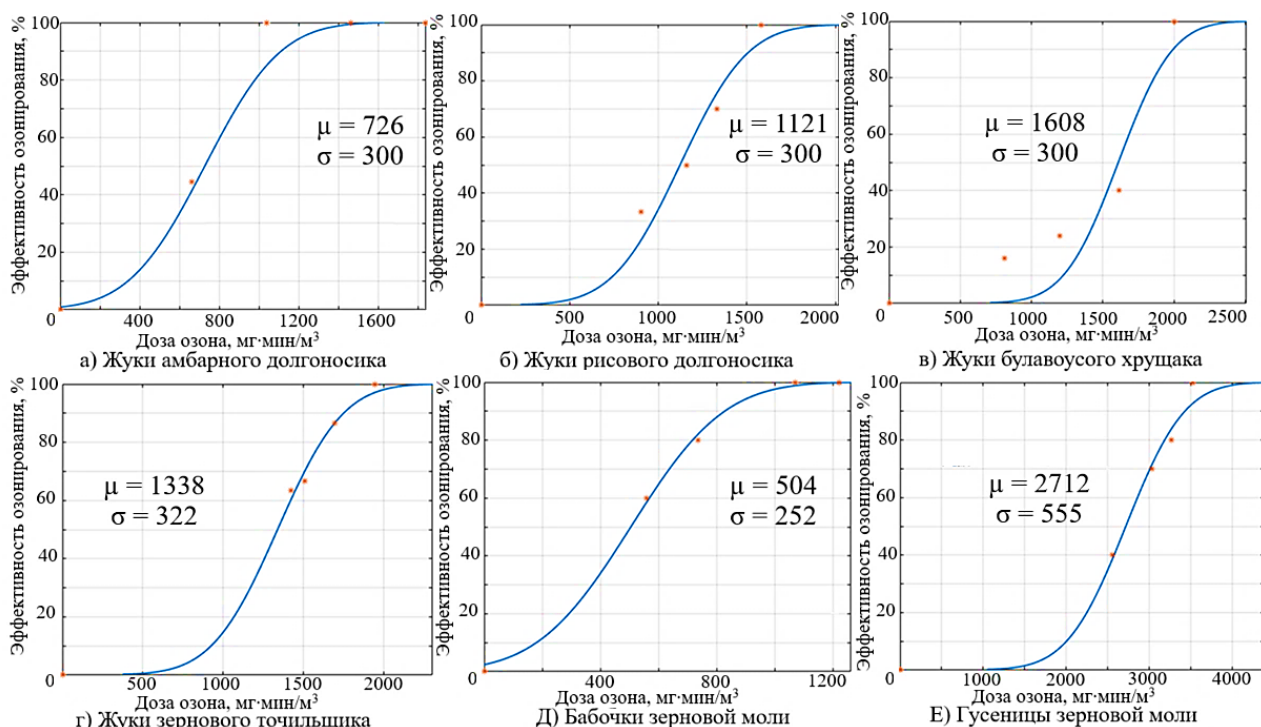


Рисунок 5 – Статистическая обработка результатов исследований при определении эффективности озонной дезинсекции зерна в зависимости от дозы озонной обработки

Из рис. 5 следует, что при озонной дезинсекции зерна с учетом полученных параметров математического ожидания μ и стандартного отклонения σ для полного уничтожения жуков амбарного долгоносика требуемая доза озонной обработки составляет 1420 мг·мин/м³, для жуков рисового долгоносика – 1819 мг·мин/м³, для жуков булавоусого хрущака –

1582,2 мг·мин/м³, для жуков зернового точильщика – 2306 мг·мин/м³, для бабочек зерновой моли – 1091 мг·мин/м³, для гусениц зерновой моли – 4006 мг·мин/м³.

Результаты фитопатологического анализа зерна пшеницы по влиянию озонной обработки на микобиоту представлена в таблице 2.

Таблица 2 – 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

Статистическая обработка результатов экспериментального исследования по влиянию озонной обработки на микобиоту зерна пшеницы позволила получить закономерность эффективности озонирования от дозы озонной обработки (рис. 6).

