На правах рукописи

БЛЁСКИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛОНА-РАЗГРУЗИТЕЛЯ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИКОРМОВ

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: доцент, кандидат технических наук **Пшенов Евгений Александрович**

Официальные оппоненты: **Сабиев Уахит Калижанович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

Леканов Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, инженер-конструктор 1 категории, «Общество с ограниченной ответственностью «Агро Промышленная Корпорация «Алтай ЭКО сорт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока)

Защита состоится « 03 » декабря 2025 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01 созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий 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@sfsca.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: https://www.sfsca.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@sfsca.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент Иванников Алексей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Концентрированные корма — основной и самый дорогой источник энергии в рационе животных. В малых хозяйствах (до 500 голов) отсутствует дозирование компонентов кормов, что снижает эффективность кормления. Для повышения продуктивности животных применяют мини-заводы для приготовления адресных комбикормов с премиксами и БМВД (0,8–5 т/ч). Производство сопровождается выбросами взрывоопасной мучной пыли (II класс, ПДК 6 мг/м³; при 10 мг/м³ — риск взрыва) и потерями сырья из-за уноса мелкодисперсных фракций. На мини-заводах используют пневмотранспорт с циклонами-разгрузителями или прямую подачу в смесители. Эффективность циклонов зависит от скорости воздушного потока, концентрации смеси и геометрии аппарата. Применяемые простейшие системы очистки (фильтр-мешки) не обеспечивают требуемого уровня пылеулавливания. Задача — снизить выбросы пыли в рабочую зону и атмосферу через эффективные системы пылеулавливания. Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) при исследовании движения газопылевой смеси позволяет определить рациональные конструктивно-режимные параметры циклонных аппаратов. Разработка новых эффективных методов и устройств для отделения продуктов дробления зерна в виде мелкодисперсных фракций, с использованием CFD-моделирования, является актуальным направлением, способствующим снижению затрат на проведение натурных экспериментов и повышению эффективности проектируемых аппаратов.

Степень разработанности темы.

Большой вклад в развитие теории процессов сепарации и выделения примесей из воздушного потока, а также приготовления кормов, внесли: Д.А. Белов, Л.Г. Белозеров, О.А. Беляев, С.Ю. Булатов, И.М. Волков, А.К. Григорьев, Л.И. Громов, К.В. Жуков, Н.П. Журавлев, В.Л. Злочевский, В.А. Иванов, С.В. Климов, П.Н. Ковалев, П.В. Козлов, М.А. Кузнецов, Л.А. Кущев, С.В. Леканов, Н.Е. Лебедев, В.И. Максимов, А.В. Морозов, Е.В. Николаев, А.А. Орлов, П.А. Патрин, В.Г. Павлов, Д.С. Петров, И.П. Роже, А.А. Романов, У.К. Сабиев, П.А. Савиных, А.Г. Сергеев, Г.М. Смирнов, А.И. Соколов, В.Ф. Соловьев, В.С. Степанов, С.Н. Тихонов, Р.С. Тимофеев, А.К. Туров, С.Д. Федоров, И.Я. Федоренко, А.В. Фоминых, Е.Л. Чернов, В.А. Чалов.

Однако несмотря на значимость выполненных исследований, некоторые аспекты рассматриваемой проблемы изучены недостаточно и заслуживают дальнейшего внимания вопросы особенностей конструкций циклонных аппаратов, влияющих на эффективность процесса отделения мелкодисперсных фракций.

Цель исследования – повышение эффективности отделения мелкодисперсных фракций продуктов дробленого зерна от воздушного потока на выходе из циклона-разгрузителя, за счёт применения второй ступени.

Для достижения цели поставлены и сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ способов повышения эффективности процесса отделения мелкодисперсных фракций продуктов дробленого зерна от воздушного потока и разработать принципиальную схему двухступенчатого циклона-разгрузителя;

2. Разработать математическую модель процесса отделения мелкодисперсных фракций дробленого зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе;

3. Обосновать рациональные конструктивные, технологические, и режимные параметры двухступенчатого циклона-разгрузителя;

4. Провести производственные испытания и оценить экономическую эффективность основных результатов исследования.

Объект исследования: процесс отделения мелкодисперсных фракций продуктов дробленого зерна из воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе.

Предмет исследования: закономерности процесса отделения мелкодисперсных фракций продуктов дробленого зерна из воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе.

Научную новизну работы составляют:

- математическая модель процесса отделения мелкодисперсных фракций дробленого зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе;

- закономерности отделения мелкодисперсных фракций дробленого зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе, связывающие его технологические и геометрические параметры;

Новизна технических решений, полученных в ходе исследования, подтверждена пятью патентами Российской Федерации на полезные модели RU 220965, RU 217720, RU 208117, RU 227378, RU 233659.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что теоретически с использованием методов численного моделирования, а также экспериментально, обоснованы основные конструктивно-режимные параметры двухступенчатого циклона-разгрузителя, обеспечивающего при установке его в линию производства комбикормового мини-завода повышение эффективности процесса отделения мелкодисперсных фракций дробленого материала, поступающего в циклон от пневматической молотковой дробилки. Это позволяет повысить выход готовой продукции за счёт уменьшения выброса фракций в выхлопной патрубок, улучшить пожаробезопасность предприятия и условия труда рабочего персонала за счет уменьшения концентрации пыли.

Материалы и методы исследования.

Теоретическая часть исследования базируется на сравнительном анализе современного состояния развития пневмо-центробежной сепарации, методологии конструирования технологического оборудования, а также применении современных CFD программ для численного моделирования газодинамики.

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

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью компьютерных программ для статистической обработки опытных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса отделения мелкодисперсных фракций

дробленого зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне-разгрузителе, разработанная методом численного моделирования (CFD) и верифицированная экспериментальными данными;

- закономерности, связывающие технологические и конструктивные параметры двухступенчатого циклона-разгрузителя для отделения мелкодисперсных фракций дробленого зерна от воздушного потока, и их рациональные конструктивно-режимные параметры.

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 учёных по соответствующей тематике; внедрением полученных результатов в производство; одобрением материалов докладов на международных конференциях; публикацией и одобрением полученных материалов в ведущих журналах.

Реализация результатов исследования. Внедрение результатов исследований осуществлялось в 2025 году. Результаты выполненных исследований внедрены на 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 и результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции и на учёном совете Инженерного института ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ (2021-2025 гг.), а также получили положительную оценку на XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI международных научно-практических конференциях "Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования" (Новосибирск, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.); на IV, V Всероссийской научной конференции «Теория и практика современной аграрной науки» с международным участием (Новосибирск, 2021, 2022 гг.); на Всероссийской (с международным участием) научно-практической интернет-конференции преподавателей, молодых учёных и студентов, посвященной 60-летию кафедры оборудования пищевых производств «Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств» (Донецк, 2023г.); на международной научно-практической конференции «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 2022 г.); на Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных аграрных образовательных и научных организаций России (Уфа, 2023 г.); в финале конкурса проектов молодых учёных и инноваторов «УМНИК», (Новосибирск, 2023 г.);

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 23 печатных работы, включая 4 публикации в журналах из перечня рецензируемых научных изданий ВАК, и 5 патентов РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 121 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 203 листах машинописного текста, включает 15 таблиц и 49 рисунков.

