

На правах рукописи



САЛАПИН ИЛЬЯ МИХАЙЛОВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОТРАВЛИВАТЕЛЯ СЕМЯН

Специальность 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ).

Научный руководитель:

Костенко Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дринча Василий Михайлович,

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»,

профессор кафедры «Технологические системы АПК»

Хасанов Эдуард Рифович,

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», декан факультета механики и цифрового инжиниринга

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)

Защита состоится «1» декабря 2026 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: <http://rgatu.ru/>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Федеральная программа развития агропромышленного комплекса России в период с 2017 по 2030 годы, была утверждена постановлением правительства РФ от 25 августа 2017 года N996. В технологиях возделывания полевых культур системы предпосевной обработки семян составляют одну из основных статей расходов, так как от этих операций зависит развитие растений, урожайность, энергозатраты и рентабельность всего производства. Важную роль в решении этих задач играют протравливатели семян.

В этой связи, создание конструкции протравливателя семян, способствующей повышению равномерности нанесения ядохимикатов на посевной материал, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Степень разработанности темы исследования. Равномерность нанесения ядохимикатов на посевной материал в процессе технологических операций является существенной проблемой. В данной области исследования проводили: Тарасенко А.П., Шатохин И.В., и другие. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования были посвящены различным аспектам предпосевной обработки семян. Среди ученых, внесших заметный вклад в эту область, можно выделить: Вялых В.А., Дринчу В.М., Зиганшина Б.Г., Мударисова С.Г., Нуруллина Э.Г., Салахова И.М., Суханову М.В., Хасанова Э.Р., Якупова А.М. и других.

Настоящая работа является частью плана НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2021– 2025 годы. Она посвящена теме «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве».

Цель исследования – повышение равномерности покрытия семян в протравливателе.

Задачи исследований:

1. Анализ существующих машин для обработки семян средствами защиты.
2. Исследование движения семян в барабане протравливателя.
3. Обоснование и уточнение параметров барабана протравливателя.
4. Оценка экономической эффективности модернизированного протравливателя на предпосевной обработке семян.

Объект исследований - процесс протравливания семян в протравливателе.

Предмет исследований - закономерности влияния параметров протравливателя на равномерность покрытия семян.

Научную новизну составляют:

- теоретические зависимости движения семян внутри барабана протравливателя;

- аналитические зависимости обоснования параметров протравливателя семян.

Теоретическая значимость заключается в получении зависимостей для определения параметров барабана протравливателя.

Практическая значимость работы заключается в обоснованных параметрах протравливателя семян.

Методы исследований. Методология исследований опирается на базовые принципы теоретической механики и сочетает компьютерное моделирование с математическим анализом. В работе использовалось сертифицированное оборудование, а результаты обрабатывались с помощью статистических методов. В ходе эксперимента применялись как апробированные, так и методики, разработанные на их основе. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием программных пакетов Python, ImageJ и Microsoft Excel. Исследования проводились и оценивались как в лабораторных, так и в полевых условиях в соответствии с действующими стандартами: ГОСТ 52777-2007, ГОСТ 53056-2008, ГОСТ 52778-2007, ГОСТ 13586.5-2015.

Положения, выносимые на защиту:

- научно-обоснованные и экспериментально подтвержденные параметры протравливателя семян;
- результаты экспериментальных исследований по протравливанию семян с применением протравливателя с обоснованными параметрами;
- технико-экономическая оценка эффекта применения протравливателя с обоснованными параметрами.

Достоверность результатов исследований. В ходе экспериментальной части работы были использованы стандартные методики, современное оборудование и установки, разработанные специально для данного исследования. Полученные выводы подтверждены как теоретическими расчетами, так и экспериментальными данными, сходимость теоретических и экспериментальных данных составляет 98%. Результаты диссертации согласуются с публикациями в авторитетных научных журналах и были успешно апробированы на всероссийских конференциях.

Реализация результатов исследования. Разработанный протравливатель семян с барабаном нашел свое применение на практике и успешно внедрен в технологическую линию подготовки семян к севу на предприятии ООО «Мир» Александро-Невского муниципального округа, Рязанской области.

Вклад автора. Автор активно участвовал в решении поставленной задачи, и его вклад состоит в следующем: постановка цели и задач исследований, проведение теоретических и экспериментальных исследований, систематизация и обобщение полученных данных, изготовление и тестирование опытного образца, научное обоснование параметров барабана, формулировании ключевых

выводов. Написание научных статей, участие в конкурсах и научных конференциях.

Апробация результатов. Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) доложены и обсуждены на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО РГАТУ (2023, 2024, 2025 и 2026 гг.).

Публикации. Четыре научных статьи опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, отражают основные результаты проведённого диссертационного исследования. Общий объем публикаций составляет 7,3 условных печатных листа, из которых доля автора – 3,6 условных печатных листа.

Состав и объем диссертационного исследования. Диссертация имеет следующую структуру: введение, пять основных разделов, заключение с обобщенными выводами. Работа представлена на 162 страницах и включает библиографический список из 144 источников, 13 приложений, а также 73 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

