

На правах рукописи



ГОЛИКОВ АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПНЕВМОСЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МОЛОТКОВОЙ
ДРОБИЛКИ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Мезенов Артем Анатольевич

Официальные оппоненты: **Левин Алексей Михайлович**, доктор технических наук, генеральный директор, ООО «Еврогруп», г. Барнаул

Стрикунов Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Защита состоится «3» декабря 2025 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01 созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, а/я 463, телефон (факс): +7(383)348-12-09, e-mail: sibime@sfscs.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://www.sfscs.ru>, <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзыв на автореферат, оформленный установленным порядком просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета и e-mail: ds24121101@sfscs.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Иванников Алексей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время среди сельскохозяйственных производителей наблюдается повышенный спрос на малогабаритные комбикормовые заводы и агрегаты с пневматической загрузкой сырья. Это позволяет значительно сократить расходы на транспортировку сырья и перенастройку технологических линий для производства различных видов комбикормов. При эксплуатации малогабаритных комбикормовых заводов основными затратами являются расходы на техническое обслуживание и ремонт технологического оборудования, связанные с неполной подготовкой зерна к измельчению. Это обусловлено тем, что транспортирование, хранение в буртах и подача на переработку не предусматривает предотвращение попадания минеральных и металломагнитных примесей в зерно.

Таким образом, полная очистка зерна от металломагнитных примесей позволяет снизить риски возникновения заболеваний у животных, а от минеральных примесей позволяет увеличить срок эксплуатации рабочих органов молотковой дробилки. В этой связи, разработка и совершенствование технических средств для повышения эффективности процессов предварительной очистки зерна перед измельчением в дробилках с пневматической загрузкой является актуальной научно-практической задачей.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ в рамках государственной темы № АААА-А16-116042810119-8 «Разработка технологии и технических средств для производства зернокомбикормовых смесей для животноводства в условиях Сибири».

Степень разработанности темы. Исследованием способов повышения эффективности работы молотковых дробилок занимались многие ученые, в том числе В. Р. Алешкин, Е.В. Агафонова, Н. Ф. Баранов, С.Ю. Булатов, М. Е. Гиршин, В. Л. Гейфман, В. П. Горячкин, Ф. Г. Зуев, Ф. С. Кирпичников И. В. Коношин, А.М. Левин, С. В. Мельников, У.К. Сабиев, П.А. Савиных, В. И. Сыроватка, И.Я. Федоренко, И.Б. Шагдыров, Costin Mircea, Zbigniew Krzysiak, Janusz Zarajczyk и многие другие ученые.

Также существенный вклад в исследования пневматической очистки зерна от примесей внесли А.В. Алешкин, В.Л. Андреев, В.И. Анискин, И.П. Безручкин, М.А. Борискин, В.Ф. Веденьев, А.Б. Демский, Н.И. Косилов, А.Я. Малис, А.А. Орлов, П.А. Патрин, М.В. Пивень, Н.И. Стрикунов, А.К. Туров, А.В. Фоминых, А.В. Черепков, В.Г. Чумаков, Qiang-long He, Paul Greyvensteyn, Carmen Brasacescu и другие ученые.

Несмотря на значимость проведённых исследований, некоторые аспекты данного вопроса остаются малоизученными. Для получения углубленных знаний необходимо провести анализ причин и факторов, влияющих на процесс очистки зерна в сепараторе молотковых зернодробилок.

На основании анализа исследований, посвящённых пневматической очистке зерна от примесей перед его измельчением, можно сделать вывод о том, что эффективность сепарации может быть значительно повышена за счёт использования центробежной силы для разделения частиц в зерновой смеси на

основе различия их массовых характеристик.

Цель исследования - повышение эффективности очистки зерна, поступающего в молотковую дробилку от минеральных и металломагнитных примесей за счет организации движения зернового потока по винтовому рабочему органу пневмосепарирующего устройства.

Задачи исследования:

1. Провести анализ способов и технических средств, применяемых для очистки зерна от примесей с пневматической подачей зерна на измельчение и разработать принципиальную схему пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом для молотковой дробилки с пневматической подачей зерна;

2. Разработать математическую модель процесса очистки зерна от примесей в пневмосепарирующем устройстве с винтовым рабочим органом;

3. Обосновать рациональные конструктивно – режимные параметры пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом для молотковой дробилки с пневматической подачей зерна;

4. Провести производственные испытания пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом и оценить экономическую эффективность результатов исследования.

Объект исследования - процесс очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей перед измельчением в молотковой дробилке с пневматической подачей зерна.

Предмет исследования - закономерности влияния конструктивно-режимных параметров пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом на процесс очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей зерна с пневматической подачей на измельчение.

Научную новизну работы составляют:

- математическая модель, описывающая движение зерна, минеральной и металломагнитной примесей в криволинейном и вертикальном сепарирующих каналах устройства с винтовым рабочим органом;

- схема рабочего процесса очистки зерна от примесей в пневмосепарирующем устройстве с винтовым рабочим органом, позволяющая определить его рациональные конструктивно-режимные параметры.

Техническая новизна подтверждена патентом Российской Федерации на полезную модель RU 229971.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что теоретически и экспериментально обоснованы рациональные конструктивно-режимные параметры работы пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом, обеспечивающие эффективность очистки зернового потока от минеральных и металломагнитных примесей, поступающего в молотковую дробилку с пневматической подачей зерна, что позволило повысить расчетный эксплуатационный ресурс молотков.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследования базируется на сравнительном анализе современного состояния развития центробежной пневмоочистки, методологии конструирования технологиче-

ского оборудования, а также применении современных программных продуктов для численного моделирования газодинамических процессов (CFD), в частности Solid Works Flow Simulation.

Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторных установках с использованием поверенных приборов и оборудования с использованием методов планирования экспериментов.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью компьютерных программ и пакетов для статистической обработки опытных данных, включая «Microsoft Excel», Statistica 10.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические выражения для описания движения частиц в криволинейном и вертикальном сепарирующих каналах устройства с винтовым рабочим органом;

- обоснованные рациональные конструктивно-режимные параметры пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом, обеспечивающие эффективную очистку минеральных и металломагнитных примесей из зернового потока.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность результатов обеспечена проведением необходимого и достаточного объёма теоретических и экспериментальных исследований; использованием современных нормативных документов, ГОСТов; поверенных приборов и оборудования; сопоставлением результатов, полученных теоретическими и экспериментальными исследованиями; совпадением полученных результатов исследований с данными других ученых по соответствующей тематике; внедрением полученных результатов в производство; одобрением результатов исследования на международных конференциях; публикацией и одобрением полученных материалов в ведущих журналах.

Реализация результатов исследования. Материалы теоретических и экспериментальных исследований были использованы при подготовке технического задания на разработку и изготовление макетного образца пневмосепаратора с винтовым рабочим органом. Результаты выполненных исследований внедрены в АО «Чкаловское» (Новосибирский р-н, п. Восход), а также в учебном и научно-исследовательском процессах при обучении студентов направления подготовки «Агроинженерия» в ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

Апробация работы. Основные положения, материалы и результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, были представлены и обсуждены на заседаниях кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции и на ученом совете Инженерного института ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ (Новосибирск, 2021 – 2025гг.). Получили высокую оценку на городских, всероссийских и международных научно-практических конференциях, и конкурсах: «Актуальные проблемы агропромышленного комплекса» (Новосибирск, 2021 г.); IV Международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы» (Казань, 2021 г.); международной научно-практической конференции «Техническое обеспечение инновационных техно-

логий в сельском хозяйстве» (Минск, 2022 г.); «Современное состояние механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции»: (Новосибирск, 2023, 2024 гг.); всероссийской (с международным участием) научно-практической интернет-конференции преподавателей, молодых ученых и студентов «Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств» (Донецк, 2023 г.); XV международной научно-практической конференции «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» (Новосибирск, 2023 г.); III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших аграрных образовательных и научных организаций России по Сибирскому федеральному округу (УФА, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 12 научных публикаций, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ. Получен 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, пять глав, общие выводы, библиографический список, содержащий 148 наименований, из них 29 на иностранных языках, а также 6 приложений. Общий объем работы составляет 179 страниц машинописного текста, который содержит 26 таблиц и 91 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, а также степень её разработанности в научной литературе. Определены объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи работы. Кроме того, в работе определены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту. Описаны степень достоверности проведённых теоретических и экспериментальных исследований, а также основные материалы, использованные для апробации результатов.