Диссертационная 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 зернокормовых смесей для животноводства в условиях Сибири».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, сформулирована цель исследования, научная новизна, практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ существующих технологических линий производства комбикормов, в том числе используемых систем пневмотранспорта на предприятиях. Обоснованы преимущества адресного производства комбикормов на малых предприятиях. Рассмотрены основные конструкции и направления развития центробежной сепарации, выделены перспективы повышения эффективности циклона.

На крупных предприятиях применяются развитые аспирационные системы с многоступенчатой очисткой, включая рукавные фильтры, обеспечивающие допустимые выбросы пыли. На мини-заводах, где аспирация отсутствует, отделение мелкодисперсной пыли недостаточно эффективно, что влияет на пожаробезопасность, здоровье персонала, экологию и качество продукции. На комбикормовых мини-заводах применяются две системы пневмотранспорта: с циклоном-разгрузителем (на горизонтальных смесителях) и без него, где его функцию выполняет вертикальный смеситель с фильтр-мешками. Системы с циклоном-разгрузителем обладают более высокой эффективностью очистки и легко интегрируются в технологические линии.

При этом применение аспирационных систем на малых предприятиях ограничено из-за увеличения габаритов, стоимости и сложности обслуживания.

Наиболее перспективным направлением по повышению эффективности циклонных аппаратов является изменение конструкции и подбор режимных параметров. На основании анализа систем пневмотранспорта, выявлено, что, за счёт резкого изменения направления потока, повышается эффективность отделения частиц от воздушного потока, это возможно за счёт использования в одном устройстве второй ступени очистки, представляющей из себя конус и воронку с переменным радиусом для создания перепадов давления по объему второй ступени. Предположено, что снижение выноса мелкодисперсных фракций продуктов дробления зерна в выхлопной патрубок циклонного аппарата, возможно за счёт установки перед ним отбойного конуса и вихревой воронки.

В ходе анализа методов моделирования газожидкостных и газопылевых сред выявлена эффективность применения современных CFD-программ, основанных на сочетании подходов и систем уравнений Эйлера–Лагранжа и уравнений Навье-Стокса, для адекватного описания процессов отделения, одной из таких программ

является Solid Works Flow Simulation.

Во второй главе дано теоретическое обоснование процесса отделения мелкодисперсной фракции с использованием второй ступени очистки в циклонном аппарате, проведена оценка факторов, влияющих на процесс отделения мелкодисперсного компонента от воздушного потока.

Модель отделения мелкодисперсных частиц продуктов дробления зерна от воздушного потока представлена на рисунке 1.

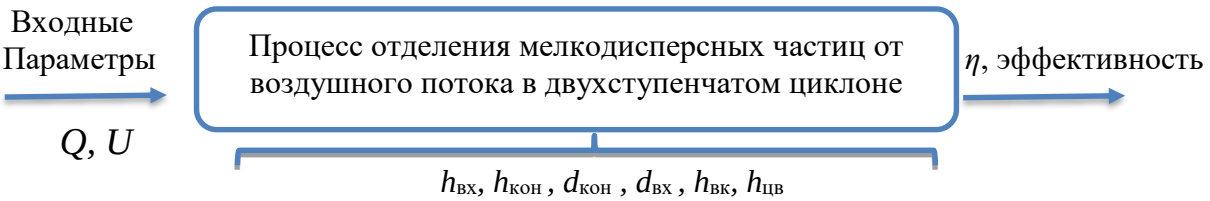

Рисунок 1- Модель процесса отделения мелкодисперсных частиц продуктов дробления зерна в двухступенчатом циклоне.

В качестве входных параметров принято: Q - подача материала, кг/с; U - скорость воздушного потока, м/с. Управляющими воздействиями являются: $h_{вх}$ - высота вихревой воронки, мм; $h_{кон}$ - высота конического отбойника, мм; $d_{кон}$ - диаметр конического отбойника, мм; $d_{вх}$ - диаметр вихревой воронки, мм; $h_{вк}$ - расстояние от конического отбойника до вихревой воронки, мм; $h_{цв}$ - высота цилиндрической вставки, мм. Выходным параметром является η - эффективность циклона %. Для описания движения частицы в циклоне с тангенциально-осевым входом учитывается комплексное воздействие гравитационных и центробежных сил, движение в стандартном циклонном аппарате, без использования второй ступени очистки, ранее уже описаны во множествах работ, при этом использование второй ступени (рисунок 2) требует теоретических исследований. Таким образом, работа второй ступени основывается на теоретическом анализе движения частиц в изменяемом поле распределенного давления, и как следствие, изменения скорости потока в вихревой воронке. В качестве вихревой воронки (рисунок 3) рассматривается геометрия усеченного конуса с высотой H, с радиусом основания $r_{мин}$ и радиусом верхнего сечения $r_{макс}$, в верхней части которого установлен выходной патрубок в виде цилиндра с постоянным радиусом $r_ц$ по оси z и высотой $H_ц$. Координатная ось направлена вдоль оси аппарата, вверх. Для описания системы движения частицы во второй ступени необходимо внести ограничения, основываясь на геометрии

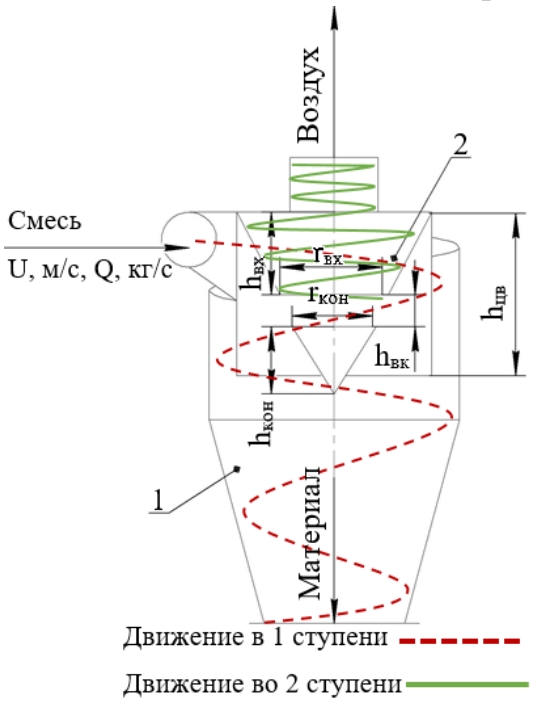

Рисунок 2 – Схема работы предлагаемого двухступенчатого циклона:
1 – цилиндроконический корпус; 2 – вихревая воронка (вторая ступень очистки).