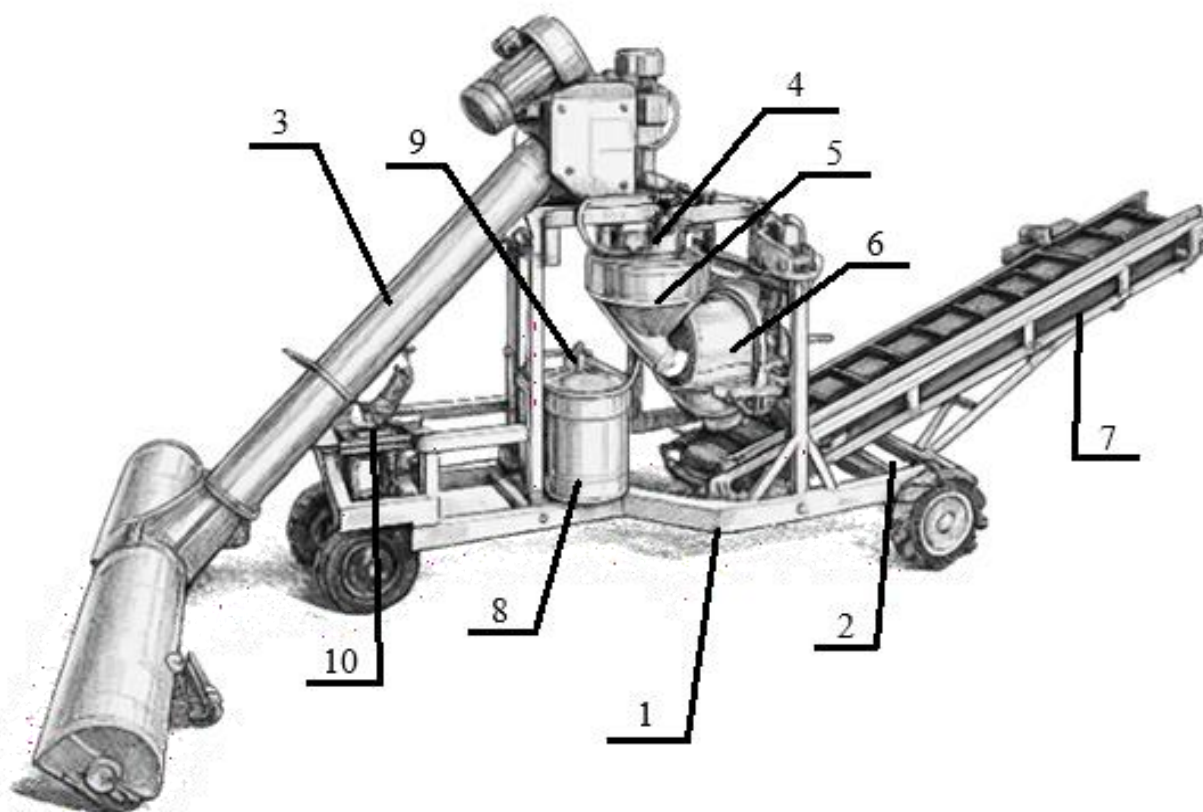
Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования. Отражены используемые методы, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также отражены степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» диссертационной работы проведён анализ существующего состояния проблемы предпосевной обработки семян зерновых культур, а также рассмотрены применяемые технологии защиты растений. Установлено, что качество обработки существенно зависит от равномерности покрытия каждой зерновки. Рассмотрены основные способы протравливания и средства защиты семян.

Обосновывается необходимость комплексного теоретического исследования, включающего изучение движения семян в барабане и оценку равномерности их покрытия.

Во второй главе «Теоретические исследования движения зерна в барабане» изложены вопросы обоснования конструктивно-технологической схемы барабанного протравливателя семян (рис. 1) и выполнен анализ движения зернового материала в барабане. Обоснованы параметры, обеспечивающие равномерное нанесение ядохимиката на семена и достижение необходимой производительности обработки.

Рассмотрены аспекты движения частицы (зерна) по внутренней поверхности вращающегося барабана (рис. 2).



1 - рама с колесами, 2 - механизм самопередвижения, 3 - загрузочное устройство, 4 - бункер семян, 5 - камера протравливания, 6 – барабан, 7 – прорезиненный ленточный транспортёр, 8 - резервуар ядохимикатов, 9 - дозатор ядохимикатов, 10 - поворотный механизм

Рисунок 1 – Модель протравливателя семян с вращающимся барабаном и ленточным устройством для выгрузки

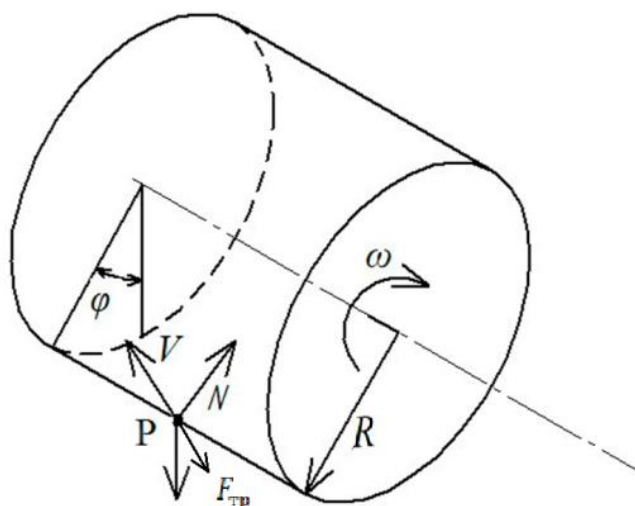


Рисунок 2 – Расчётная схема к определению условий движения частицы по цилиндрической поверхности

Применив метод кинетостатики, запишем уравнение движения частицы

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -mg \sin \varphi + F_{\text{тр}} \\ m \frac{V^2}{R} = -mg \cos \varphi + N \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса частицы;

V – окружная скорость;

R – радиус цилиндрической поверхности;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения;

N – сила нормального давления.

Предположив в начальный момент времени угол отклонения частицы $\varphi_0 = 0$ от положения равновесия, начальная окружная скорость V_0 , после интегрирования уравнения запишется в виде

$$V = \sqrt{e^{\frac{2k_T}{R^2}\varphi} \left(V_0^2 - \frac{2gR}{((\frac{2k_T}{R^2})^2 + 1)} \left[\left(\frac{2k_T}{R^2} \sin \varphi + \cos \varphi \right) + k_T \left(\sin \varphi - \frac{2k_T}{R^2} \cos \varphi \right) \right] \right) + \frac{2gR}{((\frac{2k_T}{R^2})^2 + 1)} \left[\left(\frac{2k_T}{R^2} \sin \varphi + \cos \varphi \right) + k_T \left(\sin \varphi - \frac{2k_T}{R^2} \cos \varphi \right) \right]} \quad (2)$$

где k_T – коэффициент трения;

g – ускорение свободного падения.

