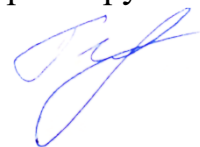


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный аграрный университет»

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Мезенов Артем Анатольевич

Новосибирск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	12
1.1 Обзор технологических схем приготовления кормов	14
1.2 Характеристика продуктов измельченного зерна для приготовления кормов.....	19
1.3 Анализ существующих конструкций пневмосепараторов пневматических молотковых дробилок.....	22
1.4 Направления развития конструкций пневмосепараторов пневматических молотковых дробилок.....	30
1.5 Выводы по главе.....	38
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ.....	39
2.1. Анализ технологии очистки зерна от примесей	39
2.2. Разработка и обоснование конструктивной схемы и принципа работы пневмосепаратора пневматической молотковой дробилки.....	43
2.3. Обоснование скорости частицы в воздушном потоке винтового канала пневматического сепаратора.....	46
2.4. Обоснование скорости частицы в криволинейном воздушном потоке пневматического сепаратора.....	56
2.5. Выводы по главе.....	83
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	86
3.1. Изучение траектории движения воздушного потока в пневмосепараторе молотковой дробилки	87

3.2. Обоснование длины пневмопровода на входном патрубке пневматической молотковой дробилки	90
3.3. Определение скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки	933
3.4. Определение мощности пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором	94
3.5. Исследование технико-энергетических параметров пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором	96
3.6. Исследование эффективности очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилки от металломагнитных примесей	100
3.7. План многофакторного эксперимента	1033
3.8. Методика проведения производственных испытаний пневмосепаратора пневматической молотковой дробилки	110
3.9. Выводы по главе.....	115
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	117
4.1. Траектории движения воздушного потока в пневмосепараторе молотковой дробилки	117
4.2. Результаты экспериментальных исследований обоснования длины пневмопровода на входном патрубке пневматической молотковой дробилки	119
4.3. Результаты экспериментальных исследований определения скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки.....	122
4.4. Результаты экспериментальных исследований мощности пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором	123

4.5. Результаты экспериментальных исследований технико-энергетических параметров пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором.....	124
4.6. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилки от металломагнитных примесей.....	128
4.7. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки зерна от примесей в пневмосепараторе молотковой дробилки	130
4.8. Результаты производственных испытаний пневмосепаратора молотковой дробилки.....	138
4.9. Выводы по главе.....	141
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ПНЕВМОСЕПАРАТОРА МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Патент Российской Федерации.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Координаты точек частиц воздушного потока на винтовой траектории их движения.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Экспериментальные значения скорости воздушного потока при помощи анемометра Testo 405i.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Результаты экспериментальных исследований.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Новосибирский ГАУ».....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Акт внедрения в производственный процесс АО «Чкаловское»	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В рамках стратегии научно-технологического развития России до 2030 года особое внимание уделяется переходу к высокопродуктивному и экологически чистому сельскому хозяйству. Необходимо разрабатывать и внедрять системы, обеспечивающие рациональное и высокоэффективное использование технологического оборудования в животноводстве, а также совершенствовать методы хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Цель — создание безопасных и качественных продуктов питания, включая функциональные [76].

Основной целью сельского хозяйства остаётся повышение урожайности зерновых культур, чтобы удовлетворить растущий спрос населения на продукты питания. Однако в настоящее время этот процесс затруднён из-за проблем с зерноочистительной техникой, что приводит к нарушению технологии непрерывной обработки зерна после сбора урожая [78,111,122,123,124,126].

Качество зерна во многом определяется тем, насколько технические средства соответствуют масштабу задачи и насколько рациональна технология послеуборочной обработки. Существующие технологические линии не обеспечивают эффективную очистку зерна от примесей и отбор высококачественного зерна без потерь. Чтобы решить эту проблему, необходимо использовать другие, более производительные рабочие органы машин, которые позволят выполнять технологические операции очистки зерна без дополнительных затрат. Также следует применять методы очистки зерна по аэродинамическим свойствам [13,53,121,125,127,140,148].

Процесс очистки зерна представляет собой комплекс технологических процедур, включающий в себя несколько этапов. В сфере агробизнеса очистка зерна играет важную роль в послеуборочной обработке зерновых культур. После сбора урожая зерно обычно содержит примеси, которые необходимо удалить. Эти примеси могут быть растительного

происхождения, например, частицы растений, семена сорняков, а также частицы почвы, насекомые и другие органические материалы. Кроме того, в зерно могут попасть посторонние предметы, такие как металлические и пластиковые детали, камни, песок и другой мусор. Это может произойти во время погрузки, транспортировки и хранения зерна в буртах [43,85,108,128-139].

В процессе изготовления кормов для животных наличие большого количества посторонних частиц и примесей в зерне может отрицательно повлиять на эксплуатационные характеристики рабочих элементов дробилки. Это происходит из-за того, что в процессе измельчения зерна посторонние частицы и примеси повреждают и разрушают рабочие органы, что приводит к их быстрому износу. Кроме того, использование неочищенного молотого зерна с примесями может нанести вред здоровью животного [59,88,95,141-147].

В настоящее время малые и средние предприятия, занимающиеся производством комбикормов, активно используют мини-заводы. Одним из основных механизмов на таких заводах является молотковая дробилка. Перед тем как приступить к измельчению, зерно проходит предварительную очистку в сепараторе, который установлен на крышке дробилки. Этот процесс направлен на удаление металломагнитных и минеральных примесей, что позволяет добиться более высокого качества комбикорма. Более того, существует возможность установки дополнительного оборудования, которое позволяет более эффективно очищать зерно от легких примесей. Однако не в полной мере используются заложенные в них технологические возможности, а эффективность очистки зерна перед измельчением требует дальнейшего совершенствования.

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 зернокармальных 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 Bracacescu 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 технологического 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 технологий 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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сельскохозяйственных производителей основной задачей является увеличение продуктивности животных. Эта задача решается различными способами: через отбор и улучшение условий содержания, а также благодаря внедрению современных технологий в процесс кормления. Особое внимание уделяется использованию технологичного оборудования, которое позволяет сделать процесс кормления более эффективным и рациональным.

Значительную часть рациона животных составляют концентрированные корма. Процесс приготовления комбикормов из доступных компонентов — один из самых важных и энергоемких в сельском хозяйстве.

В настоящее время широко используются компактные комбикормовые агрегаты, оснащённые молотковыми дробилками и вентилятором. Материал в такие агрегаты загружается с помощью разрежения воздуха, создаваемого через гибкий пневмопровод. Очистка поступающего продукта происходит во встроенном пневмосепараторе, который устанавливается на крышке дробилки. Он оснащён магнитной ловушкой или камерой для отбора минеральных примесей. Кроме того, существуют стационарные сепараторы, которые позволяют очищать зерно от лёгких примесей [104].

Однако стоит отметить, что эффективность очистки зерна от металломагнитных и минеральных примесей в этих агрегатах используется не в полной мере. Этот показатель зависит от конструктивных и технологических параметров пневмосепаратора.

Предварительная очистка зерна перед измельчением оказывает наибольшее влияние на качество производства комбикормов. Наибольшую популярность сейчас имеют сепараторы, встроенные в крышку пневматической дробилки, такие как ДПМ («АгроПоставка»), ДСК, ДКР («ДозаАгро»), ДРВ («АТМ»), ДПА, МИГ («ЕРМАШ») и др. В данных моделях дробилок конструкция встроенного сепаратора позволяет очистить зерно только от минеральных (крупных) и металломагнитных примесей.

Эффективность очистки зерна от этих примесей не соответствует требованиям, которые предъявляются к качеству кормов для животных. Поэтому возникает необходимость в разработке более совершенной системы, которая позволит полностью избавиться от минеральных и металломагнитных загрязнений [27].

Зоотехнические требования предписывают следующие этапы приготовления кормов:

1. *содержание минеральных примесей (песка) в комбикормах должно быть ограничено следующими пределами:

– для цыплят, поросят-отъемышей и телят молочного периода — не более 0,3% по ГОСТ 34109-2017;

– для молодняка крупного рогатого скота и свиней — не более 0,5% по ГОСТ 9268-2015;

– для коров и овец — не более 0,7%. В травяной муке допускается содержание песка до 1% по ГОСТ 9268-2015.

* количество металломагнитных примесей размером до 2 мм с неострыми краями не должно превышать 30 мг на 1 кг корма. Комбикорм с содержанием металломагнитных примесей выше нормы не пригоден для скармливания, так как это может привести к серьезным заболеваниям животных. Особенно опасны крупные металлические частицы с острыми режущими кромками по ГОСТ 9268-2015.

2. Измельчение до заданной крупности различными способами на дробилках, мельницах или плющилках. Зоотехнические требования к подготовленному зерновому корму предусматривают размеры частиц: для крупного рогатого скота — не выше 3 мм, для свиней — до 1 мм, для птицы — до 2–3 мм при сухом кормлении и до 1 мм, если кормление производят влажными мешанками.

Стандарт на комбикорма ГОСТ 18221-2018 определяет 3 степени размола, которые характеризуются средними размерами частиц (модуль): от

0,2 до 1 мм – мелкий размол, от 1 до 1,8 мм – средний и от 1,8 до 2,6 мм – крупный размол [58].

Исследованием способов повышения эффективности работы молотковых дробилках занимались В. Р. Алешкин, Е.В. Агафонова, Н. Ф. Баранов, С.Ю. Булатов, М. Е. Гир-шин, 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.

Исследованиями, направленными в области пневматической очистки зерна от примесей занимались А.В. Алешкин, В.Л. Андреев, В.И. Анискин, И.П. Безручкин, М.А. Борис-кин, 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 Brascasescu и другие ученые. Баранов Н.Ф., Булатов С.Ю. занимались изучением эффективности очистки зерна от лёгких и минеральных примесей в пневмосепараторе, в котором зерно движется по криволинейной траектории. Константинов Р.В. в своей работе изучал процесс очистки зерна от металломагнитных примесей в гравитационном магнитном сепараторе, предназначенном для очистки зерна. В исследовании Ческидова М.В. рассматривается способ очистки зерна от минеральных примесей с помощью винтового рабочего органа.

1.1 Обзор технологических схем приготовления кормов

В технологии приготовления кормов основными машинами являются измельчители ударного действия — молотковые дробилки. Простота устройства, высокая надежность в работе, компактность установки, динамичность рабочих режимов, высокие скорости рабочих органов и непосредственное соединение вала машины с электродвигателем обусловили возможность широкого применения [55].

По технологической схеме подготовки зерна к дроблению (рис. 1.1) зерно из элеватора поступает в накопительные бункера, которые заполняют

обычно один раз в сутки. Из них зерно через дозаторы подают в смесительный шнек и на автоматические весы для первого взвешивания.



Рисунок 1.1 – Технологическая схема подготовки зерна к измельчению

В схеме можно выделить три отдельных этапа с самостоятельными задачами. На первом предварительно очищают зерно от примесей в воздушно-ситовых и магнитных сепараторах, триерах и обрабатывают его поверхность сухим способом в обоечных машинах. На втором этапе проводят холодное кондиционирование зерна. На третьем — повторную обработку поверхности зерна в обоечных машинах и окончательную очистку зерновой массы от примесей в воздушно-ситовом и магнитном сепараторах. На первом этапе обычно устанавливают обоечную машину с абразивным цилиндром, а на третьем — с абразивным или металлическим цилиндром. Перед поступлением в вальцовый станок зерно проходит через автоматические весы или расходомер. В результате очистки поверхности зерна от загрязнений и частичного удаления оболочек в обоечных машинах зольность его должна быть снижена не менее чем на 0,07% по сравнению с зольностью зерна до очистки [51,60,64,71].

При подготовке ржи из-за особенностей физико-химических и

структурно-механических свойств зерна параметры технологического процесса рекомендуются следующие: - в воздушно-ситовых сепараторах устанавливают приемное сито с круглыми отверстиями № 140...160, а подсевное с продолговатыми отверстиями № 14...15 в сепараторе первого прохода и № 13 в сепараторе второго прохода; - в овсюгоотборочных машинах принимают ячеи размером 9...11 мм; - повышают интенсивность обработки зерна в обоечных машинах, уменьшая расстояние между бичами и поверхностью абразивного барабана до 20 мм (вместо 22...25 мм для пшеницы) и увеличивая их окружную скорость до 15...18 м/с (вместо 13...15 м/с для пшеницы). Рожь увлажняют до 14,5...15,0%, пшеницу до 15,5...16,0%. Все отходы, полученные в подготовительном отделении, обрабатывают, при этом выделяя годное зерно. Если в схеме подготовки используют машины А1-3ШН-3, то перед ними устанавливают накопительные бункера, чтобы стабилизировать подачу зерна в эти машины; в противном случае эффективность шелушения заметно ухудшается. После шелушения зерно пропускают через аспиратор, в котором удаляют легкие примеси [84,100,103].

В малых и средних предприятиях производства комбикормов с производительностью от 3 т/ч до 7 т/ч, в основном используют мини-заводы, в которые входят пневматическая дробилка, пневмотранспортер, горизонтальный смеситель кормов (рис. 1.2,1.3). При использовании мини-заводов нет необходимости строить здания, использовать крупногабаритные установки по очистке зерна, а также малогабаритные комбикормовые мини-заводы можно применять непосредственно в местах хранения зерна [61,62].



Рисунок 1.2 – Комбикормовый мини-завод производства гранулированных кормов.

1 – эжектор; 2- пневматическая дробилка; 3 – циклон; 4 – горизонтальный смеситель.

Перед измельчением необходимо выполнять очистку сырья от металломагнитных, минеральных и легких примесей с использованием сепаратора первичной очистки. В небольших хозяйствах очистка зерна происходит после уборки и на стадии отправки на хранение в бурты. Поэтому на таких мини-заводах требуется наличие пневмосепаратора, так как при загрузке зерна с бурта возможно попадание минеральных и металломагнитных примесей, которые негативно влияют на работу пневматической дробилки [61-63].



Рисунок 1.3 – Комбикормовый мини-завод производства кормов в промышленных условиях

Принцип работы мини-комбикормового завода включает несколько этапов:

1) Забор зерновой массы. Для этого используют гибкий всасывающий шланг, который оператор подносит к ёмкости с зерном и захватывает продукт пневмопоток.

2) Очистка зерна. Поступающее по шлангу зерно направляется в специальную секцию (сепаратор), где очищается от металлических примесей и камней.

3) Измельчение зерна. Материал через приточный патрубок попадает в ударную камеру дробилки, где измельчается до нужного диаметра. Степень измельчения регулируется при помощи сменных сит.

4) Транспортировка измельчённого продукта. Измельчённый продукт выбрасывается в выпускной патрубок и далее по гибкому напорному трубопроводу транспортируется в бункер смесителя.