второй ступни аппарата. Радиус конуса в сечении на высоте z задается линейной функцией:

$$r_к(z) = r_{мин} + \frac{r_{макс} - r_{min}}{H} z, 0 \le z \le H. \quad (1)$$

Цилиндр, расположенный над конусом в области $H < z \le H + H_ц$, с постоянным радиусом $r_ц(z)=const$. Область пространства, где находится частица, ограничена:

$$\sqrt{x^2 + y^2} \le \begin{cases} r_к(z), & 0 \le z \le H, \\ r_ц, & H < z \le H + H_ц, \end{cases} \quad 0 \le z \le H + H_ц. \quad (2)$$

Скорость газового потока внутри вихревой воронки имеет две основные компоненты, тангенциальную скорость U_θ, зависящую от радиуса:

$U_\theta = U_0 \frac{r_{мин}}{r}, r = \sqrt{x^2 + y^2} > 0$, где U_0 - заданная тангенциальная скорость у основания конуса (на радиусе $r_{мин}$). И осевую скорость U_z , определяемую объемным расходом газа Q и площадью поперечного сечения аппарата $A(z)$:

$$U_z(z) = \frac{Q}{A(z)}, \; A(z) = \begin{cases} \pi r_к^2(z), & 0 \le z \le H \\ \pi r_Ц^2, & H < z \le H + H_ц. \end{cases} \quad (3)$$

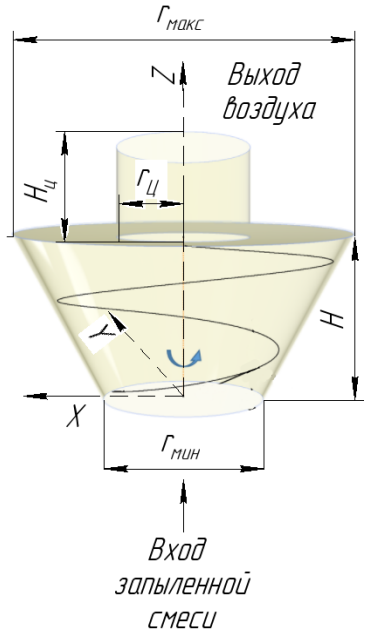

Рисунок 3 – Схема определения геометрических ограничений.

При проекции скорости в декартовые координаты, система уравнений, описывающая скорость, примет вид:

$$\begin{cases} U_x = -U_\theta(r) sin\theta, \\ U_y = U_\theta(r) cos\theta, \;\; \theta = arctan2(y, x) \\ U_z = U_z(z), \end{cases} \quad (4)$$

где $arctan2(y,x)$ - это обобщённая арктангенс-функция, возвращающая значение угла θ в диапазоне $(-\pi,\pi]$ с учётом знаков x и y, в отличие от обычной функции $arctan2(y,x)$, не определённой при $x=0$ и не различающей направления в разных квадрантах. Такой подход обеспечивает корректное преобразование координат при описании вихревого движения и исключает неоднозначности при расчётах в численной модели. Для определения положения пылегазовой частицы в вихревой воронке, примем, что частица представляется как материальная точка с идеальной сферической формой диаметром $d_ч$, плотностью $\rho_ч$, находящаяся под действием вихревого воздушного потока с плотностью $\rho_г$, динамической вязкостью μ. На частицу действуют следующие силы (рисунок 4): сила сопротивления $\vec{F_с} = \frac{m_ч}{\tau_ч}(U_г - U_ч)$, сила тяжести $\overrightarrow{F_т} = m_ч g$, сила Архимеда $\overrightarrow{F_а} = -V_ч p_г g$, центробежная сила $\overrightarrow{F_ц} = m_ч a_Ц$. В системе движения частицы в проекциях на x,y,z $r=(x,y,z)$ – положение частицы, $U=(U_x,U_y,U_z)=\frac{dr}{dt}$ – скорость частицы, $V_г = (V_x, V_y, V_z)$ – скорость газа в точке частицы. Масса частицы: $m_ч = \frac{\pi}{6}\rho_ч d_ч^3$, время релаксации частицы $\tau_р = \frac{\rho_ч d_ч^2 C_c}{18\mu}$, где C_c– поправка Каннингема. Движение частицы по второму закону Ньютона для данной системы примет вид:

$$m_{\text{ч}}\frac{dU}{dt} = \overrightarrow{F_{\text{с}}} + \overrightarrow{F_{\text{т}}} + \overrightarrow{F_{\text{а}}} + \overrightarrow{F_{\text{ц}}}. \quad (5)$$

В инерциальной системе координат центробежная сила формально не действует, но чтобы учесть эффект вращения, вводится центробежное ускорение $a_{\text{Ц}}$ (8), которое добавляется в правую часть уравнения движения (6) и (7). Это эквивалентно рассмотрению движения в локально вращающейся системе отсчета.

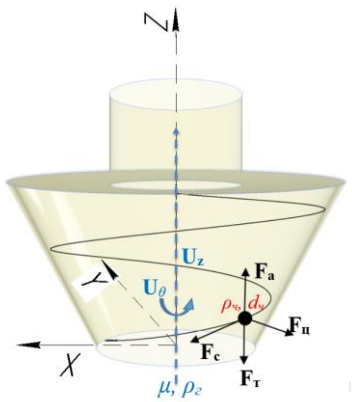

Рисунок 4 – Схема сил, действующих на частицу пыли в вихревой воронке.

Подставив выражение сил и разделив на $m_{\text{ч}}$ получаем:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{р}}}(V_{\text{г}} - U) + g\left(1 - \frac{p_{\text{г}}}{p_{\text{ч}}}\right) + a_{\text{Ц,х,у}}. \quad (6)$$

При проецировании приложенных сил на оси, с учётом координат, получим выражение:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_{\text{x}}, \frac{dy}{dt} = U_{\text{y}}, \frac{dz}{dt} = U_{\text{z}} \\ \frac{dU_{\text{x}}}{dt} = \frac{V_{\text{x}} - U_{\text{x}}}{\tau_{\text{р}}} + a_{\text{ц,x}} \\ \frac{dU_{\text{y}}}{dt} = \frac{V_{\text{y}} - U_{\text{y}}}{\tau_{\text{р}}} + a_{\text{ц,y}} \\ \frac{dU_{\text{z}}}{dt} = \frac{V_{\text{z}} - U_{\text{z}}}{\tau_{\text{р}}} - g\left(1 - \frac{p_{\text{г}}}{p_{\text{ч}}}\right). \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку частица движется в поле вращающегося потока, на неё действует центробежная сила. Тангенциальная компонента скорости частицы определяется как $U_{\theta} = \frac{xU_{\text{y}} - yU_{\text{x}}}{r}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Тогда центробежное ускорение, направленное радиально наружу, определяется выражением:

$$\begin{cases} a_{\text{ц,x}} = \frac{U_{\theta}^2}{r^2}x \\ a_{\text{ц,y}} = \frac{U_{\theta}^2}{r^2}y. \end{cases} \quad (8)$$

В случае, когда $r \to 0$, считается, что $a_{\text{ц,x}} = 0, a_{\text{ц,y}} = 0$.

При решении системы уравнений необходимо учитывать граничные условия и ограничения, которые определяются геометрией (2). А также при достижении стенок вихревой воронки, либо выхода за пределы по оси z, движение считается завершённым и необходимо завершить интегрирование.

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r_{\text{к}}(z) \text{ или } \sqrt{x^2 + y^2} = r_{\text{ц}}.$$

При расчёте траектории движения частицы, необходимо учитывать неравномерную структуру ядра потока, формирующуюся в вихревой воронке, поток проходит через усечённый конус и цилиндрическую вставку с меньшим радиусом. Это вызывает сжатие центральной части потока и перераспределение осевой и радиальной составляющих скорости (рисунок 5). В результате формируется неравномерное вихревое ядро с усиленной централизацией, что оказывает заметное влияние на траекторию движения частиц.

Для количественного учёта геометрических эффектов на движение частиц, вводится поправочный коэффициент k, основанный на законе сохранения массы, а также масштабирующий центробежное ускорение в уравнении движения. Он

отражает совокупное влияние:

– расширение усеченного конуса, k_1 (9);

– переход потока в цилиндрическую вставку с меньшим радиусом k_2 (10).