Построим график изменения скорости частицы, задавшись V_0 , R , от угла φ (рисунок 3).

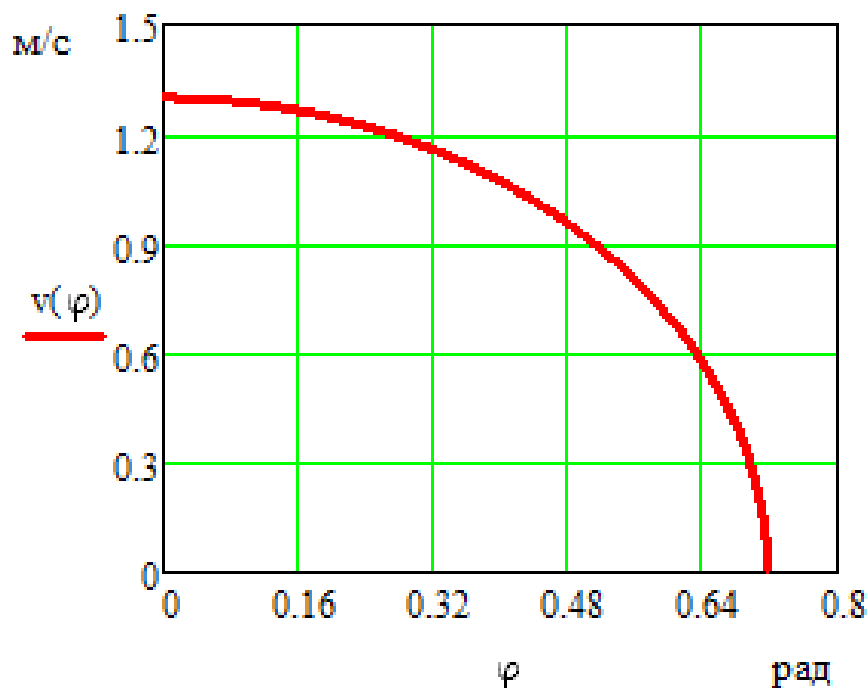


Рисунок 3 - График изменения скорости частицы от текущего угла в барабане

Анализ рисунка 3 показал, что с увеличением угла подъема частицы (зерна) скорость перемещения частицы снижается. Максимальная скорость

частицы определяется начальным углом подачи в барабан и меньше окружной скоростью барабана из-за проскальзывания.

Закон движения частицы в барабане определяется уравнением

$$\varphi = \frac{v_0}{\sqrt{gR}} \sin\left(\sqrt{\frac{g}{R}} t\right) \quad (3)$$

Построим в программе Mathcad график зависимости (4) учитывая, что частица будет смещаться на угол $\varphi_{\text{см}}$ за счет вращения барабана при заданных значениях k_T (рисунок 4).

$$\varphi = \varphi_{\text{см}} + \frac{v_0}{\sqrt{gR}} \sin\left(\sqrt{\frac{g}{R}} t\right) \quad (4)$$

Разработана теоретическая модель истечения семян из барабана через прямоугольные отверстия задней стенки. Пропускная способность вращающегося барабана через прямоугольные отверстия

$$Q_{\text{вых}} = 3600 \cdot \gamma \cdot \varphi \cdot nbh \cdot k_B \cdot \mu \sqrt{g \frac{bh}{(b+h)}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{вых}}$ — массовый расход истечения, т/ч; γ — насыпная плотность семян, т/м³; n — число отверстий, шт; b, h — ширина и высота одного отверстия, м; φ — коэффициент эффективной площади отверстий; k_B — коэффициент включённости отверстий в слой при вращении; μ — коэффициент истечения; g — ускорение свободного падения, м/с².