5) Смешивание ингредиентов. Туда же после предварительного взвешивания засыпаются минеральные добавки, витамины, микроэлементы, и происходит их смешивание с основным предварительно измельчённым материалом.

6) Выгрузка готового комбикорма. После того как аппарат отработал положенное время, он выключается, и готовая кормосмесь выгружается через выгрузной патрубок [36,54,97].

Мини линия кормов значительно экономит средства за счет пневматической подачи сырья из одного устройства в другое без использования различных транспортеров. Забор фуражного зерна осуществляется при помощи всасывающего шланга [44,77].

1.2 Характеристика продуктов измельченного зерна для приготовления кормов

В фермерских хозяйствах комбикорма производят по упрощенной технологической схеме: очистка зернового сырья от посторонних примесей, его измельчение, дозирование отдельных компонентов в соответствии с выбранным рецептом, смешивание и хранение продукции [52].

Очистка сырья. Комбикорм хорошего качества можно получить из очищенного от минеральных, органических и металлических примесей сырья установленной кондиции. Наличие примесей в количествах, превышающих нормы, ухудшает качество комбикормов, что может стать причиной заболевания животных. Кроме того, плохо очищенное сырье приводит к нарушению работы, а нередко и к выходу из строя технического оборудования. Требования, предъявляемые к качеству зерновых компонентов комбикормов, приведены в таблице 1.1 [50,79,105].

Таблица 1.1 – Показатели качества зерновых компонентов комбикормов

Показатели	Кукуруза	Овес	Ячмень	Просо	Пшеница	Рожь	Вика	Сорго	Горох
Влажность (не более), %	16	16	15,5	15	16	16	17	15	16
Содержание сорной примеси, %	5	5	8	8	5	5	5	5	5
В том числе:									
вредной примеси	0,2	0,2	0,2	-	0,2	0,2	-	0,2	-
горчака и вязеля	0,1	0,04	0,1	-	0,1	0,1	-	0,04	-
спорыньи и головни	0,15	0,1	0,1	-	0,1	0,1	-	0,1	-
куколя	-	0,5	0,5	-	0,5	0,5	-	0,5	-
Содержание зерновой примеси, %	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Очищенное зерно и побочные продукты могут содержать определенное количество посторонних примесей: металломагнитных размером до 2 мм – следы, частицы с острыми краями и крупные (сход с сита с отверстиями диаметром 10-16 мм) – не допускаются, минеральных во всех видах зерна – не более 0,25%, в побочных продуктах – не более 1,5, в травяной муке - не более 1% [46,94].

При использовании фуражного зерна, прошедшего послеуборочную обработку по полной технологической схеме, очистку можно не производить, так как в этом случае качество зернового сырья удовлетворяет

предъявляемым требованиям. С учетом этого оборудования для приготовления комбикормов выпускается без устройств для очистки зернового сырья, что упрощает технологический процесс и снижает стоимость оборудования. Однако при этом необходимо очищать зерно от металломагнитных примесей. Обязательно следует очищать давальческое зерно, так как оно часто имеет подмес других культур.

Измельчение. Обусловлено тем, что питательные вещества лучше перевариваются животными и смешиваются, легче перевариваются животными и смешиваются, легче пережевываются. Вместе с другими способами обработки измельчение значительно увеличивает возможность использования малопригодных в естественном виде различных отходов производства, что расширяет кормовую базу животноводства [45,56].

Зерновое сырье измельчается за один пропуск через дробильную машину, а крупнокусковое сначала подвергают грубому дроблению, а затем измельчению. Качество работы измельчающих машин удовлетворительно, если обеспечивается требуемая крупность размола каждого вида вырабатываемых комбикормов (табл. 1.2) [7,86].

Таблица 1.2 – Показатели крупности размола комбикормов-концентратов

Назначение комбикорма-концентрата	Остаток на сите с отверстиями (не более), %	
Для крупного рогатого скота:		
дойные коровы, быки-производители, взрослый скот на откорме	30	5
остальные виды и возрастные группы	10	не допускается
Для свиней:		
поросята до 6 месяцев	5	-«-
матки и хряки-производители	12	-«-

остальные виды и возрастные группы	10	-<<-
------------------------------------	----	------

При производстве стартерных комбикормов (для молодняка животных) одна из основных операций – отделение пленок овса и ячменя. Однако некоторые специалисты считают возможным использование неошелушенного ячменя в рационах не только взрослых животных, но и молодняка (например, поросят). При этом ячмень необходимо размалывать до такого состояния, чтобы остаток на сите с отверстиями диаметром 2 мм был не более 10%. При таком размоле в ячмене отсутствуют остроигольные пленки, опасные для животных. Несмотря на повышенное содержание клетчатки, комбикорм с нешелушенным ячменем более эффективен. Поэтому в хозяйствах, как правило, исключают его шелушение, что не только упрощает технологию производства комбикормов, но и значительно сокращает затраты на его приготовление.

1.3 Анализ существующих конструкций пневмосепараторов пневматических молотковых дробилок

Очистка зерновой смеси от примесей в пневмосепараторе молотковой дробилки, которые попадают вследствие загрузки зерновой смеси с буртов, основана на различии аэродинамических и физических свойств. Минеральные примеси имеют более тяжелую массу относительно зерна, а металломагнитные примеси – различный материал и структуру. Поэтому, анализ современного состояния конструкций, встроенных пневмосепараторов молотковых дробилок показал, что очистка зерна перед измельчением по основным свойствам примесей реализована не полностью (рис. 1.4). Эффективность очистки зерна в существующих конструкциях пневмосепараторов молотковых зернодробилок от металломагнитных примесей составляет до 85%, от минеральных примесей до 90%. Данный эффект объясняется неравномерной повышенной подачей зерновой смеси в дробилку, в связи с чем снижается время нахождения зерновой смеси в пневмосепараторе.

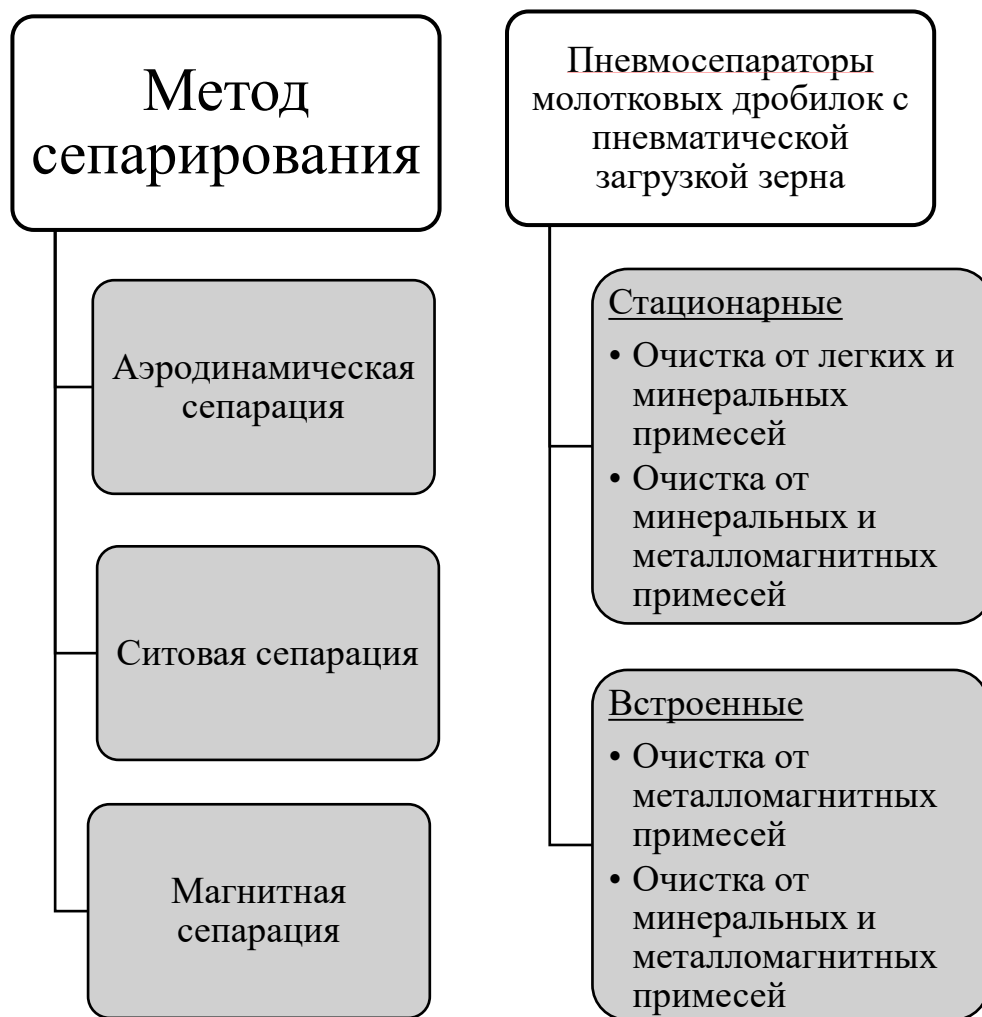


Рисунок 1.4 – Классификация конструкций и способов очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилке

Пневматические дробилки обязаны отвечать требованиям следующим параметрам, таких как: равномерное измельчение продукта, быстрое удаление продукта из рабочей области машины и иметь регулировки степени измельчения [40].

Одновременно с этим у молотковых дробилок присутствуют значимые недостатки такие как: 1) высокая энергоемкость; 2) неравномерность гранулометрического состава производимого продукта с высоким содержанием переизмельченных частиц; 3) значительный износ рабочих органов из-за низкокачественного сепарирования минеральных и металломагнитных примесей [23].

Для того чтобы исключить существенный износ рабочих органов в дробилках устанавливают дополнительный сепаратор. На рисунке 1.5 представлено устройство современной дробилки с использованием сепаратора.

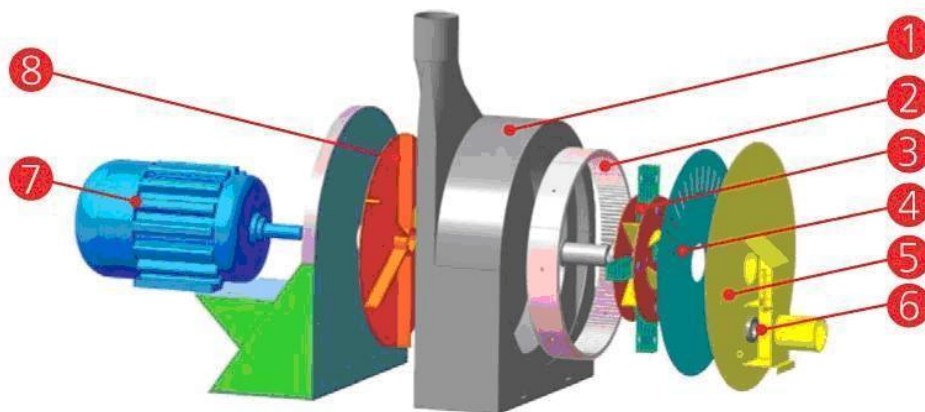


Рисунок 1.5 – Устройство дробилки с использованием сепаратора:

1 – корпус; 2 – деки; 3 – ротор; 4 – жалюзи; 5 – крышка; 6- магнит; 7 – двигатель; 8 – вентилятор.

Основное назначение сепаратора состоит в отделении минеральных и механических примесей от сырья перед дроблением. С помощью магнитного уловителя сепаратор очищает ферромагнитные примеси от потока продукта. Также в конструкции сепаратора присутствует наклонная поверхность, которая помогает выделить минеральные примеси [32].

Рассмотрим устройство и принцип работы пневматической дробилки ДКМП, в которой установлен сепаратор для дополнительной очистки зерна. Данная дробилка предназначена для измельчения зерна.

В конструкции дробилки ДКМП присутствует комплекс устройств: механическая дробилка с рабочими органами (молотки и деки) и центробежный вентилятор, который создает поток воздуха. Такого типа конструкция позволяет без использования дополнительного транспортного оборудования, забирать зерно из бурта или бункера, измельчать его, и выгружать измельченную массу в смеситель (рис. 1.6) [3].



Рисунок 1.6 – Устройство пневматического сепаратора дробилки ДКМП.

Принцип работы дробилки ДКМП состоит в следующем. Создаваемый поток воздуха центробежным вентилятором за счет вращения крыльчатки, засасывает зерно через заборник и подается по гибкому шлангу через сепаратор, где происходит очистка от магнитных примесей и камней, в дробильную камеру. Под действием вращения молотков на высокой скорости, которые закреплены на роторе, происходит дробление зерна. Измельченный продукт, после прохождения сита, поступает в диффузорную камеру. Далее потоком воздуха выбрасывается через выходной патрубок в смеситель или циклон [3].

У данной модели пневматической дробилки выделили преимущества и недостатки. Простота конструкции и надежность, а также повышенная защита от камней и металлических примесей являются преимуществами дробилки. Однако сепаратор дробилки не очищает поступающее зерно на дробление от мелких и легких примесей, что снижает качество готовой продукции.

Пневматический сепаратор молотковой дробилки ДПМ устроен конструктивно иначе (рис. 1.7) [73].

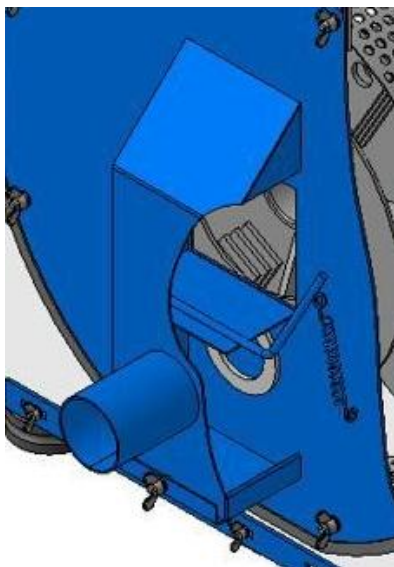


Рисунок 1.7 – Пневматический сепаратор молотковой дробилки ДПМ.

Проходя через сепаратор, металлические примеси отделяются от сырья и осаждаются на магнитном улавливателе, а наклонная поверхность не дает минеральным примесям попасть в зону дробления. Однако мелкие примеси не очищаются и попадают в рабочую область дробилки, что может повлечь за собой выход из строя дробилки.

Существует конструкция пневматического сепаратора первичной очистки зерна перед дроблением стационарного типа (рис. 1.8) [21].