Таким образом, коэффициенты k_1 и k_2, определяемые как квадраты отношений радиусов, отражают влияние геометрии на перераспределение потока:

$$k_1 = (\frac{r_{\text{мин}}}{r_{\text{макс}}})^2. \quad (9)$$

$$k_2 = (\frac{r_{\text{ц}}}{r_{\text{макс}}})^2. \quad (10)$$

Однако, учитывая, что центробежное ускорение уже пропорционально радиусу (8), окончательный вид коэффициента необходимо задать в линейной форме и определять, как среднегеометрическое значение:

$$k = \sqrt{k_1 \cdot k_2} = \frac{r_{\text{мин}} \cdot r_{\text{ц}}}{r^2_{\text{макс}}}. \quad (11)$$

Это обеспечивает линейную связь с радиальной составляющей ускорения, не усиливая зависимость до четвёртой степени по радиусу, как в прямом перемножении квадратов.

Данный коэффициент применяется исключительно к центробежному ускорению, так как именно оно зависит от радиального распределения скоростей. Тогда система уравнений движения частиц (7) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_{\text{x}}, \frac{dy}{dt} = U_{\text{y}}, \frac{dz}{dt} = U_{\text{z}} \\ \frac{dU_{\text{x}}}{dt} = \frac{V_{\text{x}} - U_{\text{x}}}{\tau_{\text{р}}} + k \cdot a_{\text{ц,x}} \\ \frac{dU_{\text{y}}}{dt} = \frac{V_{\text{y}} - U_{\text{y}}}{\tau_{\text{р}}} + k \cdot a_{\text{ц,y}} \\ \frac{dU_{\text{z}}}{dt} = \frac{V_{\text{z}} - U_{\text{z}}}{\tau_{\text{р}}} - g\left(1 - \frac{p_{\text{г}}}{p_{\text{ч}}}\right). \end{cases} \quad (12)$$

Для численного решения системы методом конечных разностей с шагом по времени Δt, применяется второй порядок аппроксимации, с учетом ускорений:

$$\begin{cases} x(\Delta t) = x + U_{\text{x}}\Delta t + \frac{1}{2}((V_{\text{x}} - U_{\text{x}}) \cdot \frac{18\mu}{p_{\text{ч}} \cdot d^2_{\text{ч}} \cdot C_{\text{c}}} + k a_{\text{ц,x}}) \cdot (\Delta t)^2 \\ y(\Delta t) = y + U_{\text{y}}\Delta t + \frac{1}{2}((V_{\text{y}} - U_{\text{y}}) \cdot \frac{18\mu}{p_{\text{ч}} \cdot d^2_{\text{ч}} \cdot C_{\text{c}}} + k a_{\text{ц,y}}) \cdot (\Delta t)^2 \\ z(\Delta t) = z + U_{\text{z}}\Delta t + \frac{1}{2}((V_{\text{z}} - U_{\text{z}}) \cdot \frac{18\mu}{p_{\text{ч}} \cdot d^2_{\text{ч}} \cdot C_{\text{c}}} - g\left(1 - \frac{p_{\text{г}}}{p_{\text{ч}}}\right) \cdot (\Delta t)^2. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, при $k \to 1$ геометрия приближена к равномерной цилиндрической, перераспределение скоростей минимально, при $k<1$ наблюдается значительное сжатие потока и усиление центростремительных эффектов, что способствует выносу частиц к стенкам и повышению эффективности отделения. Так коэффициент k выполняет роль интегральной геометрической поправки, позволяющей учесть влияние формы второй ступени циклона на характер действия центробежных сил и траекторию частиц.

На основе системы уравнений (12), численно решённой в среде Python с использованием библиотеки SciPy (функция solve_ivp) методом Рунге-Кутты

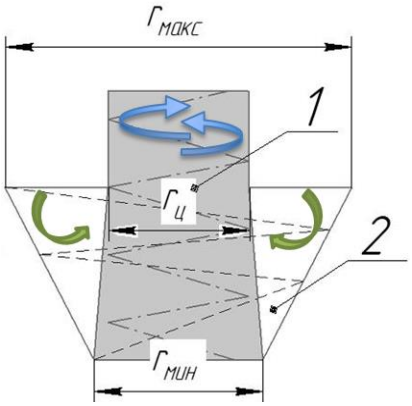

Рисунок 5 – Схема распределения потоков: 1 – ядро потока; 2 – радиальный поток.

8-го порядка (DOP853), при принятых размерах $r_ц$= 75 мм и $r_{макс}$= 175 мм, с рассчитанным коэффициентом k=0,22, построены траектории движения частиц размерностью от 10, 80, 150 мкм. Результаты моделирования траекторий представлены на рисунке 6.

При заданных параметрах, минимальный радиус закрутки частицы составил $R_{ч.\ мин}$= 85 мм для частицы 10 мкм, а максимальный $R_{ч.\ макс}$= 150 мм для частицы 150 мкм. Таким образом, использование данных радиусов обеспечит плавный переход к выходному патрубку, что способствует сохранению вихревого потока и снижению гидравлических потерь, а также повышению степени отделения мелкодисперсного компонента от пыли в вихревой воронке.

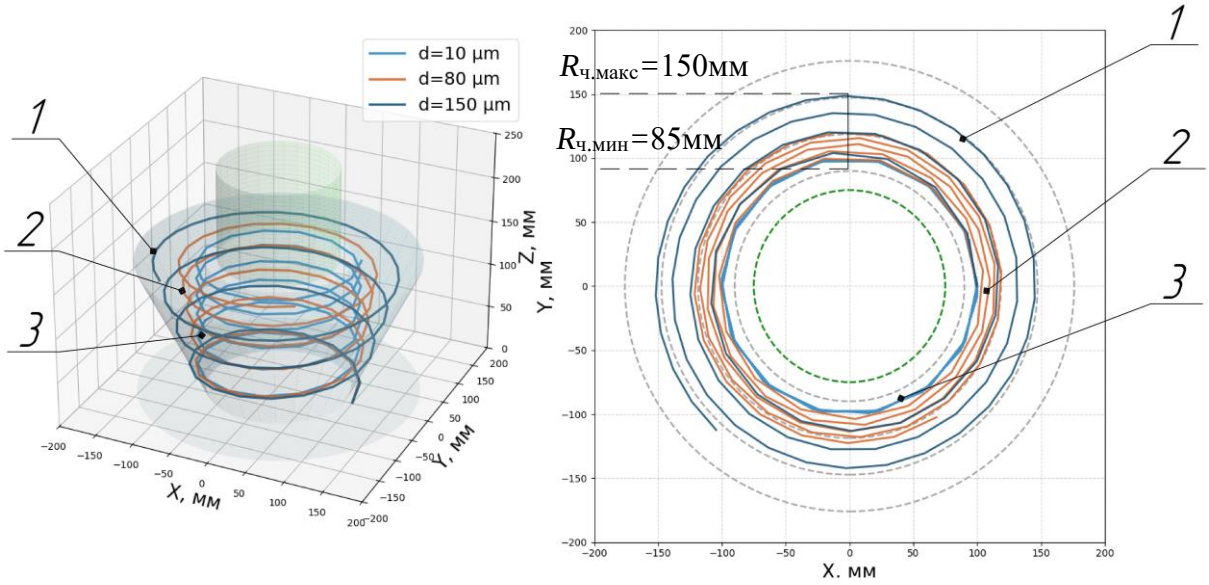

Рисунок 6 – Схема траекторий движения частиц:
1 – траектория частицы размером 150 мкм; 2 – траектория частицы размером 80 мкм; 3 – траектория частицы размером 10 мкм.