В первой главе представлен анализ технологий производства кормов на комбикормовых заводах отличающиеся полной и сокращенной организацией подготовки зерна, определены основные требования к процессу измельчения и очистки зерна, анализ разработанных конструкций пневмосепараторов, устанавливаемых на молотковых дробилках с пневматической подачей зерна (далее дробилках), рассмотрены основные методы повышения эффективности очистки зерна перед измельчением.

На основании проведённого анализа была выдвинута гипотеза о возможности повышения эффективности очистки зерна от примесей перед измельчением путём установки пневмосепаратора дробилки с винтовым рабочим органом. Сформулированы цель и задачи по теме исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований по обоснованию траектории движения частицы в двух зонах сепарации: в криволинейном и в восходящем воздушных потоках пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом (далее сепаратор), для которых разработана математическая модель.

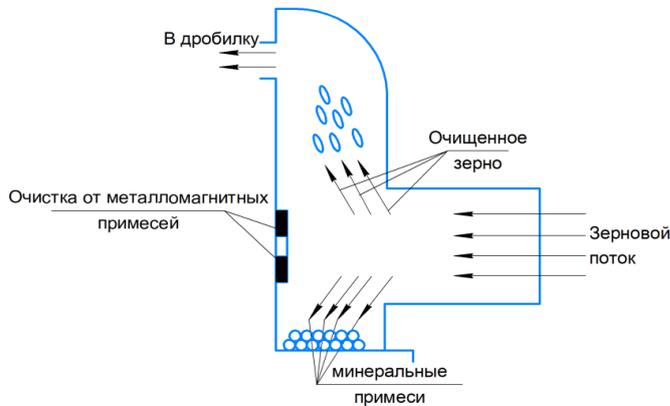


Рисунок 1 – Функциональная схема работы базового пневмосепаратора

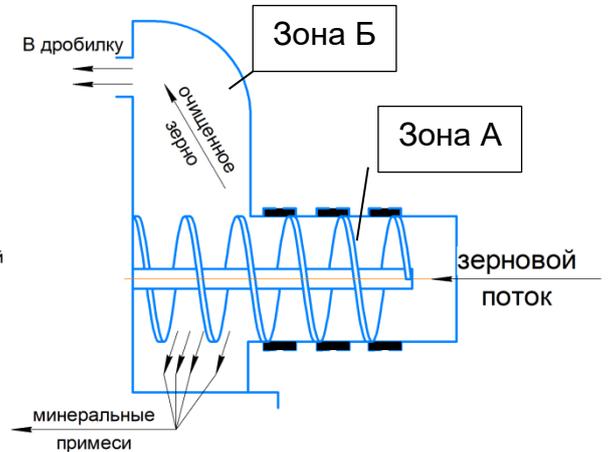


Рисунок 2 – Модель пневмосепаратора с винтовым рабочим органом

Теоретический анализ процесса очистки зернового потока от минеральных и металломагнитных примесей в пневмосепараторе показал, что разделение потока осуществляется под действием гравитационных, аэродинамических и инерционных сил во время контакта с задней стенкой сепаратора: минеральные примеси осаждаются под действием гравитационных сил, металломагнитные примеси отделяются путем действия магнитных сил при установке магнитного кольца. Так как зерновой поток подается непрерывно в дробилку, время очистки зерна в сепараторе минимально и возможно крошение примесей и зерновки. Функциональная схема работы пневмосепаратора изображена на рисунке 1.

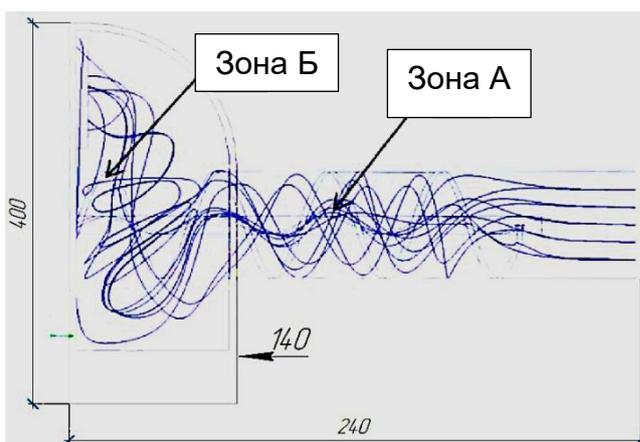


Рисунок 3 – Схема траекторий движения элементарных струек потока воздуха (линий тока) в сепараторе в программном продукте SolidWorks2020:

Зона А – траектории движения по винтовой поверхности рабочего органа; Зона Б – в вертикальном потоке сепарационной камеры сепаратора

Для повышения эффективности процесса очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей в сепараторе устанавливается винтовой рабочий орган (рисунок 2). В ходе теоретического исследования получены математические модели, позволяющие описать и определить координаты частицы в сепараторе, с помощью уравнения Навье-Стокса и второго закона Ньютона.

Для изучения движения частиц в сепараторе дробилки использована программа «SolidWorks2020», с заданными граничными условиями симуля-

ции (длина винтового рабочего органа 240 мм и его диаметр 70 мм с шагом витков 40, 60 и 80 мм; скорость воздуха 20 м/с) и смоделирован сепаратор 140x240x400 мм (рисунок 3). В результате компьютерного моделирования определена траектория движения воздушного потока по винтовому рабочему органу пневмосепаратора, которую можно представить, как элементарные траектории струйки потока (линии тока). На рисунке видно, как струйка потока, попадая в винтовой воздушный канал (зона А), движется по винтовой траектории. При попадании в зону Б траектории имеют нисходящий и восходящий потоки.

Для определения зависимости изменения скорости материальных частиц приведены графики изменений скорости движения зерна (рисунок 4 а, в, д) и минеральной примеси (рисунок 4 б, г, е) в 2 зонах сепаратора при количестве витков винтового рабочего органа равных 3, 4, 6.