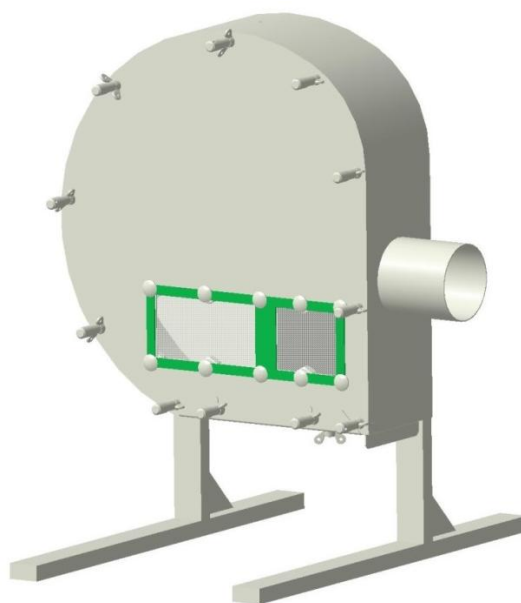


Рисунок 1.8 – Пневматический сепаратор первичной очистки зерна СА.

Магнитный сепаратор применяют совместно с пневматической дробилкой. Устройство очищает зерно от минеральных и металлических примесей. Увеличивает срок эксплуатации и ресурс рабочих органов дробилки. Данный сепаратор имеет степень очистки от металлических примесей до 98%, от песка и мелких камней фракцией до 5 мм 60%. Имея ряд преимуществ перед встроенными сепараторами зерна, встраивание сепаратора СА в технологическую линию приготовления кормов, приведет к повышению себестоимости готового продукта [21].

Рассмотрим основные конструктивные схемы расположения загрузочного патрубка в молотковых дробилках (рис. 1.9) [9].



Рисунок 1.9 – Молотковая дробилка с центральным загрузочным патрубком без сепаратора.

1 – выходной патрубок; 2 – загрузочный патрубок; 3 – рабочий орган дробилки.

При такой конструкции расположения загрузочного патрубка отсутствует сепаратор для дополнительной очистки зерна от примесей. Для очистки зерна перед дроблением устанавливаются отдельные зерноочистительные машины или сепараторы, что сказывается на повышении энергозатрат предприятия, а также на снижении эксплуатационных свойств рабочих органов дробилки.

Поэтому на рынке молотковых дробилок распространены в малогабаритных предприятиях пневматические молотковые дробилки с

загрузочным патрубком смещенный ниже центра ротора дробилки с установленным сепаратором (рис. 1.10) [50].

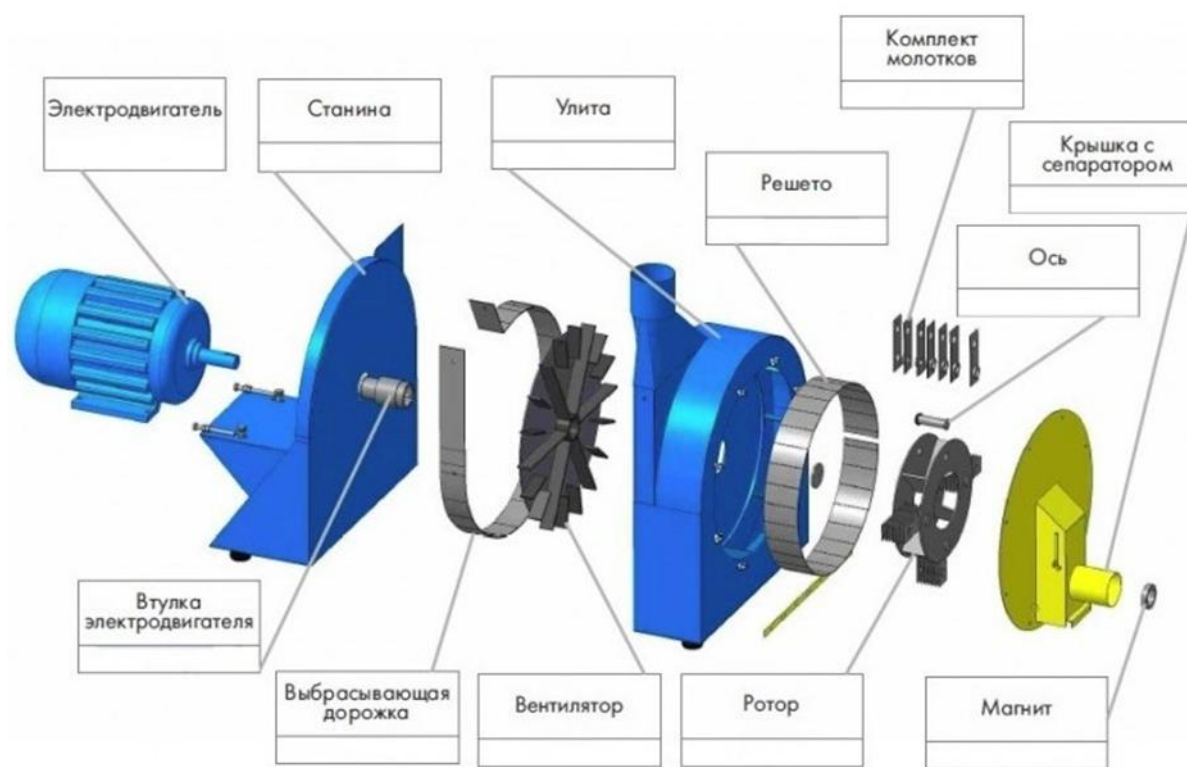


Рисунок 1.10 – Дробилка молотковая с центральным загрузочным патрубком с установленным сепаратором.

В таких конструкциях молотковых дробилок чаще всего используется, установленный после загрузочного патрубка сепаратор для отделения металлических или минеральных примесей (рис. 1.11,1.12).

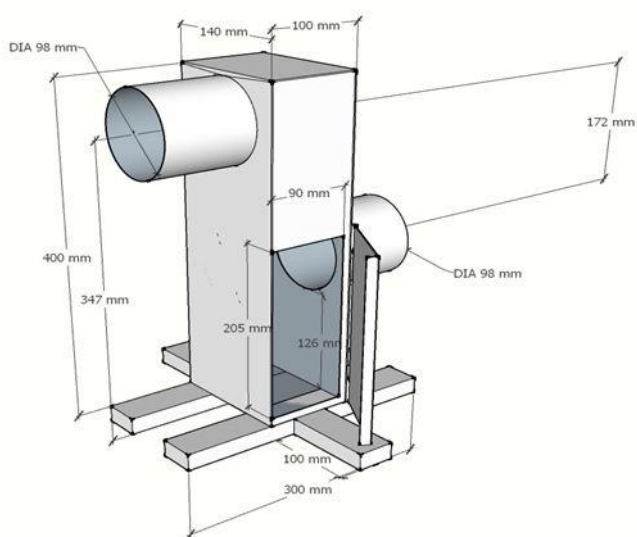


Рисунок 1.11 – Сепаратор СДПМ-1

Сепаратор СДПМ-1 отделяет от потока продукта металлические примеси, внутри которого установлен усиленный магнит, а также камни с помощью специальной перегородкой с производительностью до 5 т/ч [14].

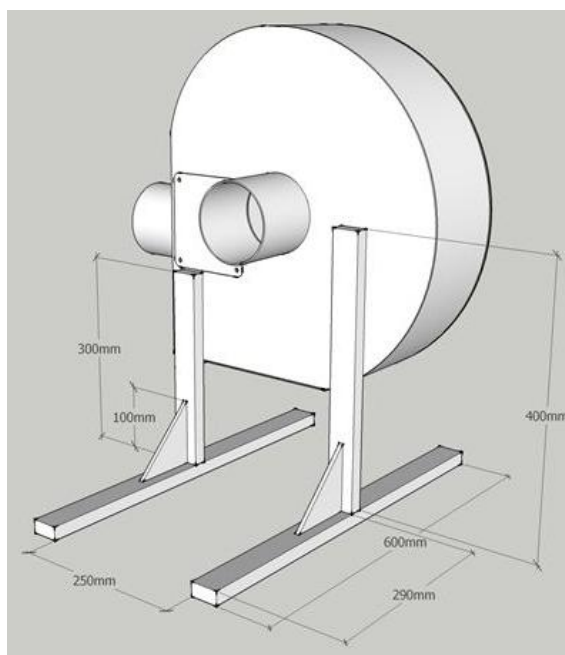


Рисунок 1.12 – Сепаратор СДПМ-2

Модель СДМ-2 кроме металлических примесей и камней отделяет мелкие примеси (песок, лузга и т.п.) за счет установленного внутри сита с производительностью до 5 т/ч [68].

Проведенный анализ современных конструкций пневмосепараторов молотковой дробилки, позволяет определить эффективность очистки зерна от примесей и полученные данные занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Эффективность очистки зерна в современных конструкциях пневмосепараторов молотковой дробилки.

	Эффективность очистки зерна от примесей, %	
	Стационарные	Встроенные
Очистка от легких примесей	-	-

Очистка от минеральных примесей	До 90%	До 85%
Очистка от металломагнитных примесей	До 90%	До 85%

С целью снижения энергозатрат и металлоемкости, упрощения конструкций очистительных машин очистку зерна необходимо осуществлять, используя потенциал воздушного потока.

1.4 Направления развития конструкций пневмосепараторов пневматических молотковых дробилок

Известна конструкция пневмосепаратора RU139816U1 «Пневматический сепаратор зерна», в котором отделение крупных примесей осуществляется в вертикальном сепарирующем канале за счет разных аэродинамических свойств, мелких – на сепарирующей решетке под действием сил инерции за счет различия зерна и примесей в геометрических размерах (рис. 1.13) [80].

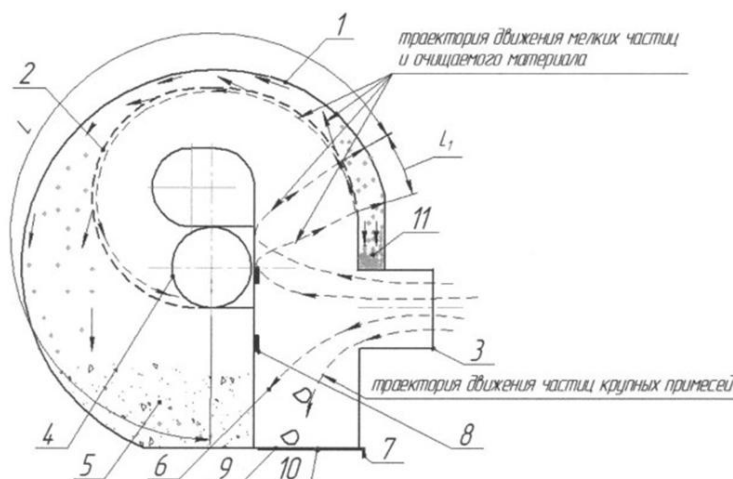


Рисунок 1.13 – Пневмосепаратор зерна [80]:

- 1- корпус; 2 – сепарационная решетка; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок; 5 – камера для мелких примесей; 6 – камера для крупных примесей; 7 – заслонка; 8 – магнит; 9,10 – днище с перфорационными отверстиями; 11 – камера для мелких примесей.

Пневмосепаратор работает следующим образом. Подлежащий очистке материал с потоком воздуха поступает через входной патрубок в сепарирующий канал, образованный корпусом сепаратора и его внутренней стенкой. При соударении с внутренней стенкой пневмосепаратора, где расположен магнит, из воздушно-продуктового потока извлекаются металломагнитные примеси, а продолжающий движение воздушно-продуктовый поток совместно с восходящим воздушным потоком, проходящим через днище с перфорирующими отверстиями камеры для крупных примесей, создает в камере для крупных примесей «кипящий» зерновой слой, который способствует лучшему выделению крупных примесей. С помощью регулирующей заслонки устанавливается необходимая скорость восходящего воздушного потока, который проходит через днище перфорирующими отверстиями камеры для крупных примесей. Благодаря этому из воздушно-продуктового потока происходит выделение крупных примесей по аэродинамическим свойствам. Далее зерно и мелкие минеральные примеси отскакивают от перегородки, движутся по траектории, и ударяются о сепарационную решетку в зоне А. Благодаря энергии движения мелких частиц часть из них проходит сквозь отверстия сепарационной решетки и попадает в дополнительную камеру для мелких примесей, расположенную над загрузочным патрубком [10,15,16].

Недостатком такого сепаратора является нарушение целостности зерна при ударе о стенку при движении в воздушном потоке через входной патрубок. При ударе зерна о стенку повышается концентрация пылевидных частиц, что влечет за собой повышенный износ молотков пневматической дробилки и взрывоопасность. Такая модель пневмосепаратора обладает малой эффективностью очистки зернового материала от минеральных и металломагнитных примесей. Одним из направлений решения этих задач может явиться использование такого пневмосепаратора установленного на пневматической дробилке с дальнейшей его модернизацией.

Известна устройство RU2552037 РФ «Воздушно-шнековое сепаратор». Воздушно-шнековое устройство для очистки зерна включает корпус 2 с установленным внутри него с возможностью вращения шнеком 1, образующим совместно с корпусом 2 сепарирующий канал, приемно-загрузочное устройство 3, нагнетательный патрубок, вентилятор, отверстие для вывода очищенного зерна и отверстие для выхода воздуха и легких примесей, бункер для очищенного зерна. Корпус 2 воздушно-шнекового устройства представляет собой трубу с диаметром, соответствующим внешнему диаметру шнека 1 между стенкой корпуса 2 и шнеком 1 с зазором, допускающим свободное вращение шнека 1. Приемно-загрузочное устройство 3 расположено в верхней части корпуса 2 правее отверстия выходного патрубка 6 для удаления воздуха и легких примесей, выполненного в левой нижней части корпуса 2. Нагнетательный патрубок с вентилятором 4 установлен в верхней части корпуса 2, левее отверстия 7 для выхода очищенного зерна, выполненного в конце нижней части корпуса 2 и соединенного с бункером 8 для очищенного зерна, имеющим дроссельную заслонку 9 (рис. 1.14) [83].

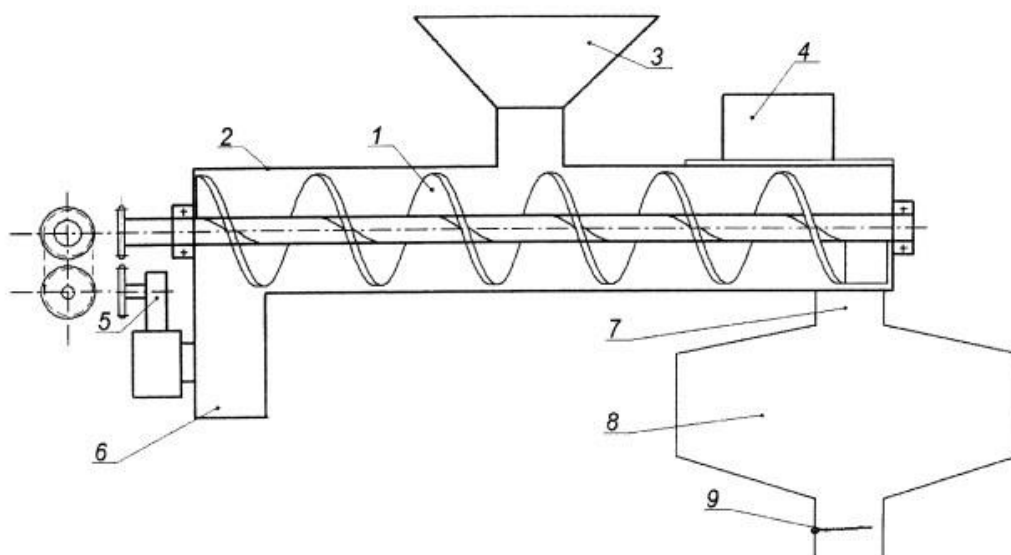


Рисунок 1.14 – Воздушно-шнековое устройство [83]:

1- шнек; 2 – корпус; 3 – приемно-загрузочное устройство; 4 – вентилятор; 5 – передаточный механизм; 6 – выходной патрубок; 7 – выгрузное отверстие; 8 – бункер; 9 – дроссельная заслонка.