Представленная система уравнений (1–12), описывающая газодинамику и траекторию движения частиц в двухступенчатом циклоне, служит теоретической основой для численного моделирования процессов в CFD-пакетах. На основе данной модели реализуется процесс моделирования в Solid Works Flow Simulation методом конечных объёмов.

В третьей главе изложены программа и методика лабораторных экспериментальных исследований. Программа исследований включала:

1) Численное моделирование:

– проектирование параметрической 3d-модели двухступенчатого циклона-разгрузителя для изменения размеров: вихревой воронки, конического отбойника, цилиндрической вставки, расстояния между отбойником и вихревой воронкой;

– проведение поисковых численных экспериментов, с целью выявления влияния отдельных параметров на эффективность отделения, и определение

рабочего диапазона интервалов варьирования исследуемых параметров;

– составление матрицы многофакторного эксперимента и его проведение в среде численного моделирования в ПО Solid Works Flow Simulation.

2) Проведение эксперимента:

– разработку и изготовление экспериментальной установки для изучения аэродинамических параметров воздушного потока, влияющих на протекание процесса отделения мелкодисперсных компонентов;

– составление матрицы многофакторного эксперимента и проведение лабораторных испытаний;

– определение рациональных технологических и конструктивных параметров двухступенчатого циклона-разгрузителя;

– проведение производственных испытаний экспериментального образца двухступенчатого циклона-разгрузителя.

Методом априорного ранжирования выявлено, что конструктивные элементы, такие как высота и диаметр вихревой воронки, отбойного конуса, высота конической вставки, расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, в большей мере оказывают существенное влияние на эффективность процесса отделения.

Для определения рациональных конструктивно-режимных параметров двухступенчатого циклона-разгрузителя проведены поисковые эксперименты в среде компьютерного моделирования с варьированием геометрических размеров с шагом 5 мм для: диаметра вихревой воронки (100-270 мм), высоты вихревой воронки $h_{вх}$ (100-235 мм), высоты цилиндрической вставки $h_{цв}$ (250-400 мм), расстояния от вихревой воронки до отбойного конуса $h_{вк}$ (45-145 мм), высоты отбойного конуса $h_{кон}$ (50-170 мм), диаметра отбойного конуса $d_{кон}$ (50-150 мм).

В качестве основных граничных параметров процесса заданы: скорость на входе (15, 20, 25 м/с), давление на выходе (101325 Па), количество частиц (1000 шт.), плотность среды (1,56 кг/м³), массовая концентрация (0,105; 0,205; 0,305 кг/с), геометрия циклона. Частицы приняты идеально сферическими с размерностью 10…150 мкм с шагом 20, в количестве 1000 шт.

Для оценки эффективности отделения выбран среднеарифметический критерий эффективности $\bar{\eta}$, для каждой фракции η_i, который в свою очередь определяется по формуле:

$$\eta_{\text{i}} = \frac{M_{\text{ул}-\text{i}}}{M_{0-\text{i}}} \cdot 100\% = \frac{1000-N_{\text{выл}}}{1000} \cdot 100\%, \qquad (14)$$

где $M_{\text{ул-i}}$ – масса фактически уловленных частиц, кг;

$M_{0\text{-i}}$ – масса фракции в исходной смеси, кг;

$N_{\text{выл}}$ – количество вылетевших частиц в выхлопной патрубок, шт.

На основании проведенных поисковых исследований и теоретических положений центробежной сепарации, в качестве значимых факторов выделены скорость потока на входе в циклон, массовый расход смеси, высота отбойного конуса и высота вихревой воронки.

Значение факторов и уровни их варьирования представлены в Таблице 1,

проведение многофакторного эксперимента выполнено в соответствии с планом Бокса-Бенкена на 4 фактора.

В качестве отклика выбрана эффективность улавливания η_i (14).

Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования факторов.

Факторы	Условные обозначения	Код	Уровни факторов			Интервал варьирования
			-1	0	+1	
Массовый расход смеси, кг/сек	q	X_1	0,105	0,205	0,305	0,1
Скорость потока на входе, м/сек	U	X_2	15	20	25	5
Высота вихревой воронки, мм	$h_{вх}$	X_3	145	165	185	20
Высота отбойного конуса, мм	$h_{кон}$	X_4	120	140	160	20

Целью экспериментальных исследований являлась проверка основных теоретических положений работы, а также определение рациональных параметров процесса отделения мелкодисперсных компонентов.

По результатам численного моделирования спроектирован и изготовлен двухступенчатый циклон со сменными конструктивными элементами (рисунок 8).

Опыты проводились на экспериментальной установке (рисунок 9), по аналогичной матрице и плану, составленной при численном моделировании (таблица 1).

Рисунок 8 – Общий вид двухступенчатого циклона:
1 – вихревая воронка; 2 – конический отбойник; 3 – цилиндроконический корпус.

Производственные испытания проводились на комбикормовом мини-заводе компании ООО «АгроПоставка» (рисунок 10) на животноводческом комплексе АО Чкаловское (п. Восход), с использованием сравнительного метода при установке базового циклона-разгрузителя БЦР-450 в систему пневмотранспорта. Эффективность улавливания определялась путем взвешивания фильтр-элементов через каждые 640 кг, аналогично лабораторным исследованиям.

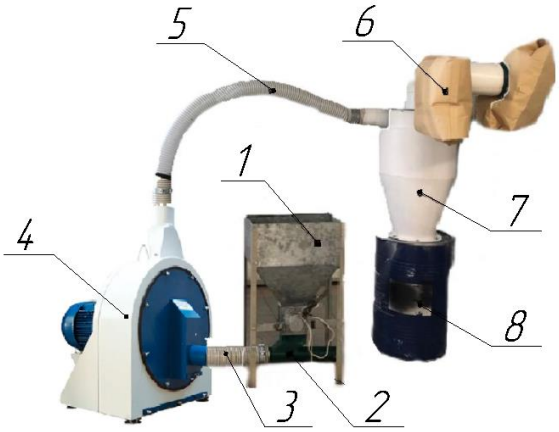

Рисунок 9 – Общий вид экспериментальной установки:
1 – бункер дозатор; 2 – регулятор потока; 3 – канал регулятора; 4 – пневмо-дробилка; 5– канал основной; 6 – фильтр-мешок; 7 – двухступенчатый циклон-разгрузитель; 8 – приёмная ёмкость.

Рисунок 10 – комбикормовый мини- завод: 1 – пневматическая дробилка ДПМ-11; 2 – циклон; 3 – фильтрующий элемент; 4 – смеситель СГ-4; 5 – ТСШ-200; 6 – эжектор.

Масса фактически уловленных частиц циклоном рассчитывалась как разность между массой, осевшей на фильтрующем элементе, и массой исходного материала.

В четвертой главе представлены основные результаты экспериментальных исследований и дан их анализ.

В связи с ограничением численности запущенных частиц при моделировании, в отличие от натурных экспериментов, вводится корректирующий коэффициент, учитывающий долю частиц размером более 150 мкм, улавливаемость которых принята равной 100 %.

Тогда общая эффективность процесса отделения, с учётом всех фракций при моделировании, рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{моді}} = \eta_{\text{і}} \cdot \alpha + (1 - \alpha) \cdot 100\%, \quad (15)$$

где α – доля содержания частиц размерностью <150 мкм в исходной смеси, путем проведения ситового анализа установлено значение α=0,09 (зависит от модуля помола).