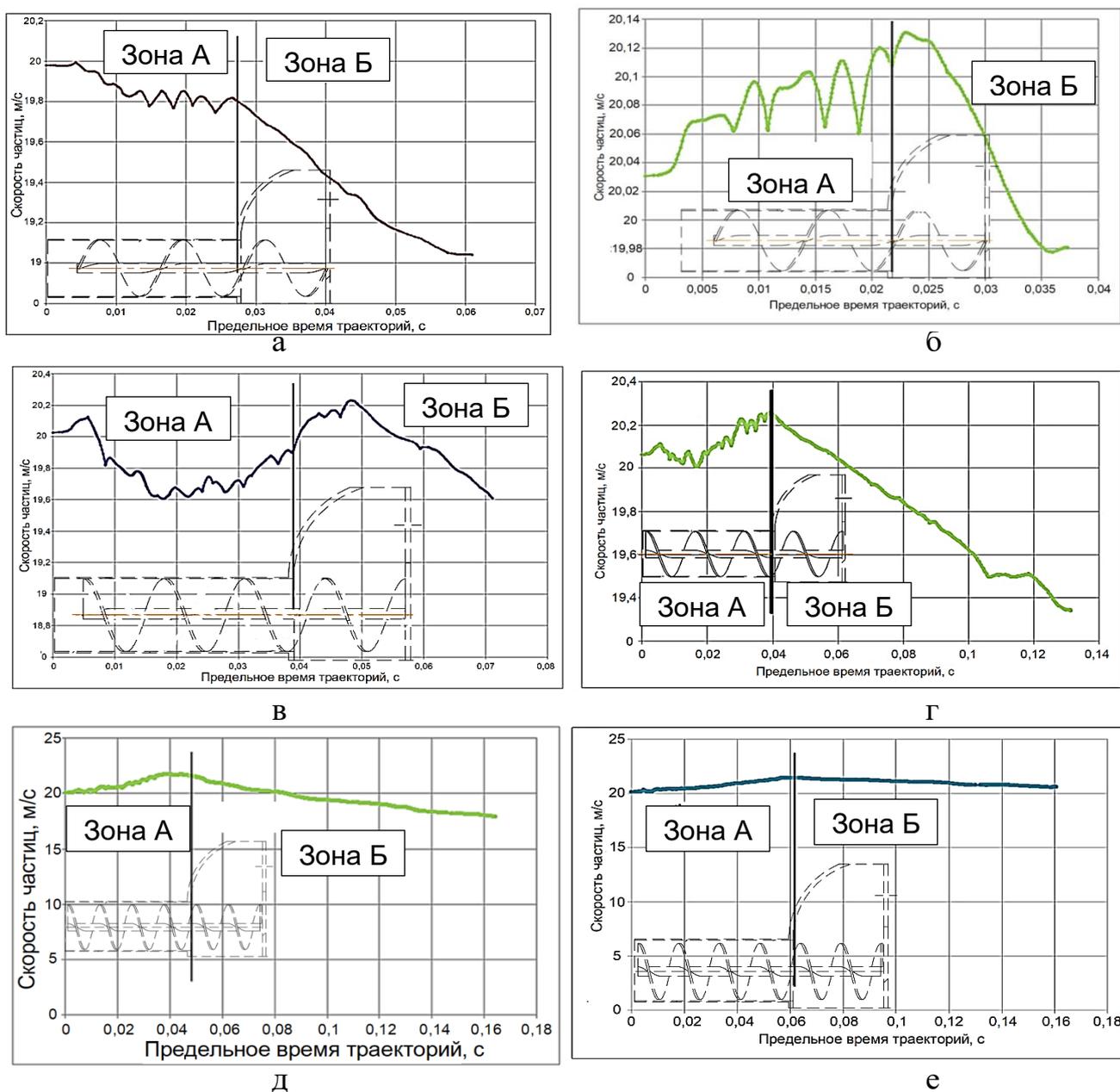


Рисунок 4 – Изменение скорости движения зерна и минеральной примеси в зависимости от количества витков винтового рабочего органа

На основе полученных теоретических данных определены закономерности изменения скорости зерна и скорости минеральных примесей в зависимости от количества витков винтового рабочего органа.

Проанализировав графики, можно сделать вывод, что при увеличении количества витков винтового рабочего органа происходит увеличение скорости движения зерна с 20,1 до 23,3 м/с и скорости движения минеральных примесей с 20,14 до 21,6 м/с. Вследствие возникновения центробежной силы у частиц зерновой смеси происходит разделение на зерно и минеральные примеси из-за различия в их массовых характеристиках. При движении по периферии винтовой поверхности частицы минеральных примесей замедляются относительно скорости зерна из-за возникающего сопротивления стенок входного патрубка.

Для анализа траектории движения зерна, которое представлено в виде материальной точки рассмотрена единичная частица, находящаяся в зерновом потоке, движущаяся по винтовой поверхности сепарирующего канала.

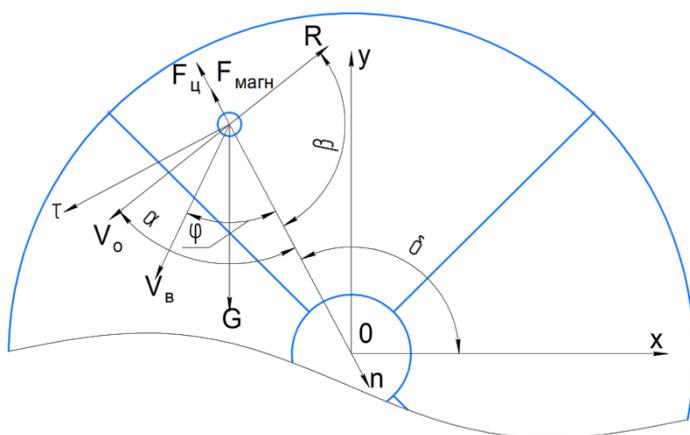


Рисунок 5 – Схема действия сил на частицу в винтовом рабочем органе

Частица массой m движется в потоке воздуха, на которую в сепарационном канале действуют три силы: сила аэродинамического сопротивления R , сила тяжести G и центробежная сила $F_{ц}$. Абсолютная скорость частицы V_0 складывается из скорости воздуха $V_в$ и скорости частицы относительно воздуха. На металломагнитные примеси дополнительно действует магнитная сила $F_{магн}$. Направление силы тяжести остаётся неизменным, а направление силы сопротивления действию воздушного потока постоянно меняется по мере движения частицы. Угол между осью X и нормалью n равен δ , углы между нормалью n и векторами скорости воздуха $V_в$, абсолютной скоростью частицы V_0 и силой аэродинамического сопротивления R равны соответственно φ , α и β (рисунок 5).

На основе второго закона Ньютона получено векторное дифференциальное уравнение движения материальной точки (1):

$$m \cdot \vec{W} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_{магн}, \quad (1)$$

Исходя из уравнения 1, векторное дифференциальное уравнение движения материальной точки в зоне А запишется в виде (2):

$$\begin{cases} m \frac{d^2 n}{dt^2} = -F_{ц} - R \cos \beta + G \sin \delta - F_{магн} \sin \delta \\ m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = -F_{ц} \sin \beta - R \cos \beta - G \cos \delta - F_{магн} \sin \beta \end{cases}, \quad (2)$$

После преобразования системы уравнений (2) получили систему уравнений (3), описывающее движение материальной точки в криволинейном ка-

нале, в котором радиус кривизны r напрямую зависит от шага витков винтового рабочего органа t и систему уравнений (4) скорости движения частицы:

$$\begin{cases} n(\Delta t) = n_0 \Delta t + \left(-\frac{u_{o1}^2}{r_t} - k u_{o1}^2 \cos \beta + g \sin \delta + \mu_o \chi \sin \delta \right) \frac{\Delta t^2}{2} \\ \tau(\Delta t) = \tau_0 \Delta t + \left(-k u_{o1}^2 \cos \beta - g \cos \delta - \mu_o \chi \cos \delta \right) \frac{\Delta t^2}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} N(\Delta t) = n_0 + \left(-\frac{u_{o1}^2}{r_t} - k u_{o1}^2 \cos \beta + g \sin \delta + \mu_o \chi \sin \delta \right) \Delta t \\ T(\Delta t) = \tau_0 + \left(-k u_{o1}^2 \cos \beta - g \cos \delta - \mu_o \chi \cos \delta \right) \Delta t \end{cases}, \quad (4)$$

где k – коэффициент парусности, m^{-1} .