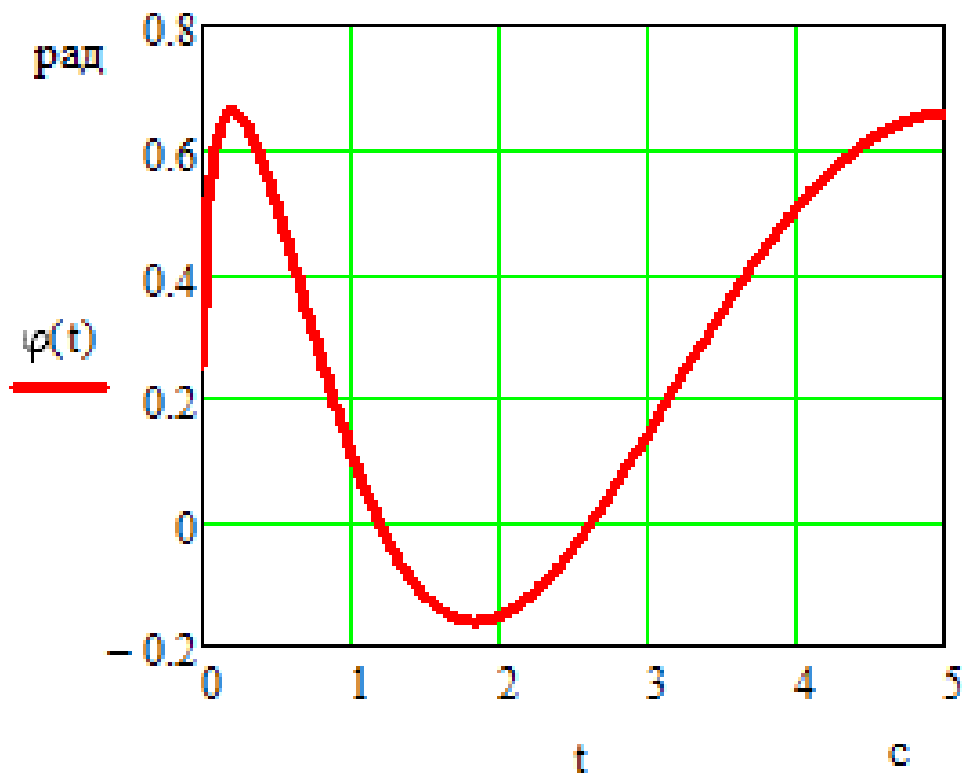


Рисунок 4 - Изменение угла подъема частицы (зерна) при движении вдоль барабана

На устойчивость истечения существенно влияют влажность семян (при увеличении влажности растут силы сцепления и внутреннего трения, уменьшается μ , а также эффективные φ и k_b), геометрия отверстия, режим вращения. Рассчитаем в программе Mathcad пропускную способность прямоугольных отверстий барабана с соотношением сторон 2:1 (рисунок 5).

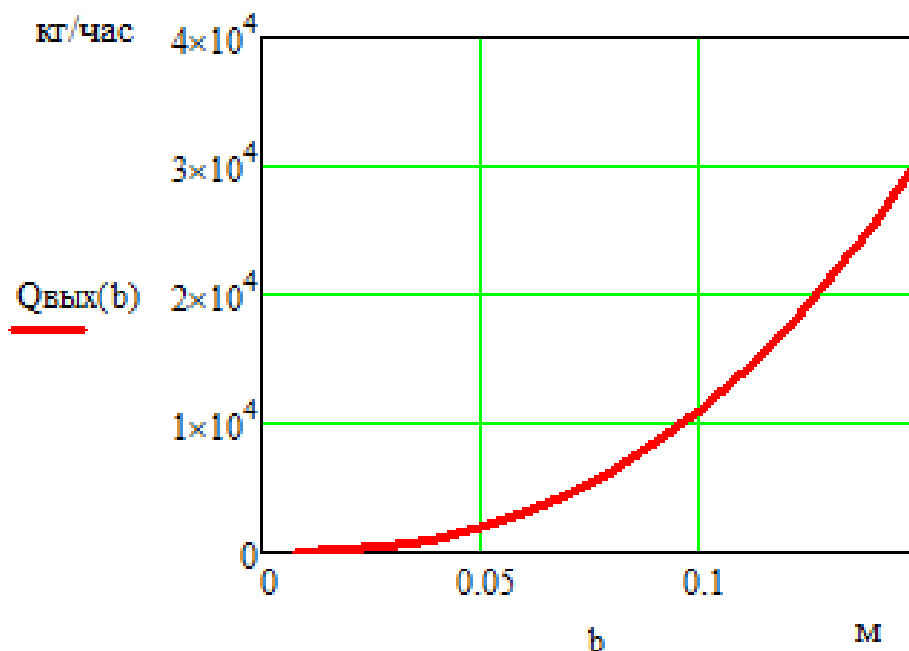


Рисунок 5 – График пропускной способности вращающегося барабана через прямоугольные отверстия

Таким образом, получены параметры барабана протравливателя, связывающие конструктивные показатели барабанного протравливателя с технологическими показателями качества и производительности, что служит основой для дальнейших экспериментальных исследований и практического внедрения устройства.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований протравливателя» изложена программа и методики экспериментальных исследований, направленных на обоснование параметров барабанного смесителя семян, а также на оценку его эффективности.

В методике проведения полевых исследований рассмотрены принципы экспериментального планирования, выбор размеров делянок, методы отбора проб и обеспечению сопоставимых условий для оценки развития растений и урожайности зерна. Описана технология уборки опытных площадей и учёта урожая.

В четвёртой главе «Результаты экспериментальных исследований транспортирующих и смесительных устройств протравливателя семян» представлены результаты комплексных экспериментальных исследований барабана протравливателя семян.

Для проведения эксперимента использовали следующее оборудование: барабан с возможностью регулирования частоты вращения, цифровой фотоаппарат Sony a58 для фиксации визуальных изменений на поверхности семян после каждого опыта. Снимки анализировали с помощью программы ImageJ с плагином Color Inspector 3D.

Данные опытов обрабатывали в программе Statistica v7. На основании данных было построено уравнение регрессии в виде полинома второй степени.

$$\Delta\P = 106 - 0,1626 * n_6 - 0,29 * \alpha - 0,0004 * n_6^2 + 0,0168 * n_6 * \alpha - 0,03 * \alpha^2 \quad (6)$$

где $\Delta\P$ – полнота покрытия семян ядохимикатом, %; n_6 – частота вращения барабана об/мин; α – угол наклона оси вращения барабана, град.

Наиболее значимым фактором для полноты покрытия является угол наклона оси вращения барабана (угол наклона барабана), который влияет на время нахождения семян в барабане. По уравнению регрессии был построен график зависимости полноты покрытия от частоты вращения и угла наклона барабана (рисунок 6).