Воздушно-шнековое устройство работает следующим образом. Зерновая смесь из приемно-загрузочного устройства 3 поступает в корпус 2. Далее она шнеком 1 перемещается в сторону выгрузного отверстия 7. Поток воздуха, подаваемый вентилятором 4 в сепарирующий канал, направлен в сторону отверстия выходного патрубка 6, в противоположенную сторону от бункера 8 с закрытой дроссельной заслонкой 9. Поток воздуха захватывает легкие частицы и уносит их в отверстие выходного патрубка 6. Очищенное зерно выводится шнеком 1 через отверстие 7 в бункер 8. Эффект очистки зерна усиливается благодаря закручиванию воздушного потока в сепарирующем канале и постоянном перемешивании продукта. Во время движения частиц по каналу на них дополнительно воздействует сила инерции, благодаря чему более тяжелые частицы относятся к стенкам устройства, а легкие свободно выносятся наружу.

Устройство имеет возможность регулировки скорости подачи воздуха за счет изменения частоты вращения вентилятора, частоты вращения шнека, изменения его размеров [117].

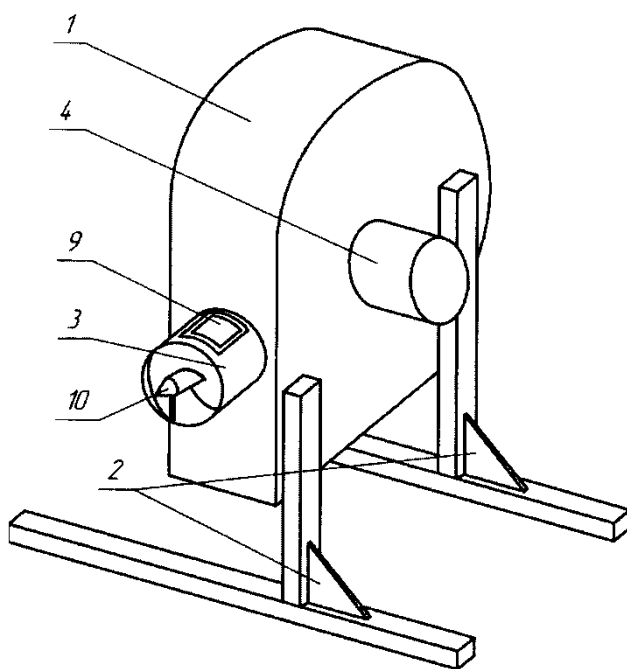
Основными недостатками устройства являются высокая металлоемкость, большие габаритные размеры сепаратора, большие затраты воздуха и энергии в связи с большим объемом канала сепарации, нерациональное конструктивное расположение приемно-загрузочного патрубка в связи холостой работы половины шнека от вентилятора.

Известна полезная модель RU211726U1 «Зерноочистительный магнитный сепаратор». Полезная модель относится к устройствам для очистки зерна и других сыпучих материалов от тяжелых, легких и магнитных примесей и может найти применение в сельском хозяйстве, в мукомольно-крупяной и комбикормовой промышленности, других отраслях [81].

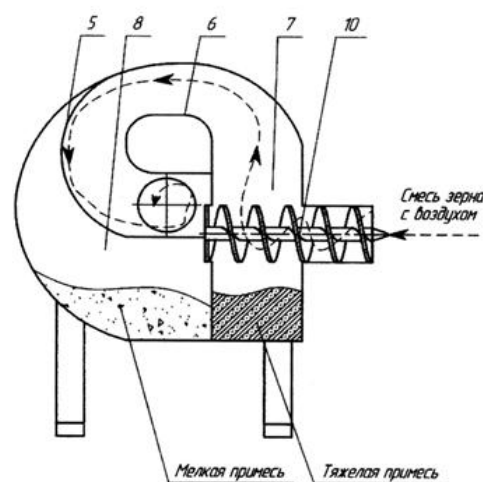
Устройство для зерноочистительного магнитного сепаратора состоит из корпуса 1, опирающегося на стойки 2, который имеет загрузочный патрубок 3 и выгрузной патрубок 4. Внутри корпуса 1 расположен сепарационный канал, состоящий из вертикальной 7 и радиальной части 8 и

образованный перегородкой в виде металлической пластины 6 с петлеобразным концом и шнека с магнитом пером 10, установленном в загрузочном патрубке 3, радиально изогнутой сменной сепарационной решеткой 5 и стенками корпуса, при этом в вертикальной части 7 происходит очистка от тяжелых примесей за счет гравитационной силы, а магнитные примеси осаждаются на магнитных перьях 10 за счет уменьшения и выравнивания воздушно зернового потока по всей плоскости пера. В радиальной части 8 мелкие примеси отсеиваются через сепарационную решетку 5 за счет центробежных сил. Работа шнека с магнитным пером контролируется с помощью смотрового окна 9 на загрузочном патрубке. Металлические примеси со шнека с магнитным пером 10 извлекаются после проведения технологического процесса вместе со шнеком, после разъединения с загрузочным патрубком 3 [81].

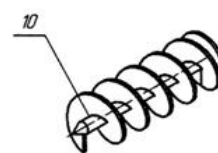
Установка работает следующим образом. Подлежащий очистке материал с потоком воздуха подается через загрузочный патрубок 3, в котором установлен шнек с магнитным пером 10, в результате движения воздуха слой зерна утончается и движется по шнеку 10, на котором осаждаются металломагнитные примеси. Далее материал, очищенный от крупных и металлических примесей, движется по радиальной части 7 сепарационного канала 7. Выполнение сепарационной решетки 5 перфорированной обеспечивает выделение мелких примесей под действием центробежных сил в камеру осаждения и продвижение воздушно продуктового потока вдоль канала. Очищенный материал выводится через выгрузной патрубок 4 (рис. 1.15) [81].



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Рисунок 1.15 – Зерноочистительный магнитный сепаратор [59]:

1 – корпус; 2 – опирающие стойки; 3 – загрузочный патрубок; 4 – выгрузной патрубок; 5 – сепарационная решетка; 6 – металлическая пластина; 7 – сепарационный канал вертикальный; 8 – сепарационный канал радиальный; 9 – смотровое окно; 10 – шнек с магнитным пером.

Установка данного сепаратора, как отдельное устройство непосредственно перед дробилкой является основным недостатком полезной модели. Также происходит налипание магнитных примесей на магнитные перья винтового рабочего органа, что ухудшает эффективность очистки зерна.

Анализ существующих схем очистительных машин позволяет сделать выводы, что большинство типов сепараторов предназначены для выделения либо крупных, либо мелких примесей, многие из них не работают в неразрывном воздушном потоке, имеют сложную конструкцию и относительно большие размеры, нуждаются в дополнительном приводе рабочих органов, что затрудняет их использование в составе комбикормовых

агрегатов. Сепараторы фуражного зерна в составе дробилок с пневмозабором не способны выделять мелкие сорные примеси.

Перспективным устройством является конструкция пневматической молотковой дробилки с использованием винтового пневмосепаратора RU229971U1 (рис. 1.16, приложение 1) [82].

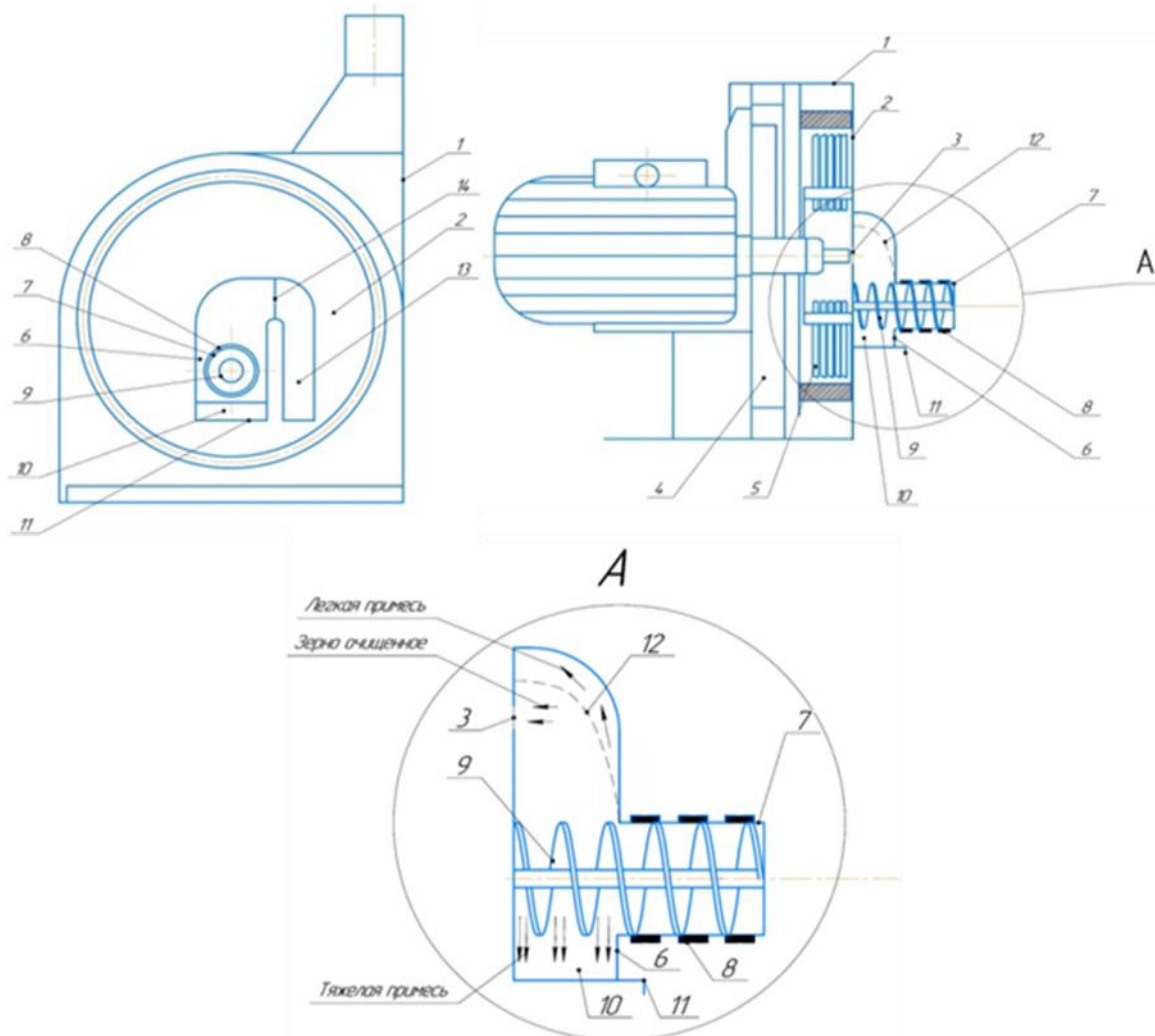


Рисунок 1.16 – Пневматическая молотковая дробилка [82]:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – входное отверстие; 4 – вентилятор; 5 – молотковый ротор; 6 – входной патрубок; 7 – магнит; 8 – камера для сбора и удаления тяжелых примесей; 9 – задвижка; 10 – перфорированная решетка; 11 – камера для удаления мелких и легких примесей; 12 – электродвигатель; 13 – шнек; 14 – сепарационная камера.

Молотковая дробилка содержит корпус 1, крышку 2 с входным отверстием 3, вентилятор 4, молотковый ротор 5. На наружной поверхности крышки 2 смонтирован сепаратор 6 с входным патрубком 7, внешнюю часть

которого представляет собой цилиндрический магнит 8, а внутри установлен шнек 9. При этом входной патрубок расположен ниже уровня входного отверстия 3. Камеру 10 с задвижкой 11 для сбора и удаления тяжелых примесей. В верхней части сепаратора установлена перфорированная решетка 12, за которой находится камера для сбора мелких и легких примесей 13 с задвижкой 14.

Работа полезной модели осуществляется следующим образом. При включении электродвигателя молотковой дробилки под действием вентилятора 4 и ротора 5 создается разрежение, благодаря которому продукт, предназначенный для дробления, забирается заборным устройством и с воздушным потоком поступает в сепаратор 6 через входной патрубок 7 [82].

За счет витков шнека 9 установленного внутри входного патрубка 7 воздушный поток поворачивает слой зерна таким образом, что зерно проходит по внутренней части цилиндрического магнита 8 в результате чего происходит очистка от металломагнитных примесей. Двигаясь по шнеку 9 воздушно-зерновой поток изменяет траекторию движения лёгких и тяжелых примесей. В результате тяжелые примеси под действием центробежной силы движутся по периферии входного патрубка и направляются вниз, попадая в камеру 10 где под действием силы тяжести осаждаются. Легкие примеси и зерно направляются вверх к перфорированной решетке 11, легкие примеси проходя через которую выводятся в камеру отвода мелких и легких примесей 12, очищенное зерно попадает в камеру дробления через входное отверстие 3 в крышке корпуса 2. Очистка сепаратора 6 происходит следующим образом. После отключения электродвигателя молотковой дробилки открывают задвижки 11, 14 и очищают камеры 10, 13 от тяжелых и легких примесей. Цилиндрический магнит 8 от металлических примесей очищают, вручную отсоединив от входного патрубка 7 [82].

Такое сочетание конструкторских элементов позволяет повысить качество измельчения зерна, производительность, снизить энергоемкость и

металлоемкость установки, повысить качество очистки зерна, а также сохранить целостность продукта.

1.5 Выводы по главе

1. Рассмотрены технологические схемы производства комбикормов. Установлено, что на линии приготовления гранулированных кормов присутствует не полная очистка зерна от примесей. Сепарирование зерна осуществляется в молотковой дробилке. Отмечены тенденции применения сепаратора для увеличения объема выхода продукта.

2. Определены основные характеристики готового комбикорма и установлены зоотехнические требования, предъявляемые к наличию сорных, металломагнитных и минеральных примесей в комбикормах для различных видов животных.