μ_o – магнитная постоянная, Гн/м;

χ – удельная магнитная восприимчивость, kg^{-1} ;

r_t – радиус кривизны траектории движения по винтовой поверхности.

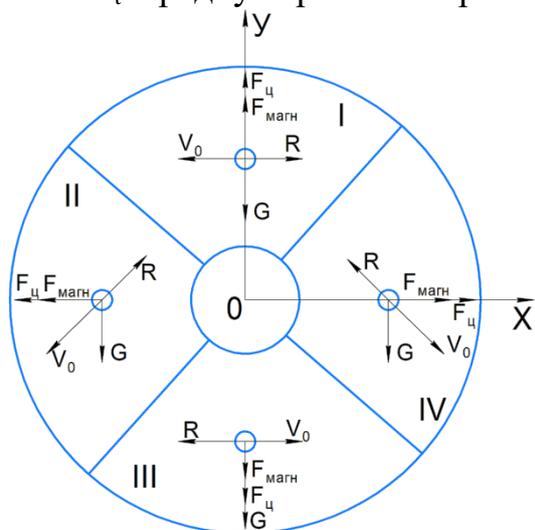


Рисунок 6 - Схема действия сил на частицу движущейся по винтовой поверхности рабочего органа сепарирующего канала дробилки

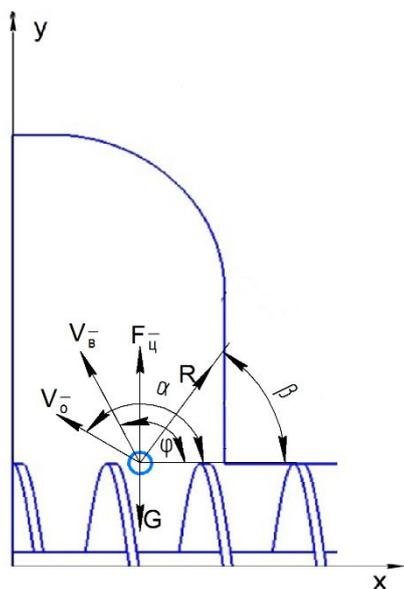


Рисунок 7 – Схема действия сил, действующих на частицу в вертикальном сепарирующем канале

В зоне IV происходит изменение направления движения материальной частицы из-за противоположного направления вектора силы G . Полученные закономерности (3,4), описывающие движение частицы в криволинейном воздушном потоке позволили описать и определить координаты частицы при движении по винтовой траектории. Направление траектории движения частицы в каждой зоне винтового рабочего органа изменяется в зависимости от направления действующих на неё сил.

Винтовой рабочий орган можно условно разделить на четыре зоны сепарации (рисунок 6). При попадании частицы в сепарирующий канал зоны I, она перемещается во II зону, где силы направлены вниз, что позволяет частице ускориться. Далее частица попадает в III зону, где тяжёлые частицы остаются на дне из-за разности масс с зерном, так как силы воздушного потока недостаточно, чтобы оторвать их от поверхности. В этой области воздушно-зерновая смесь разделяется на минеральные примеси и зерно. В IV зоне происходит разделение смеси на основе разницы скоростей витания.

Для отделения материала в области IV необходимо задать скорость воздушного потока меньше, чем скорость витания зерна. Однако для зон I и II требуется бо-

лее точно определить скорость воздушного потока, чтобы предотвратить отскок зерна от стенок сепаратора.

Рассмотрено движение частицы в вертикальном сепарирующем канале в координатах X, Y и представлено на рисунке 7 при условии вылета частицы с винтового рабочего органа под 90° .

На основании полученного уравнения (1), уравнение движения материальной точки в проекциях на оси координат запишется в виде (5):

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{ц} + R \cos \beta \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = F_{ц} \sin \beta + R \sin \beta - G \end{cases}, \quad (5)$$

После решения уравнения (5), получили уравнения, описывающие движение материальной точки в вертикальном канале (6) и ее скорости (7), в котором рассматривается что зерновка направляется вертикально, а минеральная примесь осаждается под действием центробежной силы, предварительно расслаиваясь в зерновом потоке на витках винтового рабочего органа:

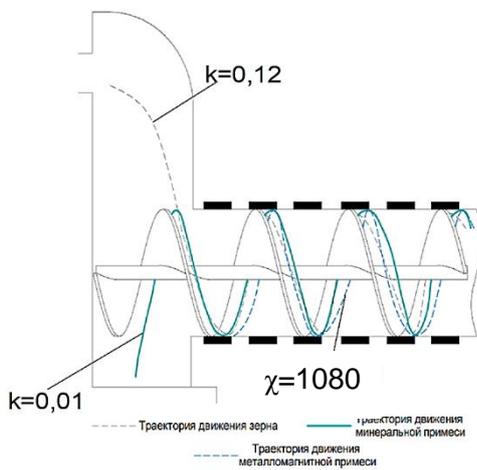


Рисунок 8 – Траектории движения частиц

$$\begin{cases} x(\Delta t) = x_0 \Delta t + \left(\frac{V_0^2}{r} - k u_0 x_0 + k u_0 V_B \cos \varphi \right) \frac{\Delta t^2}{2} \\ y(\Delta t) = y_0 \Delta t + \left(-k u_0 \tau_0 + k u_0 V_B \sin \varphi - g \right) \frac{\Delta t^2}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} X(\Delta t) = x_0 + \left(\frac{V_0^2}{r} - k u_0 x_0 + k u_0 V_B \cos \varphi \right) \Delta t \\ Y(\Delta t) = y_0 + \left(-k u_0 y_0 + k u_0 V_B \sin \varphi - g \right) \Delta t \end{cases}, \quad (7)$$

где r – радиус кривизны траектории движения с винтовой поверхности.

Таким образом, полученные выражения (3) и (6), описывающие изменение перемещение частицы при криволинейном и вертикальном сепарирующих каналах пневмосепарирующего устройства позволили построить траектории движения зерна при коэффициенте парусности $k=0,12$, минеральных примесей при коэффициенте парусности $k=0,01$ и металломагнитных примесей при удельной магнитной восприимчивости $\chi=1080$ (рисунок 8).

В третьей главе приведена программа и методика экспериментальных исследований.

Для подтверждения основных теоретических положений работы, а также для определения рациональных параметров рабочего процесса очистки зерна перед измельчением были проведены экспериментальные исследования, программа которых включала:

- разработку и изготовление экспериментальной установки для изучения траектории движения материальных частиц по винтовому рабочему органу под действием воздушного потока в сепараторе дробилки;
- проведение производственных испытаний экспериментального образца сепаратора дробилки;
- разработка и подготовка методики проведения эксперименталь-

ных исследований.

На рисунке 9 представлена схема работы пневмосепаратора молотковой дробилки с винтовым рабочим органом.