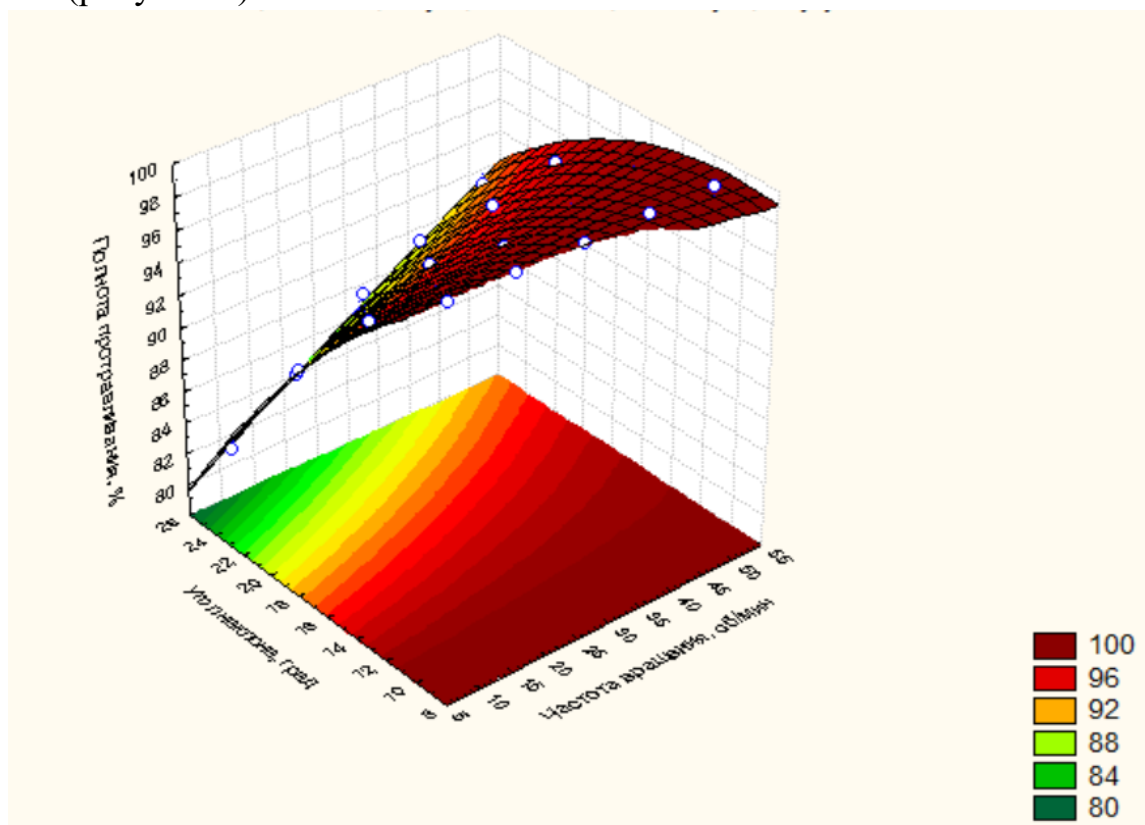


Рисунок 6 - График зависимости полноты покрытия от частоты вращения и угла наклона барабана

Анализ рисунка 6 показывает, что полнота покрытия близкая к 100% наблюдается при углах наклона барабана около 14 градусов.

Исследования влияния различных параметров барабана на повреждения семян при обработке позволили получить данные, на основе которых построено уравнение регрессии

$$\Delta T = 5,56 - 0,0314 * n_6 + 0,0009 * n_6^2 \quad (7)$$

где ΔT – повреждения семян в барабане, %; n_6 – частота вращения барабана об/мин.

Наиболее значимым фактором, влияющим на процент поврежденных семян, является частота вращения барабана, которая влияет на взаимодействия семян с барабаном. Также был построен график зависимости процента поврежденных семян от частоты вращения и угла наклона барабана (рисунок 7).