3. Предложено усовершенствование технологической схемы измельчения зерна путем создания и внедрения аппарата, осуществляющего пневматическую очистку зерна, что приведет к повышению качества измельчения зерна, производительности, качества очистки зерна, а также сохранить целостность продукта. Рассмотрены модификации пневматических сепараторов применяемых в различных областях промышленности: встроенные в дробилку – очистка от металлических и минеральных примесей, стационарные – очистка от мелких и легких примесей. Отмечено, что встроенные сепараторы проще в устройстве и эксплуатации, выше производительность, чем у стационарных, имеют меньший расход электроэнергии.

4. Проанализированы существующие направления конструкций сепараторов для очистки зерна от примесей. Предложена модернизация встроенного пневмосепаратора пневматической молотковой дробилки, осуществляющего пневматическую очистку зерна, что приведет к повышению качества измельчения зерна, производительности, качества очистки зерна, а также сохранить целостность продукта.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

2.1. Анализ процесса сепарации зерна от примесей

Процесс очистки зерна от примесей в воздушном потоке основан на отличиях геометрических размеров, физико-механических свойствах и аэродинамических характеристик частицы.

Частица в воздушном потоке испытывает воздействие силы аэродинамического сопротивления $R(H)$ (2.1) [120]:

$$R = k * \rho * F_{\text{сеч}} * V_B^2, \quad (2.1)$$

где k – коэффициент аэродинамического сопротивления;

ρ – плотность воздушного потока, кг/м^3 ;

$F_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения зерна, м^2 ;

V_B^2 – относительная скорость движения частицы, м/с .

Основными характеристиками аэродинамических свойств частиц являются коэффициент парусности k_{Π} (м^{-1}) (2.2) и критическая скорость (скорость витания) $V_{\text{крит}}$ (м/с) (2.3) [98].

$$k_{\Pi} = \frac{k * \rho * F}{m}, \quad (2.2)$$

$$V_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{g}{k_{\Pi}}}, \quad (2.3)$$

где m – масса частицы, кг ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Критической скоростью витания называется такая скорость воздушного потока, при которой помещённое в поток тело удерживается в подвешенном положении. Чтобы соблюсти данное условие, скорость воздушного потока $V_{\text{возд}}$ (м/с) должна удовлетворять следующему соотношению (2.4):

$$V_{\text{легк}} < V_{\text{возд}} < V_{\text{тяж}}, \quad (2.4)$$

где $V_{\text{возд}}$ – скорость воздушного потока, м/с ;

$V_{\text{легк}}$ – максимальная скорость витания легких частиц, м/с;

$V_{\text{тяж}}$ – минимальная скорость витания тяжелых частиц, м/с.

Расчёт конструктивных элементов сложных сепараторов и определение динамики воздушных потоков основаны на уравнениях Навье-Стокса [4,87]. Эти уравнения описывают поведение несжимаемых жидкостей и газов, хотя реальные газы имеют свойство сжиматься. Расчёты упрощены использованием моделей вязких ньютоновских сред. Вязкость характеризует способность вещества сопротивляться смещениям слоёв, проявляющуюся внутренним трением.

Ньютоновские жидкости, включая воду, демонстрируют непрерывное течение под действием любой внешней силы, отличной от нуля, при строгой зависимости скорости деформации от уровня прикладываемого напряжения (5) [4,87].

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{V} + \vec{f} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \end{cases}, \quad (2.5)$$

где $\vec{V}$ – вектор скорости;

t – время;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

ρ – плотность жидкости;

$\vec{f}$ – вектор массовых сил.

Первая составляющая системы уравнений отражает непосредственно процесс движения среды, вторая же гарантирует соблюдение принципа сохранения массы (неразрывности).

Современные конструкции сепараторов используют преимущественно четыре базовых подхода к выделению лёгких фракций. Ключевые различия между ними обусловлены размещением рабочих каналов, зон подачи сырья, точек впуска воздуха и направлением воздушных потоков.

Самым популярным решением является применение вертикального пневмосепарирующего канала (рис. 2.1) [4,18,19,65].

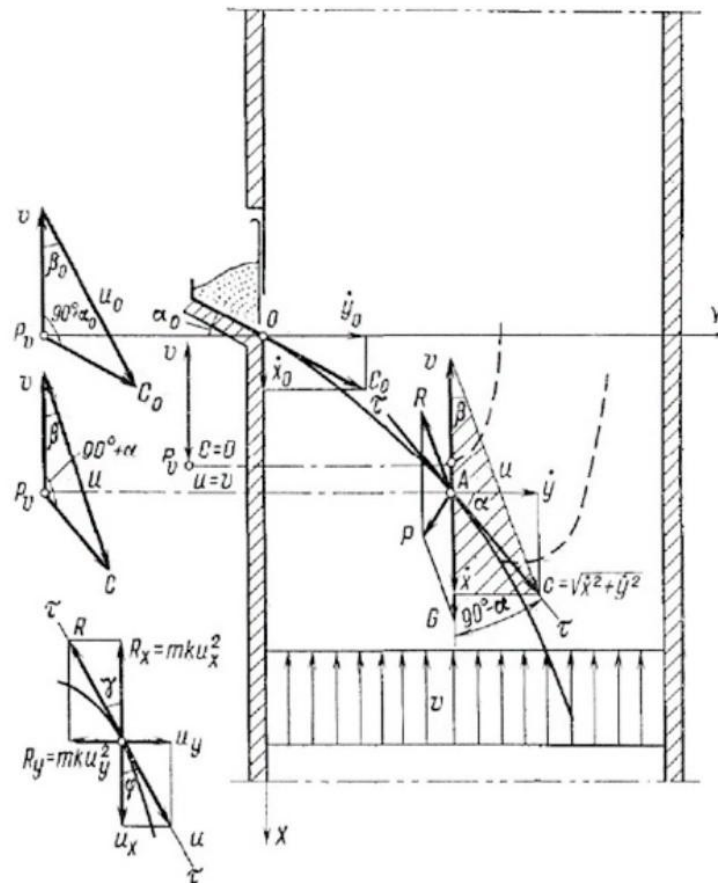


Рисунок 2.1 – Схема действия сил, действующих на зерно в вертикальном пневмосепарирующем канале

Оптимальная скорость воздушного потока должна превышать скорость витания лёгкой пыли и растительных остатков, но быть ниже соответствующей скорости витания качественного зерна. В таком режиме цельные зёрна медленно опускаются вниз, а лёгкие примеси поднимаются вместе с воздушным потоком.

Особенность горизонтальных пневмосепараторов (рис. 2.2) состоит в детальном анализе характеристик каждой частицы, таких как масса, форма и размер. Вследствие этого разные группы зёрен двигаются разными путями и равномерно распределяются по специальным зонам нижнего отсека устройства. Минеральные примеси, будучи тяжелее, быстро осаживаются на дне, крупные фрагменты задерживаются в специальных карманах, а наиболее лёгкие примеси эффективно вытесняются воздушным потоком вверх. [18,19,22,65].

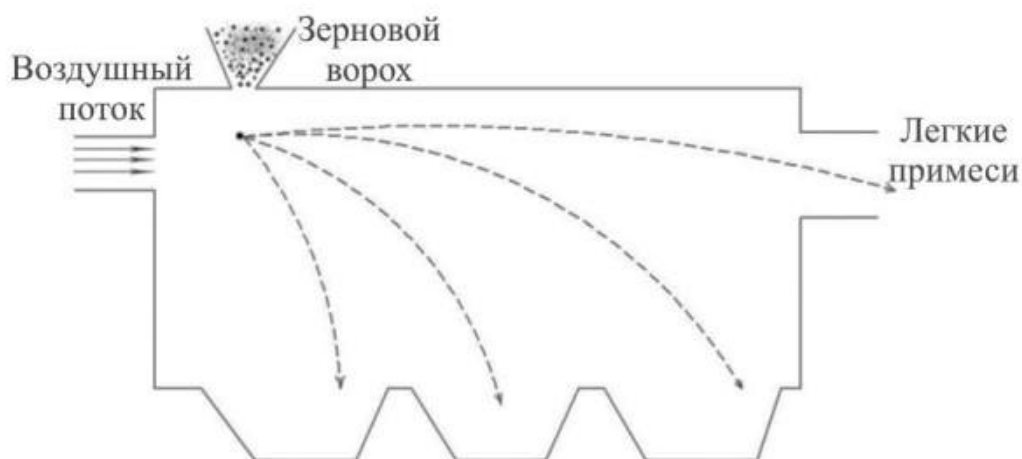


Рисунок 2.2 – Функциональная схема работы сепаратора с горизонтальным сепарирующим каналом

Действующей силой оказываемой на частицы, находящиеся в горизонтальном воздушном канале является сила F (2.6) [6,22,38,67,118]:

$$F = k_{\text{п}} * F_{\text{сеч}} * \rho * \frac{V_{\text{ср.}}^2}{2}, \quad (2.6)$$

где $F_{\text{сеч}}$ – миделево сечение зерна, м^2 ;

$k_{\text{п}}$ – коэффициент парусности семян;

$V_{\text{ср.}}$ – средняя скорость воздушного потока, м/с ;

ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ;

В своём исследовании, посвящённом улучшению процессов очистки зерна и семян методами фракционной сортировки, В.В. Пивень выявил, что аэродинамическая сила R , действующая на компоненты зерновой массы, связано прямой пропорцией с величиной коэффициента лобового сопротивления. (2.7) [22,38,67,89,118]:

$$R = \frac{C_x * \rho_e * V_z^2 * S_m}{2}, \quad (2.7)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления;

V_z – относительная скорость движения компонентов;

ρ_e – объемный вес сепарируемого материала.

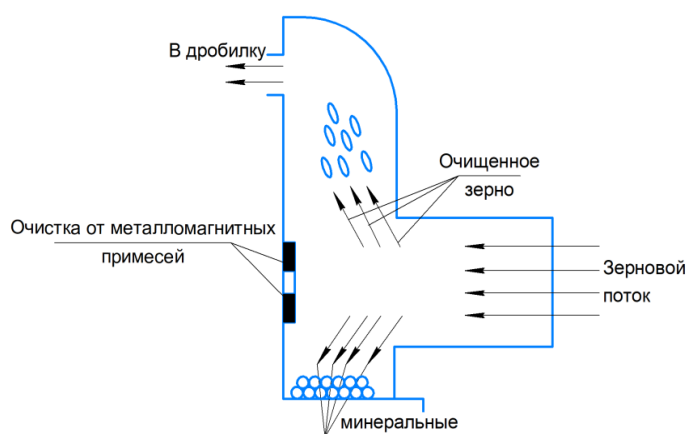


Рисунок 2.3 – Функциональная схема работы

пневмосепаратора 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 2.3.

Однако в данных работах не рассмотрен процесс очистки зерна от сорных примесей в винтовом воздушном канале.

2.2. Разработка и обоснование конструктивной схемы и принципа работы пневмосепаратора пневматической молотковой дробилки

Пневматическая молотковая дробилка включает в себя корпус, крышку с входным отверстием, вентилятор, молотковый ротор. На наружной поверхности крышки смонтирован сепаратор с входным патрубком, внешнюю часть которого представляет собой цилиндрический магнит, а внутри установлен винтовой рабочий орган. При этом входной патрубок расположен ниже уровня входного отверстия. Камеру с задвижкой для сбора и удаления тяжелых примесей. В верхней части сепаратора установлена перфорированная решетка, за которой находится камера для сбора мелких и легких примесей с задвижкой (рис. 2.4).

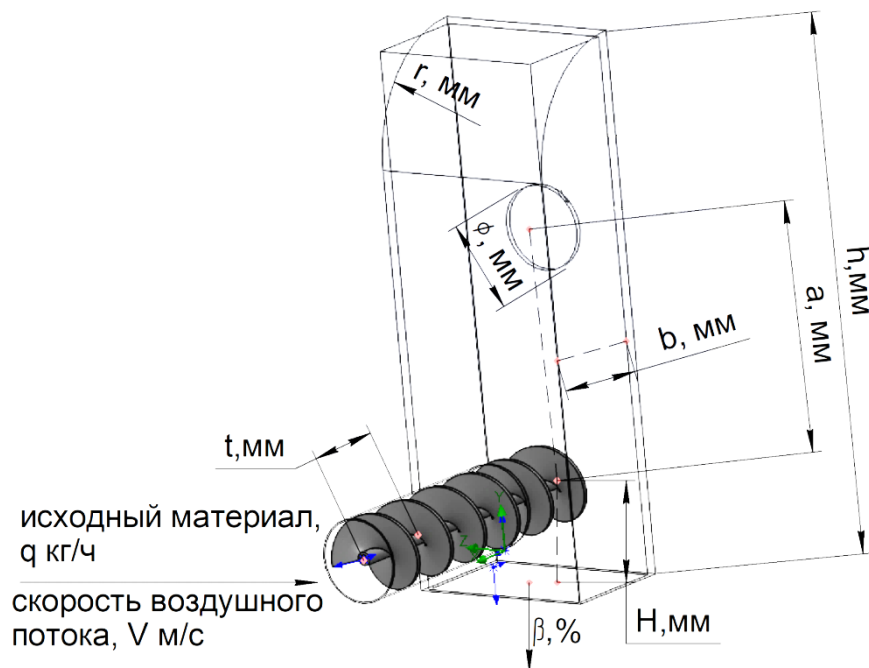


Рисунок 2.4 – Конструктивная схема пневмосепаратора молотковой дробилки

Работа осуществляется следующим образом. При включении электродвигателя молотковой дробилки под действием вентилятора и ротора создается разрежение, благодаря которому продукт, предназначенный для дробления, забирается заборным устройством и с воздушным потоком поступает в сепаратор через входной патрубок. За счет витков винтового рабочего органа, установленного внутри входного патрубка воздушный поток поворачивает слой зерна таким образом, что зерно проходит по внутренней части цилиндрического магнита в результате чего происходит очистка от металломагнитных примесей. Двигаясь по винтовому рабочему органу, воздушно-зерновой поток изменяет траекторию движения лёгких и тяжелых примесей. В результате тяжелые примеси под действием центробежной силы движутся по периферии входного патрубка и направляются вниз, попадая в камеру где под действием силы тяжести осаждаются. Легкие примеси и зерно направляются вверх к перфорированной решетке, легкие примеси проходя через которую выводятся в камеру отвода мелких и легких примесей, очищенное зерно попадает в камеру дробления через входное отверстие в крышке корпуса. Очистка сепаратора происходит следующим образом. После отключения

электродвигателя молотковой дробилки открывают задвижки и очищают камеры от тяжелых и легких примесей. Цилиндрический магнит от металлических примесей очищают, вручную отсоединив от входного патрубка.

Научно-аналитический обзор свидетельствует о том, что оптимизация процессов сепарации зерновой смеси требует учета двух групп переменных: конструктивно-технологические параметры оборудования и физико-химические характеристики исходного зернового материала.