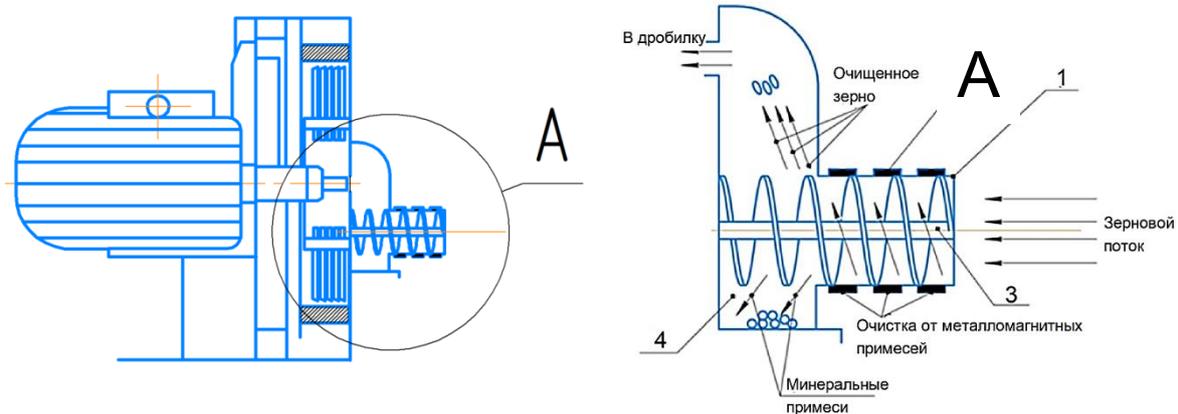


Рисунок 9 – Функциональная схема встроенного пневмосепаратора с винтовым рабочим органом дробилки:

1 – входной патрубок; 2 – магниты; 3 – винтовой рабочий орган; 4 – осадительная камера минеральных примесей

При выделении сепаратором минеральных и металломагнитных примесей оценивалось влияние факторов (рисунок 10). К конструктивно-технологическим параметрам относятся: диаметр винтового рабочего органа d , мм; шаг витков винтового рабочего органа t , мм; глубина осадительной камеры H , мм; подача материала q кг/ч, ширина b мм и высота h мм корпуса сепаратора, межосевое расстояние от установки винтового рабочего до входного отверстия дробилки a , мм и его диаметр ϕ мм, радиус скругления корпуса сепаратора r , мм. Режимным параметром является скорость воздушного потока V м/с, которая изменяется в зависимости от шага витков t . На основе метода априорного ранжирования и литературного анализа определены следующие существенные факторы, оказывающие значительное влияние на процесс очистки зерна, определены их уровни и интервалы варьирования:

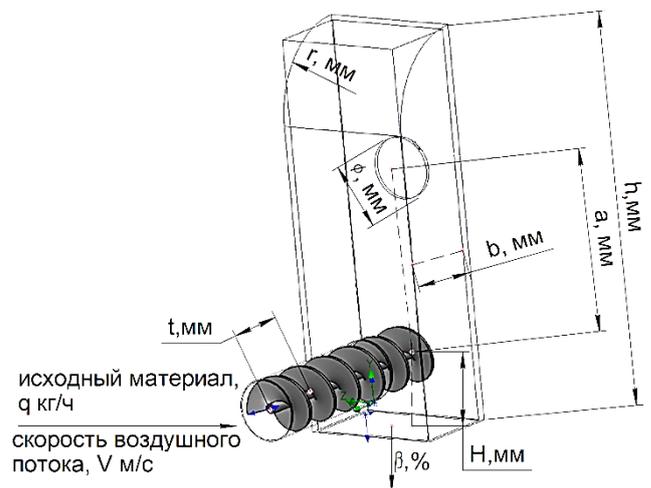


Рисунок 10 – Факторы, влияющие на процесс очистки зерна от примесей в сепараторе

1. Шаг витков рабочего органа t ($X_1=40,60,80$ мм): определяет расстояние между витками и оказывает влияние на интенсивность воздействия на зерно.

2. Глубина осадительной камеры для крупных примесей H ($X_2=40,80,120$ мм): влияет на способность камеры собирать крупные частицы, что способствует более качественной очистке зерна.

3. Подача материала q ($X_3=1008,1908,2808$ кг/ч): определяет количество

материала, поступающего в сепаратор, что непосредственно влияет на скорость и эффективность процесса очистки от металломагнитных примесей.

Эксперименты проводились на 3 уровнях для каждого из показателей.

В качестве отклика выбрано количество выделенных примесей β , выраженным в %, рассчитанного по формуле (8):

$$\beta = \frac{m_{\text{выд}} - m_{\text{зерна}}}{m_{\text{общ.прим.}}} * 100, \quad (8)$$

где $m_{\text{выд}}$ – количество выделенных из зерновой смеси сепаратором примесей, г;

$m_{\text{зерна}}$ – количество зерна, содержащегося в выделенных сепаратором примесях, г;

$m_{\text{общ.прим.}}$ – общее количество примесей, содержащихся в зерне, г.

Для обоснования рациональных конструктивно-режимных параметров сепаратора дробилки на основе полученных результатов был выбран план многофакторного эксперимента, представляющий собой композиционный симметричный трехуровневый план Бокса-Бенкена и классическое уравнение регрессии полинома I порядка с доверительным интервалом в 95%.

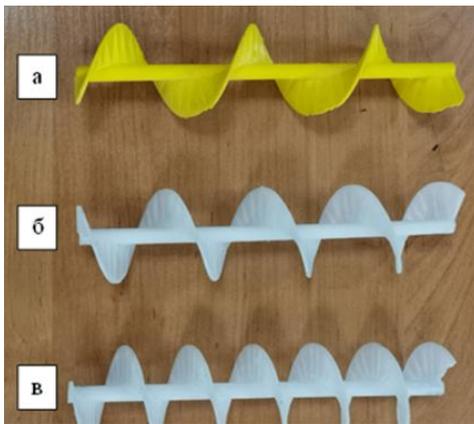


Рисунок 11 - Винтовые рабочие органы: а – 3 витка; б – 4 витка; в – 6 витков

Для реализации проведения полнофакторного эксперимента требовалась предварительная подготовка оборудования, материалов и сырья. Изготовлены 3 вида винтовых рабочих органов диаметром 70 мм и длиной 240 мм с градацией количества витков 3,4,6 (рисунок 10). Установка магнитов на входной патрубке сепаратора и съемных осадочных камер с высотами 40, 80 и 120 мм. Сборка приемного бункера с шиберной заслонкой для изменения подачи материала с 1008 до 2808 кг/ч путем изменения площади ее открытия. Засоренность материала создавали искусственно. Подготовка зерновой

смеси с минеральными и металломагнитными примесями с соотношением ячменя к примесям 1:0,04 кг. Сборка экспериментального образца сепаратора и ее последующая установка на крышку дробилки ДПМ-11.

При проведении экспериментальных исследований сепаратора осуществлялся контроль следующих параметров на лабораторной установке (рисунок 12): мощность дробилки и ее производительность, скорости на входном и выходном патрубках дробилки.

Определение эффективности очистки зерна при проведении экспериментов осуществлялось путем опустошения осадочной камеры от минеральных примесей и очистки магнитов от металломагнитных примесей. Эффективность очистки определялось отношением массы извлеченных примесей к исходной массе смеси.