При статистической обработке результатов, полученных в ходе моделирования, получена следующая регрессионная модель, описывающая процесс отделения (16):

$$\eta_{\text{мод}} = 98.387 + 0.576q + 0.126U - 0.0323h_{\text{вх}} - 0.000733h_{\text{кон}} - 0.499q^2 - 0.00144U^2 + 0.000114h_{\text{вх}}^2 - 0.00000965h_{\text{кон}}^2 - 0.0099qU - 0.0009qh_{\text{вх}} - 0.000113qh_{\text{кон}} - 0.000168Uh_{\text{вх}} + 0.000025Uh_{\text{кон}} + 0.0000163h_{\text{вх}}h_{\text{кон.}} \quad (16)$$

Коэффициент детерминации R^2=0.99.

В результате проведённых экспериментальных исследований установлена зависимость эффективности отделения $\eta_{экс}$ от технологических параметров – массового расхода смеси (q), скорости потока на входе *(U)* и от конструктивных – высоты вихревой воронки *($h_{вх}$)* и высоты конуса *($h_{кон}$)*. Получено уравнение (17), которое характеризует влияние каждого параметра на эффективность процесса отделения:

$$\eta_{экс} = 107.7 - 2.808q + 0.0461U - 0.0893h_{вх} - 0.0211h_{кон} + 8.34q^2 + 0.0002U^2 + 0.00029h_{вх}^2 + 0.000161h_{кон}^2 + 0.0648qU - 0.0017qh_{вх} - 0.0121qh_{кон} + 0.00031Uh_{вх} - 0.000628Uh_{кон} - 0.0000718h_{вх}h_{кон}. \quad (17)$$

Коэффициент детерминации R^2=0.96.

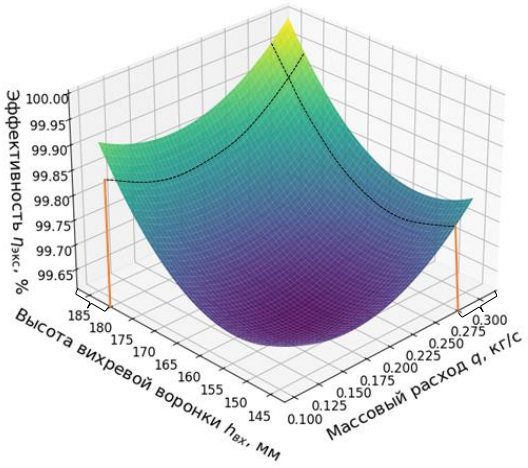

Рисунок 13 – Влияние q и $h_{вх}$ на $\eta_{экс}$.

Анализ значений коэффициентов уравнения регрессии свидетельствует о влиянии рассматриваемых факторов на эффективность процесса отделения. Отрицательные линейные коэффициенты при параметрах q и $h_{вх}$ указывают на снижение эффективности сепарации с их увеличением в нижней части исследуемого диапазона. Однако положительный знак коэффициента при квадратичном члене q^2 свидетельствует о наличии экстремума: при значениях q>0,25 кг/с эффективность отделения начинает возрастать, что подтверждается соответствующей формой поверхности отклика (рисунок 13), максимальная эффективность достигается при q от 0,275 до 0,305 и при $h_{вх}$ от 180 до 185 мм.

Рациональные значения конструктивно-режимных параметров процесса отделения продуктов дробления зерна в двухступенчатом циклоне в результате нахождения экстремума уравнения (17) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Рациональные значения конструктивно-режимных параметров.

U	q	$h_{вх}$	$h_{кон}$
25 м/с	0.305 кг/ с	185 мм	120 мм

Скорость воздушного потока U оказывает положительное влияние на эффективность, обусловленную усилением центробежных сил и улучшением условий осаждения частиц.

Максимальное значение эффективности достигается при U=25 м/с. Конструктивные параметры циклона также играют ключевую роль: при $h_{вх}$=185мм формируется устойчивый вихревой поток с оптимальной геометрией вращения, а при $h_{кон}$=120 мм минимизируется вторичный унос частиц восходящим потоком.

На рисунке 14 представлены одномерные зависимости эффективности отделения от каждого фактора при фиксированных уровнях остальных параметров: q=0,305кг/с, U=25 м/с, $h_{вх}$=185 мм и $h_{кон}$=120 мм.

На графике зависимости эффективности от массового расхода (рисунок 14, а) наблюдается параболический характер кривой: в области q <0.2 кг/с эффективность падает, однако при q> 0.2 кг/с происходит рост эффективности, что соответствует положительному коэффициенту при q^2 в уравнении регрессии.

Зависимость $\eta=f(U)$ (рисунок 14, б) демонстрирует устойчивый рост эффективности с увеличением скорости потока, что связано с усилением центробежных сил. Максимум достигается при U=25 *м/с*. График $\eta=f(h_{вх})$ (рисунок 14, в) указывает на снижение эффективности при уменьшении высоты воронки, с минимальным значением от 145 до 160 мм. Влияние $h_{кон}$ (рисунок 14, г) проявляется в уменьшении эффективности в диапазоне от 120 до 155 мм.

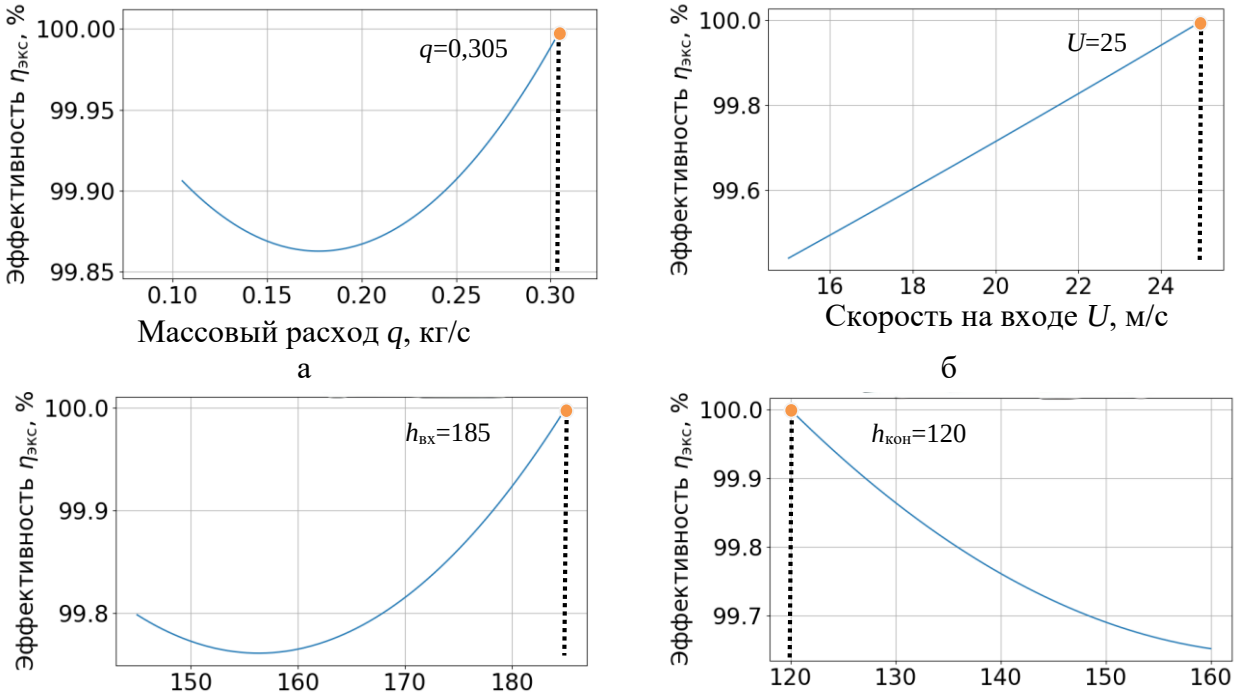

Рисунок 14 – Зависимость $\eta_{экс}$ от исследуемых факторов:
а – зависимость q от $\eta_{экс}$; б – зависимость U от $\eta_{экс}$;
в – зависимость $h_{вх}$ от $\eta_{экс}$; г – зависимость $h_{кон}$ от $\eta_{экс}$.