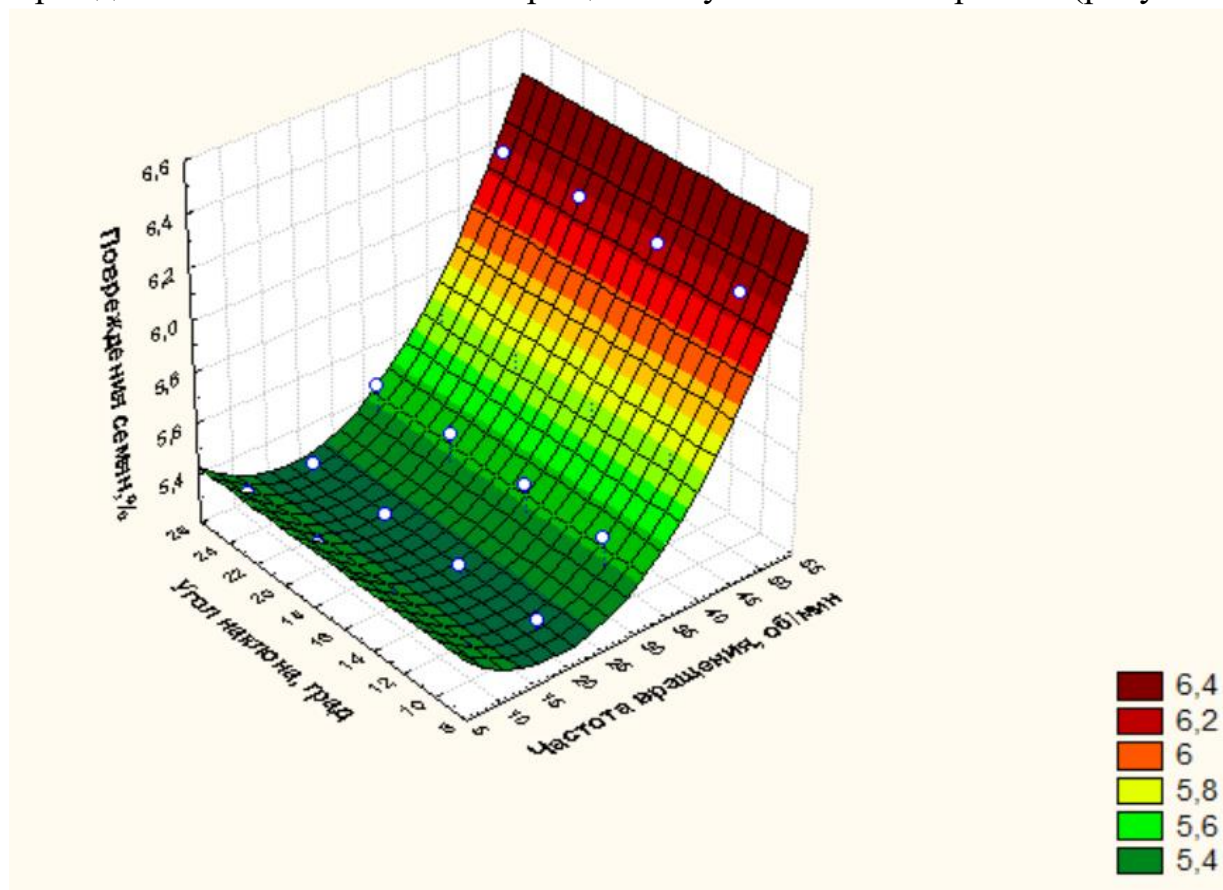


Рисунок 7 - График влияния частоты вращения и угла наклона барабана на процент поврежденных семян

Анализ рисунка 7 показывает, что минимальный процент поврежденных семян наблюдается при частоте вращения барабана не более 35 об/мин. Низкая частота вращения барабана снижает производительность протравливателя в целом, поэтому принимаем предельные значения частоты вращения 35 об/мин. Таким образом в результате многофакторного эксперимента установлено, что рациональными параметрами барабана протравливателя являются угол наклона оси вращения барабана 14 градусов, частота вращения барабана 35 об/мин.

Для оценки производительности барабана проведены измерения массового расхода семян при различных размерах разгрузочных отверстий, углах наклона и скоростях вращения, что позволило определить параметры, обеспечивающие производительность до 10 т/ч при экспериментальной обработке.

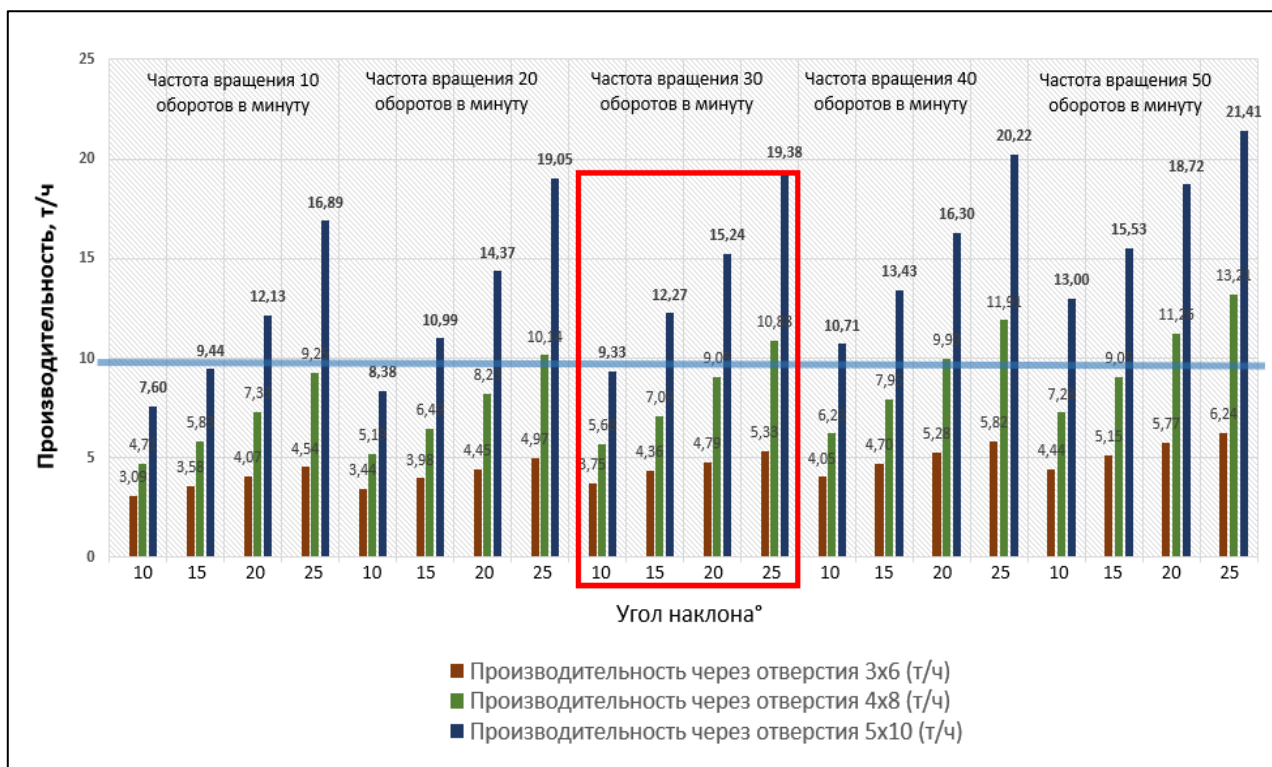


Рисунок 8 - Динамика производительности смесителя семян

Для достижения требуемой производительности (10 тонн в час) при обработке семян в барабане, определены следующие параметры:

- частота вращения барабана 35 оборотов в минуту;
- угол наклона барабана: от 14 до 15 градусов;
- размер выходных отверстий: 5x10 см.