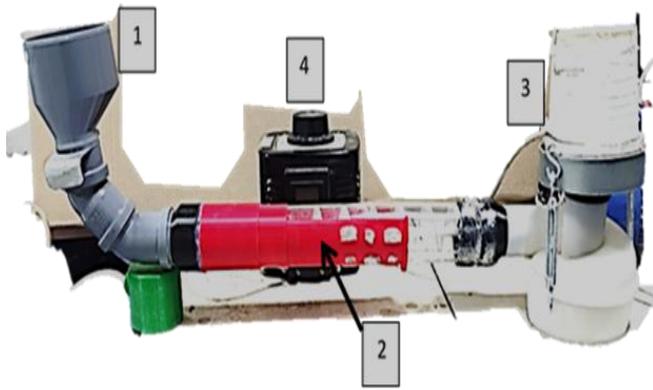


Рисунок 12 - Лабораторно-экспериментальная установка для отделения металломагнитных примесей:
1 – приемный бункер; 2 – пневмосепаратор; 3 – вентилятор с циклоном; 4 – ЛАТР

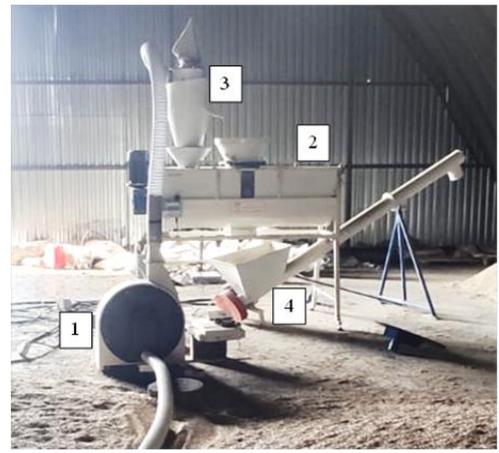


Рисунок 13 - Мини-комбикормовый агрегат:

1 - пневматическая молотковая дробилка ДПМ-11; 2 – смеситель горизонтальный СГ-1,5; 3 – циклон-осадитель БЦР-40; 4 – шнековый транспортер зерна ТСШ-150.

Производственные испытания производились с использованием сравнительного метода, при установке базового пневмосепаратора и пневмосепаратора с винтовым рабочим органом на дробилку ДПМ-11 в мини-комбикормовом заводе «Агропоставка» (рисунок 13). Взвешивание отделенных примесей в пневмосепараторе осуществлялись через каждые 500 кг. Изменение эффективности очистки зерна оценивалось графоаналитическим методом при помощи построения диаграмм.

В четвертой главе представлены результаты выполненных экспериментальных исследований, а также их анализ.

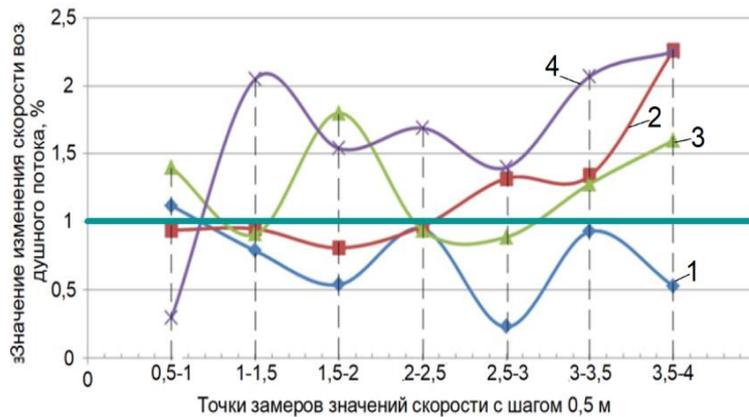


Рисунок 14 - Изменение скорости воздушного потока в пневмопроводе дробилки на входном патрубке:
1 – без витков; 2 – 3 витка; 3 – 4 витка; 4 – 6 витков.

Результаты экспериментального исследования эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей показали, что в зависимости от количества витков винтового рабочего органа сепаратора и подачи зерновой смеси, количество выделенных металломагнитных примесей в % от зерна изменяется и представлены на рисунке 15.

Анализ показал, что количество выделенных металломагнитных при-

Анализ результатов экспериментальных исследований обоснования длины пневмопровода дробилки с сепаратором показал, что при в диапазоне от 1 до 1,5 метров наблюдается наименьшее снижение скорости воздушного потока, которое составляет менее 1% относительно значений скорости, полученных при установке базового сепаратора (рисунок 14).

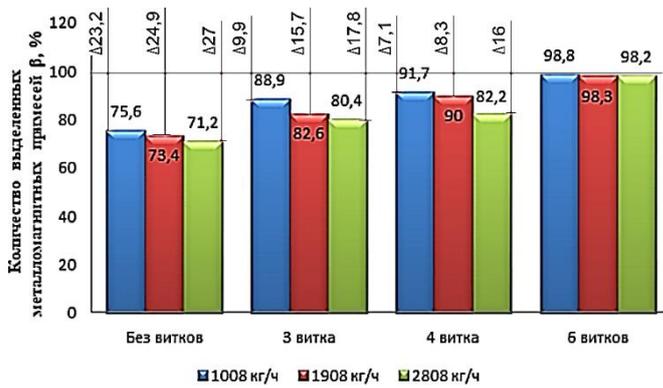


Рисунок 15 – Зависимость изменения количества выделенных металломагнитных примесей от количества витков и подачи материала

примесей увеличивается в среднем: при 3 витках на 10,5%, при 4 витках на 14,5%, при 6 витках на 25%. Такое увеличение степени очистки объясняется тем, что с увеличением количества витков винтового рабочего органа повышается время и площадь контакта между металломагнитными примесями и магнитами.

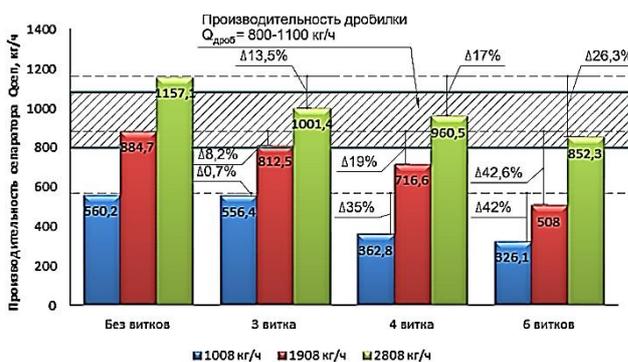


Рисунок 16 – Зависимость изменения производительности сепаратора от подачи материала и количества витков

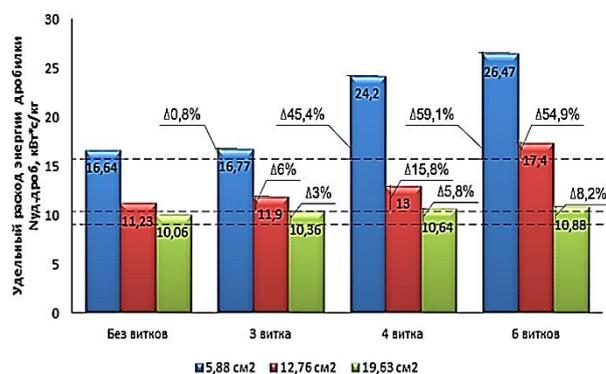


Рисунок 17 – Зависимости изменения удельного расхода энергии дробилки от площади открытия заслонки и количества витков

679,9 кг/ч, при 6 витках 562,1 кг/ч. По отношению к производительности сепаратора без витков при максимальной подаче материала уменьшение составило соответственно: 5,3% при 3 витках, 9,1% при 4 витках и 20% при 6 витках. Причиной снижения производительности сепаратора стало уменьшение объёма входного патрубка после установки винтового рабочего органа.

месяц в сепараторе без витков уменьшается с увеличением подачи и составляет в среднем 73,4%, с наибольшей эффективностью при минимальном открытии заслонки. При установке винтового рабочего органа во входной патрубок сепаратора с магнитами при увеличении витков с 3 до 6 по сравнению с сепаратором без витков количество выделенных металломагнитных

Результаты статистической обработки данных технико-энергетических показателей дробилки с сепаратором, демонстрируют изменение производительности сепаратора (рисунок 16) и удельного расхода энергии дробилки (рисунок 17) в зависимости от изменения подачи материала и количества витков винтового рабочего органа.