Для комплексного анализа взаимного влияния факторов, построены трёхмерные поверхности отклика $\eta=f\ (U,\ h_{вх})$ и $\eta=f\ (q,\ h_{кон})$, визуализирующие области экстремальных значений эффективности (рисунки 15,16).

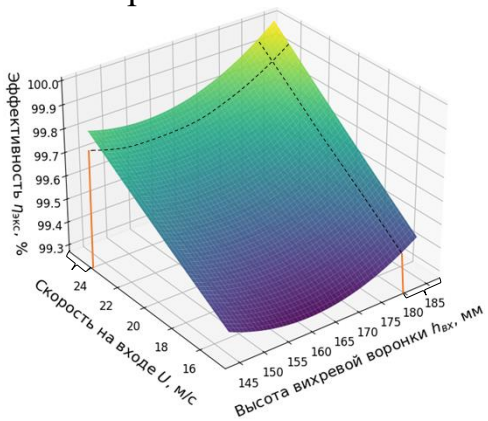

Рисунок 15 – Влияние $h_{вх}$ и U на $\eta_{экс}$,%.

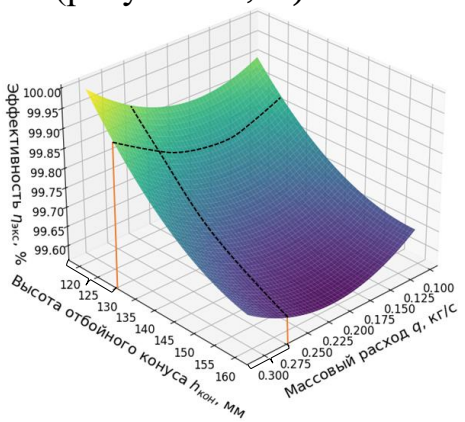

Рисунок 16 – Влияние q и $h_{кон}$ на $\eta_{экс}$, %.

Поверхность $\eta\ =\ f\ (U,\ h_{вх})$ (рисунок 15) имеет вытянутый максимум в области высоких значений скорости воздуха ($U \geq 23$ м/с) и высоты вихревой

воронки ($h_{вх} \geq 180$ мм), что отражает синергетический эффект этих параметров. На поверхности $\eta = f(h_{кон}, q)$ (рисунок 16) прослеживается область максимума при сочетании $q \approx 0.305$кг/с и $h_{кон} \approx 120$ мм, что соответствует оптимальным геометрическим условиям для формирования стабильного вихревого потока.

Результаты экспериментальных исследований сопоставлены с математической моделью, разработанной в главе 4, выраженной уравнением (17), (рисунок 17).

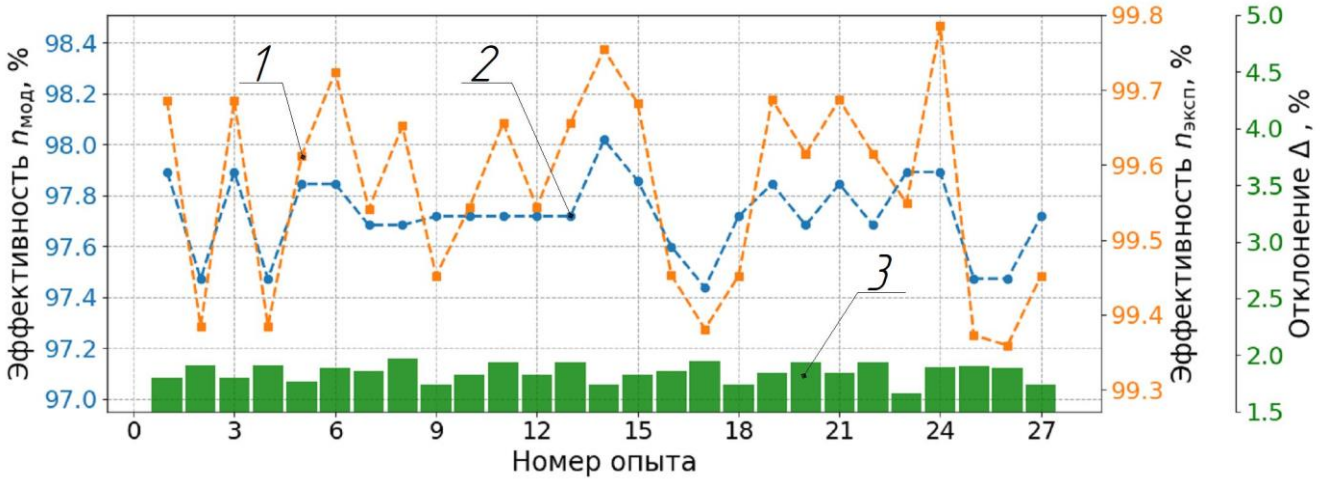

Рисунок 17 – Отклонение значений эффективности процесса отделения при компьютерном моделировании и физическом эксперименте в сходственных точках плана эксперимента:
1 – эффективность $\eta_{эксп}$; 2 – эффективность $\eta_{мод}$; 3 – отклонение Δ.

Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями эффективности не превышает 2 % в сходственных точках плана эксперимента.

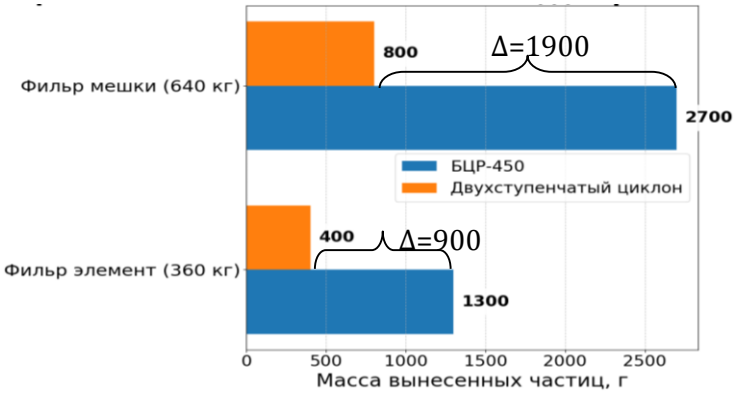

Рисунок 18 – Эффективность процесса отделения при производственных испытаниях.

Производственные испытания в условиях АО «Чкаловское» показали, что количество унесенных фракций в выхлопной патрубок предлагаемого циклона в 3 раза меньше, чем у серийно используемого решения БЦР-450.

Так, при удельной нагрузки 800 кг/ч и 640 кг перерабатываемого материала, масса фракций, вылетевших в выхлопной патрубок стандартного циклона, составила 2,5 кг, а у предлагаемого решения при одинаковых условиях - 0,6 кг, что на 76% меньше (рисунок 18), а также использование двухступенчатого циклона вместо серийно используемого циклона БЦР-450, на имеющимся у них комбикормовом заводе, улучшили условия труда, уменьшили концентрацию запыленности цеха и увеличили выход продукции на 3 кг с 1000 кг пропущенного материала.