Конструктивно-технологические факторы включают: наружный диаметр винтового рабочего органа (D) в метрах и его межвитковое расстояние (t) в метрах; высота осадительной камеры для тяжелых частиц (H) в миллиметрах; пропускная способность загрузочного бункера (Q) в килограммах в секунду.

Фракционные признаки зерновой смеси определяются рядом физических параметров компонентов: пространственными габаритами (длиной $-l$, шириной $-b$, толщиной $-d$) в миллиметрах; индивидуальной массой каждой частицы (m) в граммах; миделевым сечением зерна ($F_{\text{сеч}}$) в квадратных метрах; коэффициентом аэродинамического сопротивления ($k_{\text{п}}$); критической скоростью витания (скоростью парения) отдельных фрагментов ($V_{\text{вит}}$) в метрах в секунду.

Также существенным показателем является доля примесей в составе исходной зерновой смеси до осуществления процесса очистки (X_c).

Полученные знания легли в основу разработки обобщённой технологической схемы процесса очистки зернового материала с использованием пневмосепаратора (рис. 2.5).

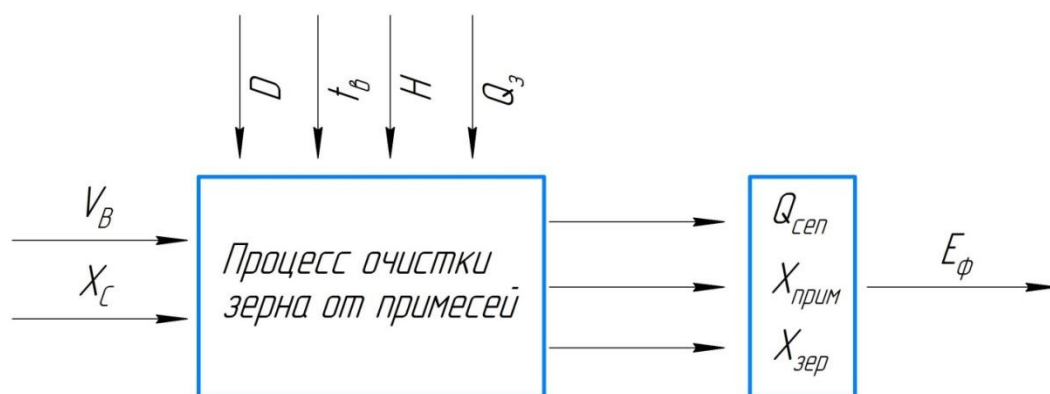


Рисунок 2.5 – Структурная схема процесса сепарирования в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом

Исследование функционирования рассматриваемой системы выделяет ряд значимых выходных параметров: производительность сепаратора $Q_{сеп}$, кг/ч; количества удаленных минеральных и металлических примесей $X_{прим}$, %; содержания цельного зерна в отходах $X_{зер}$, %. Оценочным показателем, объединяющим приведённые критерии, является эффективность процесса сепарирования $E_{ф}$. Надёжность функционирования сепаратора гарантируется достижением установленного порога минимальной эффективности E_{min} , задаваемого регламентированными пределами: содержанием цельного зерна в отходах на уровне менее 1,5% и количеством удаления примесей на уровне не ниже 60%.

Исходя из вышесказанного, эффективность процесса очистки пневмосепаратором можно представить в следующем виде (2.8):

$$E_{ф} = f(D, p_{ш}, Q_з, H) \rightarrow \max, \quad (2.8)$$

Теоретическое исследование позволило установить связь между конструктивными элементами и режимными условиями работы пневмосепаратора. $(D, t_{в}, H, Q_з)$.

2.3. Обоснование скорости частицы в воздушном потоке винтового канала пневматического сепаратора

Очистка фуражного зерна от крупных в пневмосепараторе происходит под действием гравитационных, аэродинамических сил, сил инерции. Сначала воздушно-продуктовый поток попадает в сепарирующий канал по

перьям винтового рабочего органа, где дополнительно на поток действует центробежная сила, которая расслаивает поток на фракции: тяжелые частицы относятся к стенкам канала, а легкие примеси и продукт относятся ближе к центру винтового рабочего органа.

Рассмотрим движение единичной частицы, принадлежащей зерновой смеси в сепарирующем канале на рисунке 2.6.

Твердая 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 .

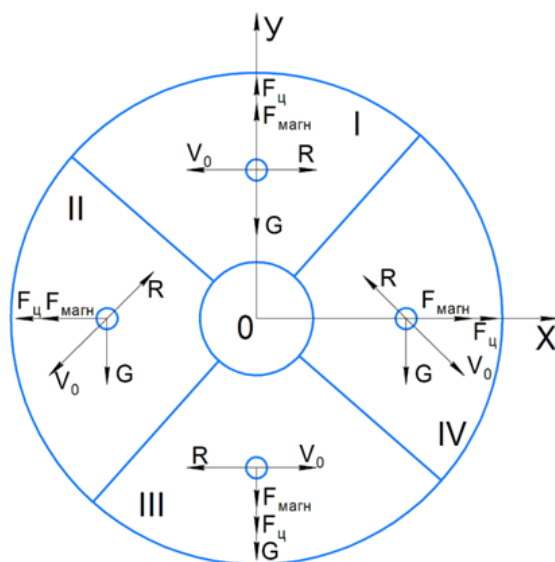


Рисунок 2.6 – Схема действия сил, оказывающих на частицу при движении по винтовой поверхности рабочего органа сепарирующего канала пневматической молотковой дробилки [29]

Для лучшего понимания принципов работы пневмосепаратора

рассмотрим каждую из четырех зон сепарации подробно.

Зона I — Входная зона.

Это начальная зона, куда поступают зерна и примеси. Попадая сюда, частицы начинают взаимодействовать с воздушным потоком, инициируя начало процесса сепарации. Этот этап необходим для первичной стабилизации частиц и подготовки их к дальнейшему процессу.

Зона II — Зона разгона.

Вторая зона характеризуется наличием сильных нисходящих воздушных потоков, обеспечивающих дополнительную кинетическую энергию частицам. За счёт резкого увеличения скорости движение частиц стабилизируется, что улучшает последующую сепарацию. Здесь важно избежать избыточного торможения или переускорения, чтобы сохранить целостность зерен и предотвратить образование дефектов.

Зона III — Зона расслоения.

Основная задача третьей зоны — физическое разделение смеси на две фракции: тяжелые зерна и легкие примеси. Воздушный поток здесь специально настроен таким образом, чтобы поддерживать легкие частицы в взвеси, в то время как более массивные зерна оседают на дно. Данный этап играет ключевую роль в качестве конечного результата сепарации.

Зона IV — Финальная очистка.

Заключительный этап сепарации происходит в четвертой зоне. Здесь применяется принцип скорости витания: легкий поток воздуха способен удерживать маленькие и легкие частицы, перенося их дальше по тракту, в то время как тяжелые зерна завершают свое движение на дне. Правильная настройка скорости воздушного потока здесь крайне важна, поскольку она напрямую влияет на чистоту финального продукта.

Каждая из четырёх зон играет свою уникальную роль в формировании конечной эффективности процесса. Грамотная организация воздушного потока и учет свойств обрабатываемых материалов обеспечивают оптимальное функционирование пневмосепаратора и высокое качество

полученной продукции.

Чтобы обеспечить эффективное разделение в зонах I и II, необходимо точно определить скорость воздушного потока, предотвращающую случайное столкновение зерна со стенками сепаратора. Проведение соответствующих расчетов позволит получить необходимые данные о распределении скоростей и траектории движения частиц в винтовом канале.

Поскольку используемые газообразные среды (воздух) являются практически несжимаемыми, их движение описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса, адаптированных к декартовой системе координат. Использование данных уравнений позволяет детально исследовать движение частиц и выявить оптимальные режимы работы сепаратора. (2.9).

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} + V_x \frac{dV_x}{dx} + V_y \frac{dV_x}{dy} + V_z \frac{dV_x}{dz} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \eta \Delta V_x \\ \frac{dV_y}{dt} + V_x \frac{dV_y}{dx} + V_y \frac{dV_y}{dy} + V_z \frac{dV_y}{dz} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \eta \Delta V_y, \\ \frac{dV_z}{dt} + V_x \frac{dV_z}{dx} + V_y \frac{dV_z}{dy} + V_z \frac{dV_z}{dz} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \eta \Delta V_z \end{cases} \quad (2.9)$$

где V — вектор скорости газового потока, (м/с);

t — временной интервал, (с);

F — удельная внешняя сила, приходящаяся на единицу массы частицы, (Н/кг);

P — гидростатическое давление в точке пространства, (Па);

η — кинематический коэффициент вязкости, характеризующий подвижность жидкости или газа, (м²/с);

μ — динамический коэффициент вязкости, соответствующий силе внутреннего трения, возникает при движении жидких или газовых масс, (Па·с);

Δ — оператор Лапласа, используемый для описания распространения волн давления и теплоты в средах, применяемый в дифференциальных уравнениях.

Значение коэффициентов вязкости зависит от температуры среды. Как

правило, для жидкостей они устанавливаются опытным путем, тогда как для газов выводятся теоретически на основе законов газовой динамики.

Уравнения Навье-Стокса позволяют моделировать турбулентные течения, для чего все переменные (компоненты скорости u , v , давление p и время t) записываются в виде сумм усреднённого значения и колебательной составляющей. Мгновенное значение любой переменной представляет собой комбинацию постоянного среднего значения и небольших пульсаций, наложенных на это среднее (2.10):

$$\varphi = \overline{\varphi} + \phi, \quad (2.10)$$

где φ – мгновенное значение параметра;

$\overline{\varphi}$ – средняя составляющая;

ϕ – пульсационная составляющая.

При подстановке мгновенных значений параметров в уравнения Навье-Стокса и последующем проведении временного осреднения получаем следующую систему выражений (2.11):

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx_i}(\rho V_i) = 0 \\ \frac{d}{dt}(\rho V_i) + \frac{d}{dx_j}(\rho V_i V_j) = -\frac{dp}{dx_i} + \frac{d}{dx_j} \left[\mu \left(\frac{dV_i}{dx_j} + \frac{dV_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{dV_l}{dx_l} \right) \right] + \frac{d}{dx_j}(-\rho \overline{V_i V_j}) \end{cases}, \quad (2.11)$$

Моделирование второй фазы проводится с использованием метода совместного расчёта потоков основной и второстепенной фаз. Этот подход позволяет рассматривать обе фазы одновременно, обеспечивая взаимозависимое описание их движения и взаимодействие между собой (2.12):

$$\frac{d\vec{V}_d}{dt} = F_D(\vec{V}_{\text{лок}} - \vec{V}_{\text{абс}}) + \frac{(\rho - \rho_d)}{\rho_d} \vec{g} + \sum \vec{F}, \quad (2.12)$$

где $V_{\text{абс}}$ – абсолютная скорость движения частицы, м/с;

$V_{\text{лок}}$ – местная (локальная) скорость воздушного потока в месте расположения частицы, м/с;

$R = \frac{18\mu C_d Re}{\rho_d D_d^2}$ – отношение аэродинамической силы сопротивления к

массе частицы, где μ — динамическая вязкость газа, C_D — коэффициент

аэродинамического сопротивления, Re — число Рейнольдса, ρ_d — плотность частицы, D_d — диаметр частицы; $Re = \frac{\rho D_d |\vec{u}_d - \vec{u}|}{\mu}$ — число Рейнольдса для частицы;

$C_D = f(Re)$ — коэффициент аэродинамического сопротивления;

g — ускорение свободного падения;

$\sum \vec{F}$ — сумма прочих удельных сил, действующих на частицу, включая силы присоединенных масс, силы, вызванные градиентами давления, броуновскую силу, силу Сэффмена и термофорезную силу.

На основе второго закона Ньютона получено векторное дифференциальное уравнение движения материальной точки (рис. 2.7) (2.13):

$$m \cdot \vec{W} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{F}_c, \quad (2.13)$$

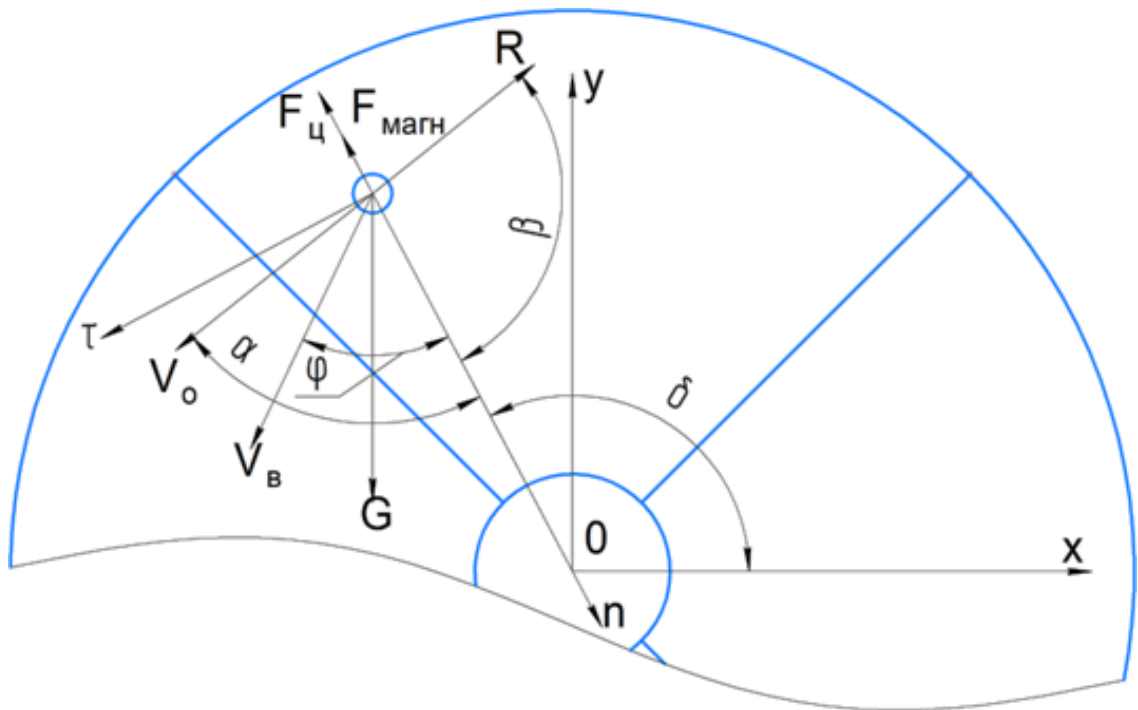


Рисунок 2.7 – Схема действия сил на частицу в винтовом рабочем органе

Исходя из уравнения 1, векторное дифференциальное уравнение движения материальной точки в зоне А на I, II и III участках запишется в виде (2.14):

$$\begin{cases} m \frac{d^2 n}{dt^2} = -F_{\text{ц}} - R \cos \beta + G \sin \delta - F_{\text{магн}} \sin \delta \\ m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = -F_{\text{ц}} \sin \beta - R \cos \beta - G \cos \delta - F_{\text{магн}} \sin \beta \end{cases}, \quad (2.14)$$

где $F_{\text{ц}} = m u_o^2 / r_t$;

$R = m k_{\text{ц}} u_o^2$;

$G = mg$;

$F_{\text{магн}} = \mu_o \chi$;

$u_o = V_o - V_{\text{и}}$.

r_t – радиус кривизны траектории движения по винтовой траектории;

k – коэффициент парусности, м^{-1} .