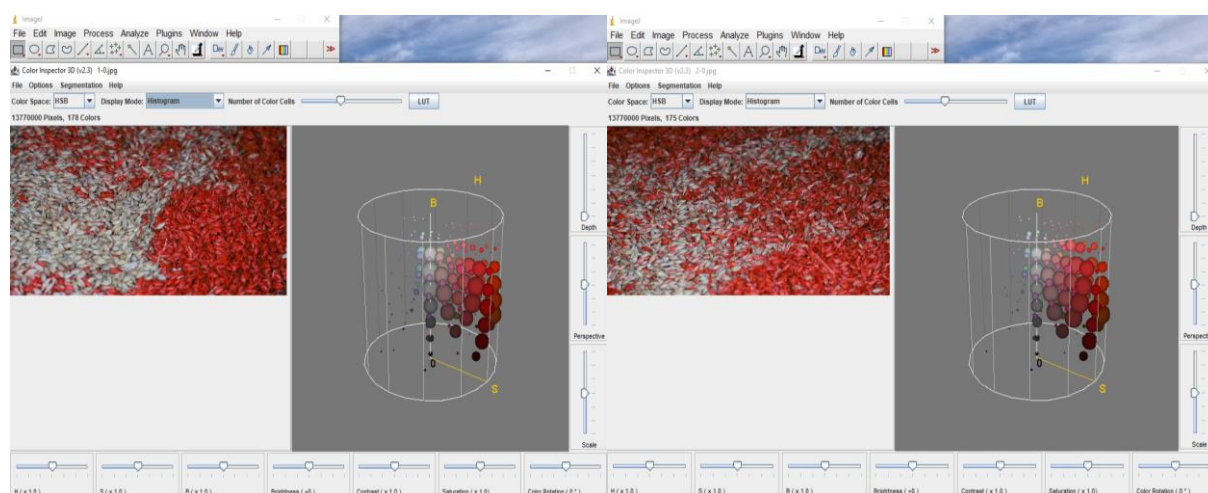
а



б

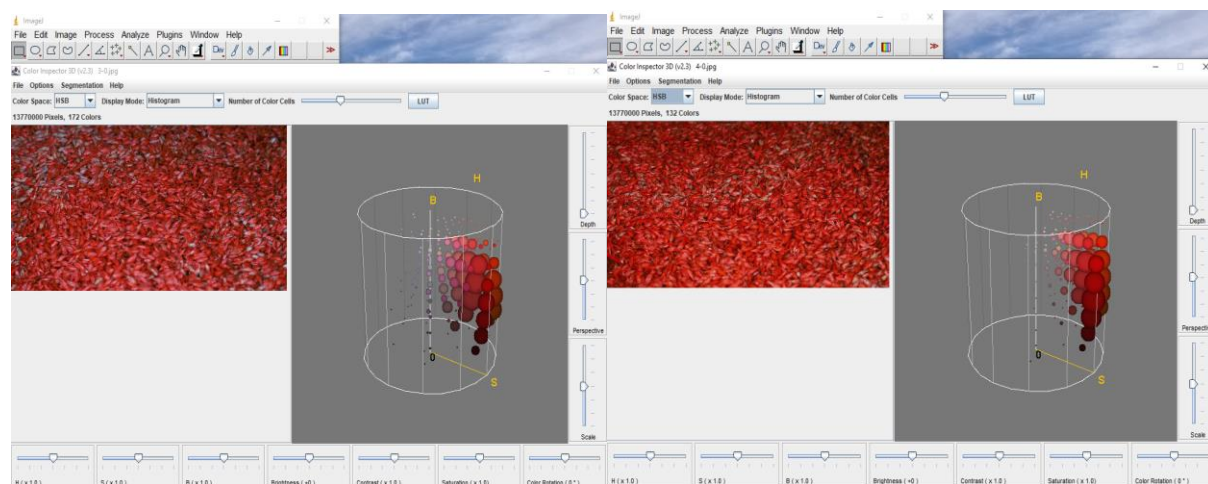
а –барабан; б – цифровой фотоаппарат со штативом;

Рисунок 9 – Общий вид оборудования для оценки нанесения ядохимиката



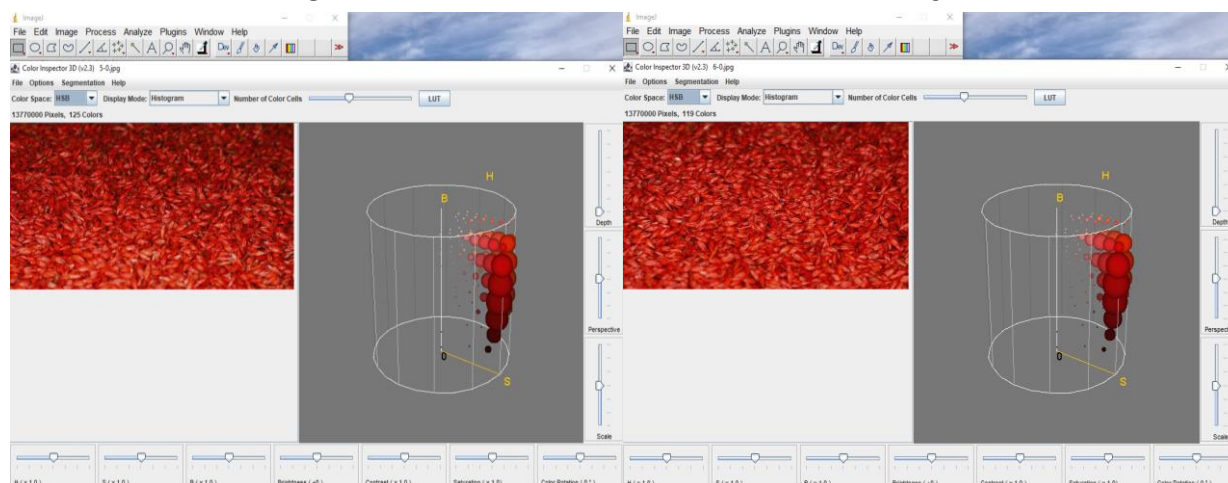
a

b



c

d



e

f

a - результат анализа фотографии сделанной после 1 оборота барабанного смесителя семян; b - результат анализа фотографии сделанной после 2 оборота барабанного смесителя семян; c - результат анализа фотографии сделанной после 3 оборота барабанного смесителя семян; d - результат анализа фотографии сделанной после 4 оборота барабанного смесителя семян; e - результат анализа фотографии сделанной после 5 оборота барабанного смесителя семян; f - результат анализа фотографии сделанной после 6 оборота барабанного смесителя семян.