Производительность сепаратора оказывает влияние на производительность дробилки и качество измельчения продукта. Производительность сепаратора без витков дробилки при увеличении подачи с площади открытия заслонки 5,88 см² до полного открытия в среднем составит 834 кг/ч. В случае с установкой винтового рабочего органа с 3, 4 и 6 витками наблюдается уменьшение производительности в среднем при 3 витках 790,1 кг/ч, при 4 витках

Производительность дробилки составляет от 800 до 1100 кг/ч по данным завода изготовителя, что позволяет сделать вывод производительность сепаратора без витков выше на 5,4% при максимальном открытии заслонки. Высокая производительность сепаратора без витков связана с тем, что зерновой поток поступает в дробилку неравномерно и пульсационно, что негативно сказывается на эффективности очистки зерна от примесей.

При установке винтового рабочего органа с 3, 4 и 6 витками производительность сепаратора по отношению к производительности дробилки выглядит следующим образом: при 3 витках выше на 0,2%, при 4 витках ниже на 3,95% и при 6 витках ниже на 14,7%. Как видно из экспериментальных данных подача зерна в дробилку стала более равномерной, а результаты производительности сепаратора близки к производительности дробилки. Это позволяет повысить эффективность очистки зерна от примесей за счёт более длительного пребывания зерновой смеси в сепараторе. Таким образом, понижение производительности сепаратора позволяет увеличить эффективность очистки зерна от примесей, увеличить качество измельчаемого продукта.

Удельный расход энергии дробилки с сепаратором без витков при увеличении подачи продукта с 1008кг/ч до 2808 кг/ч в среднем составит 12,6 кВт*с/кг. При установке винтового рабочего органа с 3, 4 и 6 витками наблюдается увеличение удельного расхода энергии в среднем при 3 витках до 13,01 кВт*с/кг, при 4 витках до 15,9 кВт*с/кг, при 6 витках до 18,3 кВт*с/кг. При максимальной подаче удельный расход энергии относительно к затратам с сепаратором без витков составило: при 3 витках – выше на 2,9%, при 4 витках – выше на 5,7%, при 6 витках – выше на 8,1%.

Причиной повышения удельного расхода энергии при установке сепаратора является уменьшение пропускной способности сепаратора, при этом наблюдается загрузка рабочей камеры с более равномерной подачей зерна на измельчение. Таким образом, установка сепаратора приведет к увеличению энергозатрат не более 8,1% на измельчение, не понижая качество измельчения зерна и повышая эффективность очистки зерна от примесей.

На основании результатов полнофакторного эксперимента эффективности очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей в зависимости от конструктивно-режимных параметров сепаратора было получено уравнение регрессии, которое имеет следующий вид (9):

$$y = 97,558 - 1,126 * X_1 - 0,295 * X_2 - 0,489 * X_3 - 0,4088 * X_1 X_2 + 0,1213 * X_1 X_3 + 0,2738 * X_2 X_3 + 0,1813 * X_1 X_2 X_3, \quad (9)$$

Вычисленные значения критерия Фишера ($F_T=2,33$) и Стьюдента ($t=2,042$) показывают адекватность модели и соответствие доверительным интервалам в 95%. После подстановки в уравнение регрессии в натуральном раскодированном виде соответствующих значений основных факторов математическая модель процесса очистки зерна от примесей в сепараторе выглядит следующим образом (10):

$$\beta = 99,74 + 0,01t + 0,037H - 1,256q - 0,001tH - 0,0487tq - 0,024qH + 0,0009tHq, \quad (10)$$

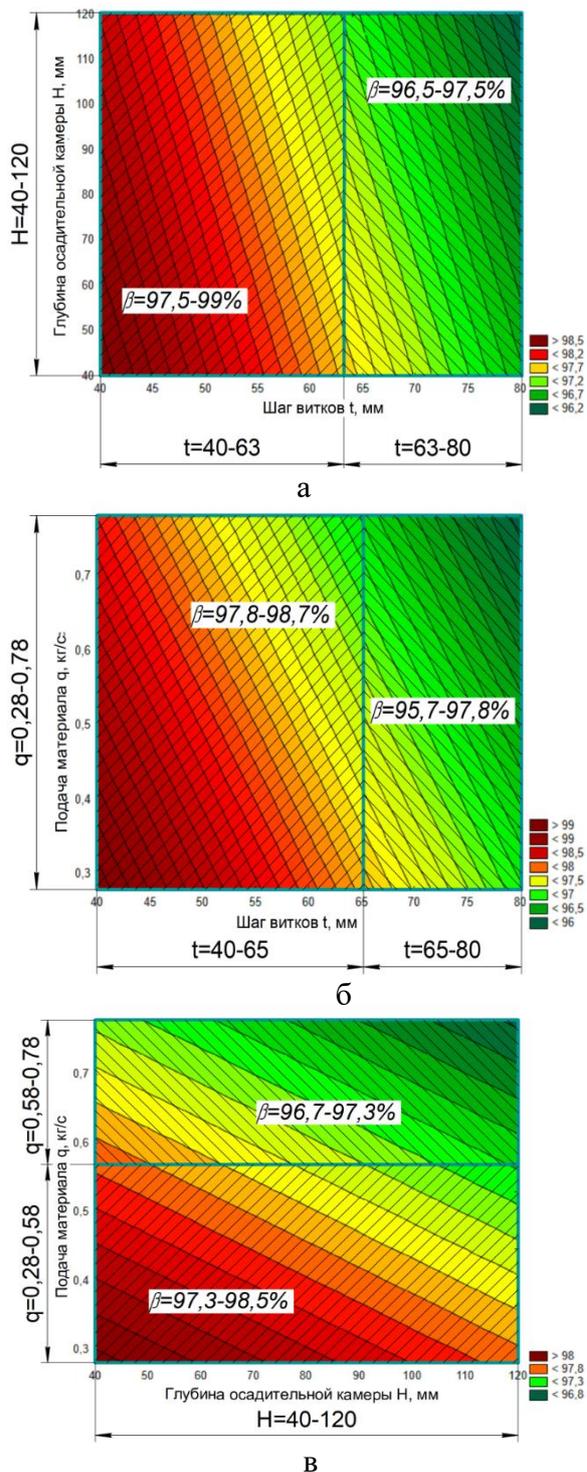


Рисунок 18 – Контурные графики взаимосвязи шага витков и глубины осадочной камеры (а), шага витков и подачи материала (б) и глубины осадочной камеры и подачи материала (в)

Для анализа полученной математической модели была использована программа «Statistica 10», которая позволила построить зависимости, представленные в виде графической проекции.

Контурные графики взаимосвязи шага витков винтового рабочего органа и глубины осадочной камеры (рисунок 18а), шага витков и подачи материала (рисунок 18б) и глубины осадочной камеры и подачи материала (рисунок 18в) показывают, что при шаге витков до 58 мм, глубине осадительной камеры до 93 мм и подаче материала до 0,78 кг/с количество выделенных примесей максимально и составляет до 98%. При повышении значений факторов до верхнего предела наблюдается снижение количества выделенных примесей до 95%.

Продифференцировав уравнение регрессии первого порядка (7) рассчитаны рациональные значения шага витков рабочего органа, глубину осадочной камеры и подачу материала при которых значение количества выделенных примесей в сепараторе будет максимальным.

Рациональные значения факторов равны: $t = 53$ мм, $H=44$ мм, $q=2808$ кг/ч. Выбранные рациональные конструктивно-технологические параметры сепаратора повышает количество выделяемых минеральных и металломагнитных примесей до 98%.