μ_o – магнитная постоянная, Гн/м;

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

Подставив значения действующих сил в выражение (2.14) и сократив все члены системы уравнения на m , получим (2.15):

$$\begin{cases} \frac{d^2 n}{dt^2} = -\frac{u_o^2}{r_t} - k u_o^2 \cos \beta + g \sin \delta + \mu_o \chi \sin \delta \\ \frac{d^2 \tau}{dt^2} = -k u_o^2 \cos \beta - g \cos \delta - \mu_o \chi \cos \delta \end{cases}, \quad (2.15)$$

С другой стороны, руководствуясь законом сложения скоростей, уравнение движения частицы можно представить следующим образом (2.25):

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = u_o \cos \beta + V_{\text{в}} \cos \varphi \\ \frac{d\tau}{dt} = u_o \sin \beta + V_{\text{в}} \sin \varphi \end{cases}, \quad (2.16)$$

После преобразования системы уравнений получим (2.26):

$$\begin{cases} u_o \cos \beta = \frac{dn}{dt} - V_{\text{в}} \cos \varphi \\ u_o \sin \beta = \frac{d\tau}{dt} - V_{\text{в}} \sin \varphi \end{cases}, \quad (2.17)$$

Подставляем полученные значения системы (2.17) в (2.15). Тогда уравнение примет вид (2.18):

$$\begin{cases} \frac{d^2n}{dt^2} = -\frac{u_o^2}{r_t} - k u_o \left(\frac{dn}{dt} - V_B \cos\varphi \right) + g \sin\delta + \mu_o X \sin\delta \\ \frac{d^2\tau}{dt^2} = -k u_o \left(\frac{d\tau}{dt} - V_B \sin\varphi \right) - g \cos\delta - \mu_o X \cos\delta \end{cases}, \quad (2.18)$$

Раскрыв скобки, получим (2.28):

$$\begin{cases} \frac{d^2n}{dt^2} = -\frac{u_o^2}{r_t} - k u_o \frac{dn}{dt} + k u_o V_B \cos\varphi + g \sin\delta + \mu_o X \sin\delta \\ \frac{d^2\tau}{dt^2} = -k u_o \frac{d\tau}{dt} + k u_o V_B \sin\varphi - g \cos\delta - \mu_o X \cos\delta \end{cases}, \quad (2.19)$$

Заменим $\frac{dn}{dt} = N(t)$, $\frac{d\tau}{dt} = T(t)$ и подставим в выражении (2.19) и получим (2.20):

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -\frac{u_o^2}{r_t} - k u_o N(t) + k u_o V_B \cos\varphi + g \sin\delta + \mu_o X \sin\delta \\ \frac{dT}{dt} = -k u_o T(t) + k u_o V_B \sin\varphi - g \cos\delta - \mu_o X \cos\delta \end{cases}, \quad (2.20)$$

Запишем уравнение движения материальной частицы в форме уравнения Эйлера (2.21):

$$m \frac{du_o}{dt} = -R - F_{\text{ц}} \cos\beta + G \sin\delta \cos\beta + F_{\text{магн}} \sin\delta \cos\beta, \quad (2.21)$$

Подставив значения сил в выражение (2.21), сократим на m и умножим на dt , получим (2.22):

$$du_o = \left(g \sin\delta \cos\beta + \mu_o X \sin\delta \cos\beta - k u_o^2 - \frac{u_o^2}{r_t} \cos\beta \right) dt, \quad (2.22)$$

Сгруппировав члены выражения, получим (2.23):

$$\frac{du_o}{\left(g \sin\delta \cos\beta + \mu_o X \sin\delta \cos\beta - k u_o^2 - \frac{u_o^2}{r_t} \cos\beta \right)} = dt, \quad (2.23)$$

Вычислим величину изменения скорости частицы за временной интервал от начального момента времени 0 до конечного момента Δt (2.24):

$$\int_0^{\Delta t} \frac{du_o}{\left(g \sin\delta \cos\beta + \mu_o X \sin\delta \cos\beta - k u_o^2 - \frac{u_o^2}{r_t} \cos\beta \right)} = \int_0^{\Delta t} dt, \quad (2.24)$$

Вынося за скобки квадрат относительной скорости u_o , приходим к следующему выражению (2.25):

$$\int_0^{\Delta t} \frac{du_o}{g \sin\delta \cos\beta + \mu_o X \sin\delta \cos\beta - u_o^2 \left(k + \frac{\cos\beta}{r_t} \right)} = \int_0^{\Delta t} dt, \quad (2.25)$$

За знак интеграла вынесем выражение $1/(k + \cos\beta/r_t)$. Тогда выражение

примет вид (2.26):

$$\frac{1}{\left(k+\frac{\cos\beta}{r_t}\right)} \int_0^{\Delta t} \frac{du_o}{\frac{g\sin\delta\cos\beta+r_t\mu_o X\sin\delta\cos\beta}{\left(k+\frac{\cos\beta}{r_t}\right)} - u_o^2} = \int_0^{\Delta t} dt, \quad (2.26)$$

После интегрирования получим (2.27):

$$\frac{r_t}{r_t k + \cos\beta} * \frac{1}{2\sqrt{\frac{r_t g\sin\delta\cos\beta+r_t\mu_o X\sin\delta\cos\beta}{(r_t k + \cos\beta)}}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{r_t g\sin\delta\cos\beta+r_t\mu_o X\sin\delta\cos\beta}{(r_t k + \cos\beta)}} + u_o}{\sqrt{\frac{r_t g\sin\delta\cos\beta+r_t\mu_o X\sin\delta\cos\beta}{(r_t k + \cos\beta)}} - u_o} \right| = t, \quad (2.27)$$

Заменяя $\sqrt{\frac{r_t g\sin\delta\cos\beta+r_t\mu_o X\sin\delta\cos\beta}{(r_t k + \cos\beta)}} = a$, запишем (2.28):

$$\frac{r_t}{2a(r_t k + \cos\beta)} \ln \left| \frac{a+u_o}{a-u_o} \right| = t, \quad (2.28)$$

На интервале времени от 0 до Δt выражение примет вид (2.29):

$$\frac{r_t}{2a(r_t k + \cos\beta)} \ln \left| \frac{a+u_o}{a-u_o} \right| - \frac{r_t}{2a(r_t k + \cos\beta)} \ln \left| \frac{a+u_{o1}}{a-u_{o1}} \right| = \Delta t, \quad (2.29)$$

или (2.30):

$$\ln \left| \frac{a+u_o}{a-u_o} \right| - \ln \left| \frac{a+u_{o1}}{a-u_{o1}} \right| = \frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t}, \quad (2.30)$$

Выразим u_o из уравнения (2.30) и получим (2.31):

$$u_o = a \left(\frac{\frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} e^{\frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t}} - (a-u_{o1})}{\frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} e^{\frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t}} + (a-u_{o1})} \right), \quad (2.31)$$

Разложив экспоненту в степенной ряд, получим (2.32):

$$e^{2akt} = 1 + \frac{2a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} + 2 \left(\frac{a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{a(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} \right)^3 + \dots \quad (2.32)$$

Подставив уравнение (2.32) в (2.31), раскрыв скобки и выделив целую часть дроби, получим (2.33):

$$u_o = u_{o1} + (a^2 - u_{o1}^2) \frac{(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} + \dots \quad (2.33)$$

Выполнив замену $(a^2 - u_{o1}^2) \frac{(r_t k + \cos\beta)\Delta t}{r_t} = u_{o2}$, можно вывести выражение для относительной скорости частицы в воздушном потоке, представленное в виде степенного ряда, зависящего от переменной t (2.34):

$$u_o = u_{o1} + u_{o2}\Delta t + u_{o3}\Delta t^2 + \dots \quad (2.34)$$

Решения функций $N(\Delta t)$ и $T(\Delta t)$ найдем также с помощью степенных

рядов по переменной t (2.35):

$$\begin{cases} N(\Delta t) = n_0 + n_1 \Delta t + n_2 \Delta t^2 + \dots \\ T(\Delta t) = \tau_0 + \tau_1 \Delta t + \tau_2 \Delta t^2 + \dots \end{cases} \quad (2.35)$$

Продифференцировав уравнения в системе уравнений (2.35) по переменной t , получим (2.36):

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = n_1 + 2n_2 \Delta t + 3n_3 \Delta t^2 \dots \\ \frac{dT}{dt} = \tau_1 + 2\tau_2 \Delta t + 3\tau_3 \Delta t^2 \dots \end{cases} \quad (2.36)$$

Подставим в уравнение (2.19) выражения из формул (2.35) и (2.36), после чего сгруппируем уравнения по степеням Δt . В результате получим бесконечную систему уравнений, необходимую для нахождения неизвестных коэффициентов (2.37):

$$\begin{cases} n_1 = -\frac{u_{o1}^2}{r_t} - ku_{o1} x_0 + ku_{o1} V_B \cos \varphi + g \sin \delta + \mu_o X \sin \delta \\ 2n_2 = -\frac{2u_{o1} u_{o2} \Delta t}{r_t} - ku_{o1} x_1 \Delta t - ku_{o2} x_0 \Delta t + ku_{o2} \Delta t V_B \cos \varphi \\ \vdots \\ \tau_1 = -ku_{o1} \tau_0 + ku_{o1} V_B \sin \varphi - g \cos \delta - \mu_o X \cos \delta \\ 2\tau_2 = -ku_{o1} \tau_1 \Delta t - ku_{o2} \tau_0 \Delta t + ku_{o2} \Delta t V_B \sin \varphi \\ \vdots \end{cases}, \quad (2.37)$$

В момент времени $t=0$ координаты точки определяется по выражениям (2.38):

$$\begin{aligned} n_1 &= -\frac{u_{o1}^2}{r_t} - ku_{o1} x_0 + ku_{o1} V_B \cos \varphi + g \sin \delta + \mu_o X \sin \delta \\ \tau_1 &= -ku_{o1} \tau_0 + ku_{o1} V_B \sin \varphi - g \cos \delta - \mu_o X \cos \delta \end{aligned}, \quad (2.38)$$

Подставив указанные уравнения в выражение (2.35) и оставив только линейные члены, мы получим уравнение, позволяющее определить скорость частицы (2.39):

$$\begin{cases} N(\Delta t) = n_0 + (-\frac{u_{o1}^2}{r_t} - ku_{o1}^2 \cos \beta + g \sin \delta + \mu_o X \sin \delta) \Delta t \\ T(\Delta t) = \tau_0 + (-ku_{o1}^2 \cos \beta - g \cos \delta - \mu_o X \cos \delta) \Delta t \end{cases}, \quad (2.39)$$

Проинтегрировав систему уравнений (2.39), получим выражения для перемещения частицы за промежутки времени Δt (2.40):

$$\begin{cases} n(\Delta t) = n_0 \Delta t + \left(-\frac{u_{o1}^2}{r_t} - k u_{o1}^2 \cos \beta + g \sin \delta + \mu_o X \sin \delta \right) \frac{\Delta t^2}{2}, \\ \tau(\Delta t) = \tau_0 \Delta t + \left(-k u_{o1}^2 \cos \beta - g \cos \delta - \mu_o X \cos \delta \right) \frac{\Delta t^2}{2}, \end{cases} \quad (2.40)$$

Подводя итоги, получены выражения, описывающие изменение скорости и перемещение частицы в криволинейном канале.

2.4. Обоснование скорости частицы в криволинейном воздушном потоке пневматического сепаратора

Очищенный воздушно-продуктовый поток от минеральных и металлических примесей попадает в зону с криволинейным воздушным потоком. Рассмотрим движение частицы, принадлежащей зерновой смеси в вертикальном сепарирующем канале (рис. 2.8).

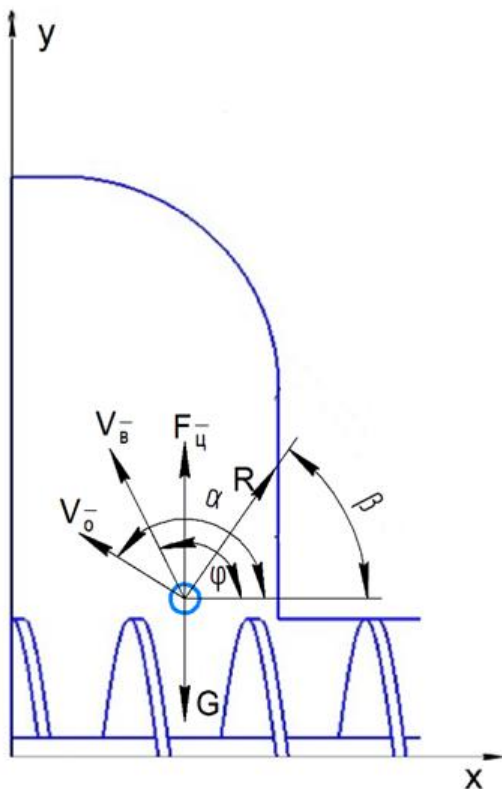


Рисунок 2.8 – Схема действия сил, действующих на частицу в вертикальном сепарирующем канале [25,28]

Частица воздушного потока массой m движется в направлении, заданном всасывающим воздушным потоком. В процессе движения она испытывает воздействие ряда сил:

1. Сила аэродинамического сопротивления R , возникающая при движении частицы в воздушном потоке;
2. Гравитационная сила mg , обусловленная действием земного притяжения;
3. Центробежная сила $F_{ц}$, возникшая у частицы при движении по винтовой траектории.

Абсолютная скорость частицы V_0 формируется под воздействием скорости воздушного потока V_b . Во время

движения направление силы тяжести остается постоянным, в то время как направление силы сопротивления постоянно меняется, что создает

динамичный характер ее перемещения.

Запишем для рассматриваемого случая второй закон Ньютона (2.41):

$$m \cdot \vec{W} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{F}_{\text{ц}}, \quad (2.41)$$

где m – масса частицы,

$\vec{W}$ – векторная скорость воздушного потока,

$\vec{R}$ – сила аэродинамического сопротивления,

$\vec{G}$ – гравитационная сила,

$\vec{F}_{\text{ц}}$ – центробежная сила.