Так же следует отметить, что при изменении фильтрующего элемента на

фильтр-мешок, эффективность предлагаемого решения не изменяется, а эффективность БЦР-450 уменьшается, в связи с увеличением вторичных закручивающих потоков.

Проведён сравнительный анализ с серийным циклоном БЦР-450, показавший, что применение двухступенчатого циклона-разгрузителя позволяет снизить потери мелкодисперсной фракции с 2,5 кг до 0,6 кг на 640 кг обработанного зерна, что соответствует уменьшению на 76 %. В отличие от БЦР-450, эффективность новой конструкции сохраняется стабильной и достигает уровня 99,9 % при повышении производительности.

В пятой главе выполнена оценка экономической эффективности внедрения предлагаемой разработки, из которой следует, что применение двухступенчатого циклона в линии производства комбикормов обеспечивает уменьшение выбросов мелкодисперсного компонента продуктов дробленого зерна, тем самым, сохранив его в готовой продукции.

Сокращение потерь экономит 74,31 руб., с каждой тонны перерабатываемого зерна, с учетом средней стоимости готовых рассыпных комбикормов около 25 руб./кг. При этом потребляемая мощность дробилки увеличивается на 0,2%, а её производительность на 1,5%, за счёт снижения сопротивления фильтр-мешка, установленного на выхлопном патрубке циклона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что повысить эффективность отделения мелкодисперсной фракции продуктов дробления зерна от воздушного потока, возможно за счёт установки второй ступени очистки, позволяющей изменить траекторию движения потока и увеличить площадь контакта с внутренней поверхностью циклона.

2. Разработана конструктивно-технологическая схема двухступенчатого циклона, обеспечивающая повышение эффективности отделения мелкодисперсной фракции продуктов дробления зерна от воздушного потока, за счёт установки вихревой воронки и отбойного конуса перед выходным патрубком циклона, позволяющая отделить до 99,9% продуктов дробленого зерна от воздушного потока.

3. Разработана математическая модель сепарации частиц в вихревой воронке, с учётом поправочного расчетного коэффициента *k*, отражающего влияние формы второй ступени циклона на характер действия центробежных сил и траекторию движения частиц.

4. Обоснованы рационально-конструктивные параметры процесса отделения в двухступенчатом циклоне, максимальная эффективность отделения достигнута при установленных параметрах: *U=25 м/с, q= 0.305 кг/с,* $h_{вх}$*=185 мм,* $h_{кон}$*=120 мм.* Относительная погрешность полученных результатов с теоретической моделью в сходственных точках составила не более 2 %.

5. Производственные испытания показали, что двухступенчатый циклон обеспечил сокращение выбросов мелкодисперсного компонента дробленых частиц в 3 раза по сравнения со штатным циклоном БЦР-450, что в массовом эквиваленте составило 3 кг с 1000 кг перерабатываемой продукции.

6. Экономический эффект от внедрения двухступенчатого циклона в линию

производства комбикорма составил 75 рублей с одной тонны, только за счёт сокращения потерь перерабатываемой продукции при стоимости готового комбикорма 25 руб./кг.

Рекомендации производству

Двухступенчатый циклон-разгрузитель рекомендуется для отделения мелкодисперсного компонента продуктов дробления зерна в системах пневмотранспорта после пневматической дробилки, на комбикормовых мини-заводах как с вертикальным, так и с горизонтальным смесителем.

В условиях эксплуатации комбикормовых мини-заводов, в линии которых установлена молотковая пневматическая дробилка с производительностью 800-1100 кг/ч, целесообразно устанавливать следующие параметры: массовая концентрация смеси q=0,305 кг/с; скорость воздушного потока на входе в циклон U=25 м/с; высота вихревой воронки $h_{вх}$= 185 мм; высота отбойного конуса $h_{кон}$=120 мм.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением дальнейших научных исследований, является адаптации двухступенчатого циклона-разгрузителя для таких отраслей промышленности как: пищевая, деревообрабатывающая, химическая и др., использующие системы пневмотранспорта для перемещения сыпучих мелкодисперсных продуктов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Блёскин С.С. Разработка двухступенчатого циклона / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53, № 2. – С. 101-109.

2. Блёскин С.С. Обоснование конструктивных параметров вихревой воронки двухступенчатого циклона с применением компьютерного моделирования / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин // Инновации и продовольственная безопасность. – 2024. – № 1. – С. 175-184.

3. Автоматизация миникомбикормового завода / Е. А. Пшенов, А. А. Диденко, С. С. Блёскин, В. А. Годорожа // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 38-46.

4. Блёскин С.С. Определение рациональных конструктивно-режимных параметров двухступенчатого циклона / Е.А. Пшенов, С.С. Блёскин // Вестник Омского ГАУ. – 2025. – № 2 (58). – С. 161–172.

Патенты Российской Федерации:

5. Пат. 220965 U1 Рос. Федерация, МПК B04C 5/04, B04C 5/103, B01D 45/12. Циклон с конической вставкой : № 2023110587 : заявл. 25.04.2023 :опубл. 11.10.2023 / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет".

6. Пат. 217720 U1 Рос. Федерация, МПК B04C 5/00, B01D 45/12. Циклон с выводящим каналом : № 2022129886 : заявл. 17.11.2022 :опубл. 13.04.2023 / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет".

7. Пат. 208117 U1 Рос. Федерация, МПК B04C 9/00, B01D 45/12. Циклон : № 2021106836 : заявл. 15.03.2021 :опубл. 03.12.2021 / Е. А. Пшенов, А. А. Мезенов, С. С. Блёскин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет".

8. Пат. 227378 U1 Рос. Федерация, МПК B04C 5/103, B01D 45/12. Циклон с эжектором : № 2024106942 : заявл. 18.03.2024 :опубл. 18.07.2024 / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет".

9. Пат. 233659 U1 Рос. Федерация, МПК B04C 5/103, B01D 45/12. Циклон : № 2025100030 : заявл. 07.01.2025 :опубл. 29.04.2025 / Е. А. Пшенов, С. С. Блёскин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет".

Публикации в журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций:

10. Блёскин, С. С. Пути повышения эффективности инерционных пылеуловителей / С. С. Блёскин, Е. А. Пшенов // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : сб. V Всерос. (нац.) науч. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 18 дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд. центр Новосиб. гос. аграр. ун-та "Золотой колос", 2020. – С. 270-273.

11. Блёскин, С. С. Анализ конструкций циклонных пылеуловителей / С. С. Блёскин, Е. А. Пшенов // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования : материалы XII Регион. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти доц. М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 11 нояб. 2020 г. – Новосибирск :Новосиб. гос. аграр. ун-т, 2020. – С. 27-30.

12. Блёскин, С. С. Теоретические предпосылки описания движения пылегазового потока в вихревых аппаратах / С. С. Блёскин, Е. А. Пшенов // Теория и практика современной аграрной науки : сб. IV Нац. (Всерос.) науч. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 26 февр. 2021 г. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск : Изд. центр Новосиб. гос. аграр. ун-та "Золотой колос", 2021. – С. 456-461.

13. Блёскин, С. С. Эксплуатация циклонных аппаратов в комбикормовом производстве / С. С. Блёскин, Е. А. Пшенов // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти доц. М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–11 нояб. 2023 г. – Новосибирск: Изд. центр НГАУ "Золотой колос", 2023. – С. 258-261.