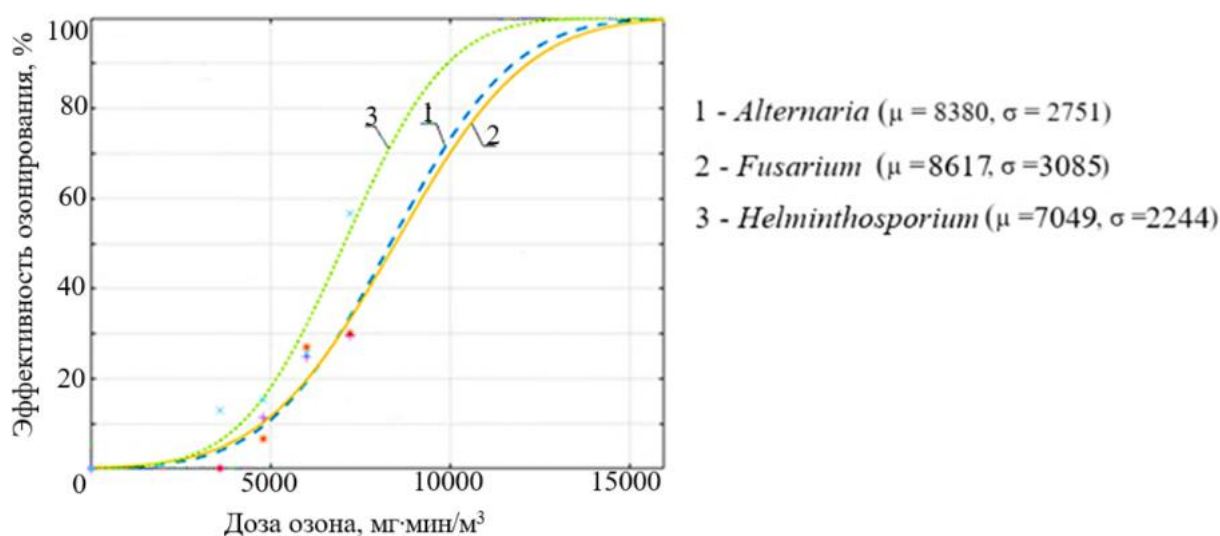


Рисунок 6 – Эффективность озонирования зерна от грибов рода *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium*

При анализе рис. 6 с учетом полученных параметров математического ожидания μ и стандартного отклонения σ установлено, что доза озонной обработки для полного уничтожения грибов рода *Alternaria*, *Fusarium*, *Helminthosporium* составит 14782, 15795, 12270 мг·мин/м³ соответственно.

В пятом разделе «Оценка экономической эффективности применения озонной дезинсекции зерна» приведён расчёт экономической эффективности применения озонной дезинсекции зерна в сравнении с химической обработкой вредителей пестицидами. В результате экономической оценки установлено, что при совершенствовании зернохранилища вместимостью 1000 тонн зерна при капитальных вложениях 940800 рублей, срок окупаемости применения озонной дезинсекции зерна составит 2,8 года, а годовой экономический эффект порядка 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 г·с/м³ и имеющихся перспектив снижения режимов озонной обработки за счёт последствий воздействия газа на зерновых вредителей.

2. Полученная система алгебраических и дифференциальных уравнений для определения концентрации озона в озонозвоздушной смеси учитывает количество поглощаемого

озона в единицу времени, константу разложения озона, параметры озонородной смеси, коэффициенты диффузии, геометрии, скважистости и позволяет определить дозу озонной обработки, достающуюся зерновым вредителям.

3. Разработанная компьютерная программа (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611221) обеспечивает автоматизацию обработки результатов исследований по дезинсекции зерна озонородной 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 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.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. 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.

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

3. Теоретические аспекты взаимодействия озона с зерном / **И.А. Пожидаев**, А. Д. Головин, И.В. Баскаков [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 90-101. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-90-101.

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

5. 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.

Патенты на полезные модели

6. Патент РФ на полезную модель №219219 U1, МПК A01F 25/14 (2006/01). Устройство для хранения зерна / **И.А. Пожидаев**, И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.В. Чернышов, А.С. Корнев, А.В. Лощенко, А.Д. Головин (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – №2023107027; заявлено 23.03.2023; опубл. 05.07.2023. Бюл. №19. – 5 с.

7. Патент РФ на полезную модель № 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, А.Д. Головин, А.В. Химченко, А.В. Лощенко (РФ); патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024131756; заявлено 23.10.2024; опубл. 03.12.2024. Бюл. №34. – 4 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

8. 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.

Публикации в материалах конференций, научных журналах и сборниках научных трудов

9. Эффективность применения озоновоздушной смеси при фумигации зернового точила / **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.

10. 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. (Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2023. – С. 24-31.

11. К вопросу применения озоновоздушной смеси при дезинсекции вредителей зерна / **И.А. Пожидаев**, А.Д. Головин, В.В. Кочергин [и др.] // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 24–25 ноября 2020 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – С. 186-191.

12. 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.

13. 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.

14. Влияние озонной обработки на скорость убыли массы стелей / 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. Снижение зараженности зерна вредителями на этапе уборки за счет установки на ветра комбайна озонатора / **И.А. Пожидаев**, В.И. Оробинский // Молодежный вектор разви-

тия 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.

16. **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.

17. 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.

18. 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. I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. – С. 200-205.

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

Подписано в печать 17.10.2025 г. Формат 60x80¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №27757.

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