Рисунок 10 - Обработка цифровых изображений в ImageJ

В методике цифрового фотометрического анализа рассмотрена полнота покрытия семян с использованием программы ImageJ, основанная на анализе цветовых характеристик, получаемых при обработке семян ядохимикатом с красным маркером.

Цифровой анализ изображений в ImageJ предлагает воспроизводимую и технологичную методику для работы с протравливанием семян. Система позволяет гибко настраивать параметры (скорость, время, загрузку, концентрацию), документировать результаты и сравнивать различные режимы. Объективный критерий цветовой однородности значительно снижает риск недопротравливания. Практическое преимущество также заключается в ярком красном маркере ядохимиката, который упрощает идентификацию обработанных семян и служит надежным индикатором равномерности нанесения при контроле качества.

Полевые испытания протравливателя с барабанным смесителем проведены на семенах ячменя сорта «Грейс». Полученные данные показали, что использование разработанного протравливателя обеспечивает повышение урожайности на 11,5% по сравнению с традиционным оборудованием ПС-10.



Рисунок 11 – Опытный образец протравливателя семян с барабанным смесителем

Производительность такого протравливателя составляет 10 тонн в час. Габариты составляют 4,5м в длину, 2м в ширину и 1,7м в высоту. Масса 420 килограммов. Максимальная потребляемая мощность 6,5кВт/ч. Емкость бака для рабочего раствора составляет 130 литров.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность предложенной конструкции с обоснованными параметрами барабана протравливателя семян.

В пятой главе «Экономическая эффективность применения модернизированного протравливателя семян» отражено, что применение опытного барабанного протравливателя по подготовке семян для площади сева

200 гектаров является экономически эффективным, и капитальные вложения окупятся примерно за 5 месяцев (табл. 1). Ежегодная экономическая выгода составит 1 032 800 рублей, или 51 640 рублей с одной тонны семян. Основным фактором, способствующим экономическому эффекту, является увеличение урожайности на 11,5%.

Таблица 1 - Результаты расчета экономической эффективности модернизированного протравливателя

Показатель	ПС-10	модернизированный протравливатель
Производительность, т/ч	10	10
Балансовая стоимость, <u>руб</u>	470000	390000
Затраты труда, <u>чел.ч/т</u>	0.2	0.2
Удельная энергоемкость, <u>кВт.ч/т</u>	0.65	0.65
Расход препарата, л/т	0.4	0.4
Годовой экономический эффект (посев 200га), <u>руб</u>	-	1 032 800
Экономический эффект на 1 тонну семян, <u>руб/т</u>	-	51640
Ожидаемый срок окупаемости капитальных вложений, мес.	-	5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ машин для протравливания семян показал, что, они не дают стопроцентного покрытия семенного материала защитными средствами. Предложено внедрение барабанных протравливателей для обеспечения равномерного покрытия семян ядохимикатом.

2. Получена теоретическая зависимость истечения семян через прямоугольные отверстия в задней части смесителя. Основные параметры смесителя: для достижения производительности около 10 тонн в час необходимы отверстия размером 0,05х0,10 метра, угол наклона барабана от 10 до 15 градусов при частоте вращения смесителя 35-40 оборотов в минуту.

3. В результате многофакторного эксперимента установлено, что параметрами барабана протравливателя являются радиус барабана 0,35 м, угол наклона оси вращения барабана 14 градусов, частота вращения барабана 35 об/мин.

4. Экспериментальными исследованиями для требуемой производительности (10 тонн в час) обработки семян в барабане получены следующие параметры частота вращения барабана 35 оборотов в минуту, угол наклона барабана: от 14-15 градусов, размер выходных отверстий: 0,05х0,10 м.

5. Сравнительный анализ и полевые исследования показали, что использование протравливателя семян с барабаном обеспечивает более равномерное покрытие защитными средствами. В результате урожайность увеличивается на 11,5% по сравнению с протравливателем ПС-10. Применение опытного барабанного протравливателя по подготовке семян для площади сева 200 гектаров является экономически эффективным, и капитальные вложения окупятся примерно за 5 месяцев. Ежегодная экономическая выгода составит 1 032 800 рублей, или 51 640 рублей с одной тонны семян.

Предложения производству

Для повышения эффективности протравливания семян необходимо применять барабанный протравливатель с планчатым резиновым транспортёром.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейшей перспективе научных исследований необходимо продолжить работу в направлении модернизации барабанных протравливателей с уточнением параметров и режимов работы с помощью искусственного интеллекта.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях рекомендованных ВАК РФ:

1. Костенко, М. Ю. Моделирование процесса смешивания семян в гладком вращающемся барабане на основе теории цепей Маркова / М. Ю. Костенко, И. М. Салапин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 210. – С. 375-393. – DOI 10.21515/1990-4665-210-037. – EDN SAKPWU

2. Костенко, М. Ю. Оценка качества протравливания семян в барабанном смесителе / М. Ю. Костенко, И. М. Салапин, М. Н. Чаткин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2025. – Т. 17, № 4(68). – С. 141-150. – DOI 10.36508/RSATU.2025.60.45.018. – EDN HFSSDK

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Заказ №1722 подписано в печать 29.09.2026 г.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический
университет*

имени П.А. Костычева»

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

*Отпечатано в издательстве учебной литературы и учебно-методических
пособий ФГБОУ ВО РГАТУ*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1