Проверка на соответствие расчетных рациональных конструктивно-технологических параметров сепаратора проводилась в АО «Чкаловское» в 2025 г. При проведении экспериментальных исследований использовались сепаратор без витков и экспериментальный образец сепаратора с рациональными конструктивно-режимными параметрами. В ходе производственных испытаний экспериментального образца сепаратора было установлено, что при влажности ячменя 10% производительность сепаратора составила 810 кг/ч, а количество выделенных мине-

ральных и металломагнитных примесей — 98%.

В пятой главе выполнена оценка экономической эффективности результатов исследования от внедрения экспериментального образца сепаратора с эффективностью очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей до 98% и производительностью 810 кг/ч. В сравнении с базовым сепаратором дробилки ДПМ-11 снизились затраты в 2,3 раза на техническое обслуживание рабочих органов дробилки, вследствие этого годовой экономический эффект от использования предлагаемой конструкции составит 12148 рублей и окупаемость составит 0,4 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих способов и технических средств для очистки зерна перед измельчением. Установлено, что одним из основных методов повышения эффективности очистки зерна перед измельчением в дробилке с пневматической подачей зерна является использование технологии пневматической очистки зерна в криволинейном потоке. В результате исследований разработана схема пневмосепаратора с винтовым рабочим органом для молотковой дробилки с пневматической подачей зерна, встроенного на крышке дробилки отличающаяся тем, что повышение эффективности очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей достигается путем предварительного расслоения зернового потока и продолжительного контакта с магнитами при движении по винтовой поверхности.

2. Разработана математическая модель для описания движения зерновых частиц в криволинейном и вертикальном сепарирующих каналах. Определены зоны, при которой центробежная сила направляет и организует траектории движения частиц в зерновом потоке по винтовой траектории, таким образом, что минеральные примеси относятся на периферию винтового рабочего органа, а зерна концентрируются ближе к центру. Построены траектории движения зерна, минеральной и металломагнитной примеси. Результаты показали, что, при возникновении дополнительной центробежной силы, за счет установки винтового рабочего органа, скорость движения зерна увеличилась на 16%, а минеральных примесей на 7%.

3. Установлено, что количество выделенных металломагнитных примесей при установке винтового рабочего органа в сепаратор повысилось до 98%. Производительность сепаратора снизилась на 3,95% и удельный расход энергии дробилки увеличился на 5%.

4. Определено, что при проведении полнофакторного эксперимента с использованием 3 выбранных винтовых рабочих органов наилучший результат показал образец с 4 витками. Статистическая обработка данных позволила получить уравнение регрессии, на основе которого была разработана математическая модель процесса очистки зерна перед измельчением. Это позволило определить рациональные конструктивно-режимные параметры сепаратора: шаг витков винтового рабочего органа $t=53$ мм, высота осадительной камеры $H=44$ мм и подачу продукта $q=2808$ кг/ч, обеспечивающие количество выделенных минеральных и металломагнитных примесей до 98%.

5. Производственные испытания пневмосепаратора с винтовым рабо-

чим органом показали, что производительность составила 810 кг/ч и эффективность очистки зерна от примесей до 98%. Оценка экономической эффективности экспериментального образца сепаратора в сравнении с базовым сепаратором повысила расчетный эксплуатационный ресурс рабочих органов дробилки в 2,3 раза. Расчетный годовой экономический эффект составил 12148 рублей и срок окупаемости 0,4 года.

Рекомендации производству

Результаты проведенных исследований по обоснованию конструктивно-режимных параметров пневмосепаратора с винтовым рабочим органом рекомендуются использовать предприятиям, изготавливающим молотковые дробилки с пневматической подачей зерна со встроенными пневмосепараторами, а также пневмосепараторы стационарного типа, с целью увеличения эффективности очистки зерна от примесей.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением дальнейших научных исследований является исследование процесса комбинированной очистки зерна от металломагнитных, минеральных и легких примесей перед измельчением, что позволит значительно расширить функциональные возможности пневмосепаратора.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Голиков А. И. Экспериментальные исследования процесса очистки зерна от примесей в пневмосепараторе пневматической молотковой дробилки / А. И. Голиков, А. А. Мезенов, А. А. Голикова // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1(57). – С. 146-155.

2. Голиков А.И. Экспериментальные исследования технико-энергетических параметров пневматической молотковой дробилки с встроенным пневмосепаратором / А.И. Голиков, А.А. Мезенов // Научный журнал КубГАУ. – - Краснодар: КубГАУ. - 2025. - №04(208). – 16 с.

3. Голиков А.И. Теоретическое исследование движения воздушного потока в сепараторе пневматической молотковой дробилки / А.И. Голиков, А.А. Мезенов // Вестник Брянской ГСХА. – 2025. - №3 (109). – С. 54-60.

Патент Российской Федерации:

4. Пат. №229971U1 РФ МПК В02С 13/00 Молотковая дробилка: / А.И. Голиков, А.А. Мезенов, А.А. Голикова, Н.Н Григорев. - №2024114690; заявл.30.05.2024; опубл. 06.11.2024; Бюл. №31. – 7 с.

Публикации в других изданиях:

5. Голиков А.И. Анализ существующих конструкций сепараторов в пневматических молотковых дробилках/ А. И. Голиков, А. А. Мезенов // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы: труды IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Волкова И.Е., Казань, 04 июня 2021 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет. - 2021. – С. 30-36.

6. Голиков А.И. Анализ конструктивного расположения загрузочного патрубка зернового материала в пневматических молотковых дробилках/

А.И. Голиков, А.А. Мезенов// Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сб. трудов науч.-практ. конф. препод., асп., маг. и студ. Новосибирского государственного аграрного университета. – Новосибирск. - 2021. - №6. – С.16-20.

7. Голиков А. И. Определение сил, действующих на зерновку в сепарирующем канале пневматической молотковой дробилки / А. И. Голиков, А. А. Мезенов // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 24-25 ноября 2022 г. - Минск: БГАТУ. - 2022. - С. 518-520.

8. Голиков А.И. Эксплуатационный анализ пневматических сепараторов молотковой дробилки/ А.И. Голиков, А.А. Мезенов// Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова. – Новосибирск. - 2023. – С. 272-274.

9. Голиков А. И. Теоретическое исследование движения воздушного потока по горизонтальному шнеку в пневматическом сепараторе молотковой дробилки / А. И. Голиков, А. А. Мезенов // Современное состояние механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции: Сборник научно-практической конференции, Новосибирск, 26 мая 2023 года. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос". - 2023. – С. 110-115.

10. Голиков А.И. Моделирование движения зерновки по горизонтальному шнеку в пневматическом сепараторе молотковой дробилки/ А. И. Голиков, А. А. Мезенов // Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств: сборник тезисов докладов всероссийской (с международным участием) научно-практической интернет-конференции преподавателей, молодых ученых и студентов, посвященной 60-летию кафедры оборудования пищевых производств, Донецк, 26–27 октября 2023 года. – Донецк: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования "Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского". - 2023. – С. 43-45.

11. Голиков А. И. Результаты экспериментального исследования влияния количества витков шнека пневмосепаратора на технико-энергетические показатели пневматической молотковой дробилки / А. И. Голиков, А. А. Мезенов, В. А. Новик // Современное состояние механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции: Сборник научно-практической конференции, Новосибирск, 07 июня 2024 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос». - 2024. – С. 50-53.

12. Голиков А. И. Результаты производственных испытаний пневмосепаратора с винтовым рабочим органом / А. И. Голиков, А. А. Мезенов // Современное состояние механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции: Сборник научно-практической конференции, Новосибирск, 26 июня 2025 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ "Золотой колос". - 2025. – С. 59-62.