В проекциях на оси координат уравнение запишется в виде (2.42):

$$\begin{cases} m \frac{d^2 n}{dt^2} = F_{\text{ц}} + R \cos \beta \\ m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = F_{\text{ц}} \sin \beta + R \sin \beta - G \end{cases}, \quad (2.42)$$

$$\text{где} \quad \begin{cases} F_{\text{ц}} = \frac{m u_0^2}{r} \\ R = m k_{\text{п}} u_0^2 \\ \vec{u}_0 = \vec{v}_0 - \vec{v}_u \end{cases}$$

Подставив значения действующих сил в выражение (2.43) и сократив все члены системы уравнения на m , получим:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{u_0^2}{r} + k u_0^2 \cos \beta \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{u_0^2}{r} \sin \beta + k u_0^2 \sin \beta - g \end{cases}, \quad (2.43)$$

Запишем выражение (2.43) используя закон сложения скоростей (2.44):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -u_0 \cos \beta + V_{\text{в}} \cos \varphi \\ \frac{dy}{dt} = -u_0 \sin \beta + V_{\text{в}} \sin \varphi \end{cases}, \quad (2.44)$$

После преобразования системы уравнений получим (2.45):

$$\begin{cases} u_0 \cos \beta = -\frac{dx}{dt} + V_{\text{в}} \cos \varphi \\ u_0 \sin \beta = -\frac{dy}{dt} + V_{\text{в}} \sin \varphi \end{cases}, \quad (2.45)$$

Подставляем полученные значения системы (2.45) в (2.43). Тогда уравнение примет вид (2.46):

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{u_0^2}{r} + k u_0 \left(-\frac{dx}{dt} + V_B \cos\varphi\right) \\ \frac{d^2y}{dt^2} = k u_0 \left(-\frac{dy}{dt} + V_B \sin\varphi\right) - g \end{cases}, \quad (2.46)$$

Раскрыв скобки, получим (2.47):

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{u_0^2}{r} - k u_0 \frac{dx}{dt} + k u_0 V_B \cos\varphi \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -k u_0 \frac{dy}{dt} + k u_0 V_B \sin\varphi - g \end{cases}, \quad (2.47)$$

Заменим $\frac{dx}{dt} = X(t)$, $\frac{dy}{dt} = Y(t)$ и подставим в выражении (2.47) и получим (2.48):

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -\frac{u_0^2}{r} - k u_0 X(t) + k u_0 V_B \cos\varphi \\ \frac{dY}{dt} = -k u_0 Y(t) + k u_0 V_B \sin\varphi - g \end{cases}, \quad (2.48)$$

Для решения системы уравнений (2.48) запишем уравнение движения частицы в форме уравнения Эйлера (2.49):

$$m \frac{du_0}{dt} = mg \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - m k u_0^2 - \frac{m u_0^2}{r}, \quad (2.49)$$

Подставив значения сил в выражение (2.58), сократим на m и умножим на dt , получим (2.50):

$$du_0 = \left(g \sin\beta - k u_0^2 - \frac{u_0^2}{r}\right) dt, \quad (2.50)$$

Проведя группировку членов выражения (2.50), получим (2.51):

$$\frac{du_0}{(g \sin\beta - k u_0^2 - \frac{u_0^2}{r})} = dt, \quad (2.51)$$

Определим изменение скорости частицы на промежутке времени от 0 до Δt (2.52):

$$\int_0^{\Delta t} \frac{du_0}{\left(g \sin\beta - k u_0^2 - \frac{u_0^2}{r}\right)} = \int_0^{\Delta t} dt, \quad (2.52)$$

Вынесем за скобку коэффициент парусности k и получим (2.53):

$$\frac{1}{k} \int_0^{\Delta t} \frac{du_0}{g \sin\beta - u_0^2 - \frac{u_0^2}{kr}} = \int_0^{\Delta t} dt, \quad (2.53)$$

После интегрирования получим (2.54):

$$\frac{1}{2\sqrt{k g \sin \beta}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{g \sin \beta}{k}} + u_0 + \frac{u_0}{r}}{\sqrt{\frac{g \sin \beta}{k}} - u_0 - \frac{u_0}{r}} \right| = t, \quad (2.54)$$

Заменив $\sqrt{\frac{g \sin \beta}{k}} = a$, запишем (2.55):

$$\frac{1}{2ak} \ln \left| \frac{a + u_0 + \frac{u_0}{r}}{a - u_0 - \frac{u_0}{r}} \right| = t, \quad (2.55)$$

На интервале времени от 0 до Δt выражение примет вид (2.56):

$$\frac{1}{2ak} \ln \left| \frac{a + u_0 + \frac{u_0}{r}}{a - u_0 - \frac{u_0}{r}} \right| - \frac{1}{2ak} \ln \left| \frac{a + u_{01} + \frac{u_{01}}{r}}{a - u_{01} - \frac{u_{01}}{r}} \right| = \Delta t, \quad (2.56)$$

или

$$\ln \left| \frac{a + u_0 + \frac{u_0}{r}}{a - u_0 - \frac{u_0}{r}} \right| - \ln \left| \frac{a + u_{01} + \frac{u_{01}}{r}}{a - u_{01} - \frac{u_{01}}{r}} \right| = 2ak\Delta t, \quad (2.57)$$

Выразим u_0 из уравнения (2.57) и получим (2.58):

$$u_0 = a \left(\frac{r(a + u_{01})e^{2ak\Delta t} - r(a - u_{01})}{r(a + u_{01})e^{2ak\Delta t} + r(a - u_{01})} \right), \quad (2.58)$$

Для упрощения дальнейших расчетов экспоненту разложим в степенной ряд (2.59):

$$e^{2ak\Delta t} = 1 + 2ak\Delta t + \frac{1}{2}(2ak\Delta t)^2 + \frac{4}{3}(2ak\Delta t)^3 + \dots \quad (2.59)$$

Подставив уравнение (2.59) в (2.58), раскрыв скобки и выделив целую часть дроби, получим (2.60):

$$u_0 = u_{01} + (a^2 - u_{01}^2)k\Delta t + \dots \quad (2.60)$$

Выполнив замену выражения $(a^2 - u_{01}^2)k = u_{02}$, получим формулу для относительной скорости частицы в воздушном потоке, представленную в виде степенного ряда по переменной t (2.61):

$$u_0 = u_{01} + u_{02}\Delta t + u_{03}\Delta t^2 + \dots \quad (2.61)$$

Решения функций $X(\Delta t)$ и $Y(\Delta t)$ найдем также с помощью степенных рядов по переменной t (2.62):

$$\begin{cases} X(\Delta t) = x_0 + x_1 \Delta t + x_2 \Delta t^2 + \dots \\ Y(\Delta t) = y_0 + y_1 \Delta t + y_2 \Delta t^2 + \dots \end{cases} \quad (2.62)$$

Продифференцировав уравнения в системе уравнений (2.62) по переменной t , получим (2.63):

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = x_1 + 2x_2 \Delta t + 3x_3 \Delta t^2 + \dots \\ \frac{dY}{dt} = y_1 + 2y_2 \Delta t + 3y_3 \Delta t^2 + \dots \end{cases} \quad (2.63)$$

Подставим в уравнение (2.48) формулы (2.61), (2.62) и (2.63) и сгруппировав уравнения системы по степеням Δt , получим (2.64):

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 \Delta t + 3x_3 \Delta t^2 + \dots = -k(u_{o1} + u_{o2} \Delta t + u_{o3} \Delta t^2 + \dots)(x_0 + x_1 \Delta t + x_2 \Delta t^2 + \dots) + \\ \quad + k(u_{o1} + u_{o2} \Delta t + u_{o3} \Delta t^2 + \dots)V_B \cos \varphi \\ y_1 + 2y_2 \Delta t + 3y_3 \Delta t^2 + \dots = -k(u_{o1} + u_{o2} \Delta t + u_{o3} \Delta t^2 + \dots)(y_0 + y_1 \Delta t + y_2 \Delta t^2 + \dots) + \\ \quad + k(u_{o1} + u_{o2} \Delta t + u_{o3} \Delta t^2 + \dots)V_B \sin \varphi - g \end{cases} \quad (2.64)$$

Группируя уравнения системы по степеням Δt , получаем бесконечную систему уравнений, предназначенную для нахождения неопределенных коэффициентов (2.65):

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{u_{o1}^2}{r} - k u_{o1} x_0 + k u_{o1} V_B \cos \varphi \\ 2x_2 \Delta t = -\frac{2u_{o1}^2 \Delta t}{r} - k u_{o1} x_1 \Delta t - k u_{o2} x_0 \Delta t + k u_{o2} \Delta t V_B \cos \varphi \\ \vdots \\ y_1 = -k u_{o1} y_0 + k u_{o1} V_B \sin \varphi - g \\ 2y_2 \Delta t = -k u_{o1} y_1 \Delta t - k u_{o2} y_0 \Delta t + k u_{o2} \Delta t V_B \sin \varphi \\ \vdots \end{cases}, \quad (2.65)$$

В момент времени $t=0$ координаты точки определяется по выражениям (2.66):

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{u_{o1}^2}{r} - k u_{o1} x_0 + k u_{o1} V_B \cos \varphi \\ y_1 = -k u_{o1} y_0 + k u_{o1} V_B \sin \varphi - g \end{cases}, \quad (2.66)$$

Подставив данные уравнения в выражение (2.62), ограничиваясь линейной частью, получим уравнение для определения скорости частицы (2.67):

$$\begin{cases} X(\Delta t) = x_0 + \left(\frac{V_0^2}{r} - ku_0 x_0 + ku_0 V_B \cos \varphi \right) \Delta t \\ Y(\Delta t) = y_0 + (-ku_0 \tau_0 + ku_0 V_B \sin \varphi - g) \Delta t \end{cases}, \quad (2.67)$$

Проинтегрировав систему уравнений (2.67), получим выражения для перемещения частицы за промежуток времени Δt (2.68):

$$\begin{cases} x(\Delta t) = x_0 \Delta t + \left(\frac{V_0^2}{r} - ku_0 x_0 + ku_0 V_B \cos \varphi \right) \frac{\Delta t^2}{2} \\ y(\Delta t) = y_0 \Delta t + (-ku_0 \tau_0 + ku_0 V_B \sin \varphi - g) \frac{\Delta t^2}{2} \end{cases}, \quad (2.68)$$

Таким образом, разработаны математические модели, позволяющие описать процесс движения частицы с заданными параметрами в вертикальном сепарирующем канале.

Используя выражения (2.40) и (2.68), а также при помощи программирования в программе «IDE Python», построены траектории движения зерновки, минеральной и металломагнитной примеси в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом (рис. 2.9).

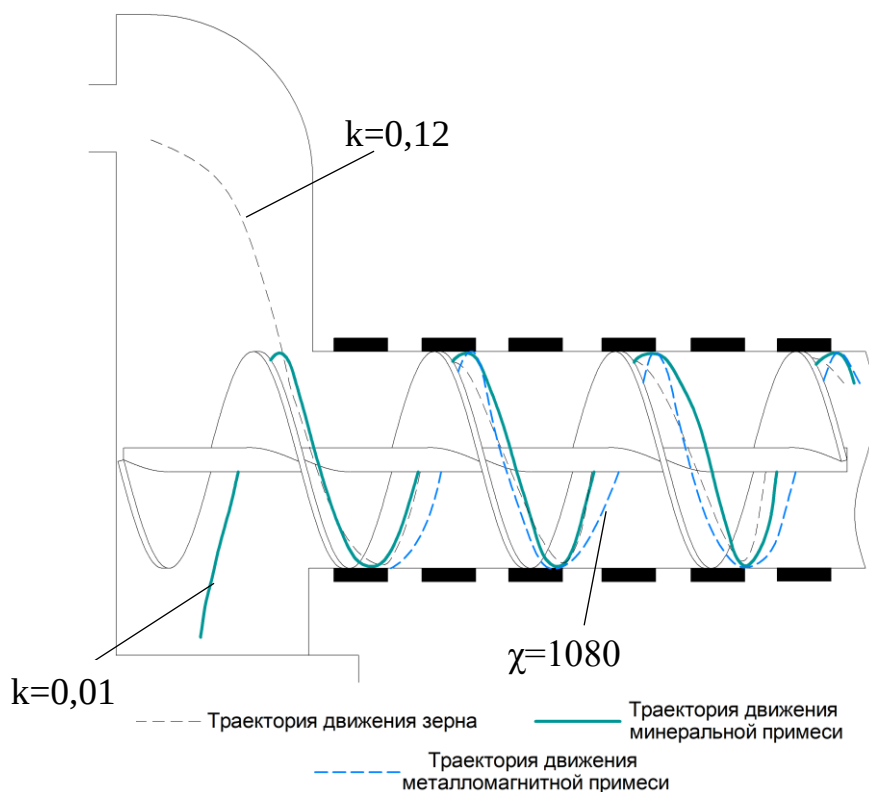


Рисунок 2.9 – Траектории движения частиц

Для изучения закономерностей движения частиц пневмосепаратор был разделен на 2 зоны очистки зерна. Первый участок А – пневмосепарирующий

канал с винтовым рабочим органом, второй участок Б - для изучения восходящих и нисходящих воздушных потоков.

Использована программа «SolidWorks» и приняты следующие параметры: длина винтового рабочего органа 0,22 метра с учетом длины патрубка (0,062 метра); диаметр 0,07 метра; шаг винта 0,06 метра, количество витков 4. Поставлены граничные условия: на входном патрубке V_v – скорость воздуха 20 м/с; на выходном патрубке установлено $p_{атм}$ – атмосферное давление 10^5 Па. Вектор силы тяжести направлен по оси Z вниз. Форма зерна принята идеальной сферой с диаметром 10 мм, а минеральные примеси характеризуются диаметром 30 мм. Выбор диаметра оси винтового рабочего органа, равного 10 мм, обусловлен инженерными рекомендациями по проектированию винтовых конвейеров и направлен на обеспечение прочности конструкции. Согласно принятым методам изучения воздушных потоков, основным рабочим телом послужил идеальный несжимаемый газ при комнатной температуре 20°C. При построении графиков ось X была определена программой как «Предельное время траекторий» [25,28].

Для определения потерь давления в канале пневмосепаратора с винтовым рабочим органом было проведено компьютерное моделирование движения воздушного потока в сепараторе посредством программного продукта SolidWorks2020 (рис. 2.10). Моделирование воздушного потока проводится без учета влияния зерновой смеси.

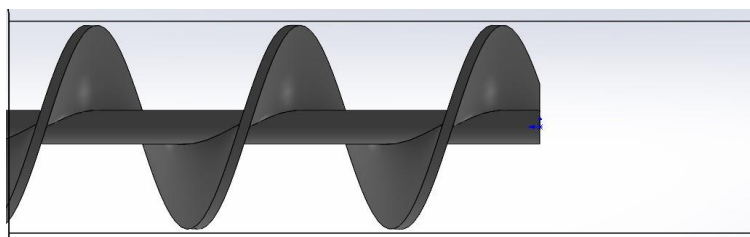


Рисунок 2.10 – Модель рабочего органа пневмосепаратора

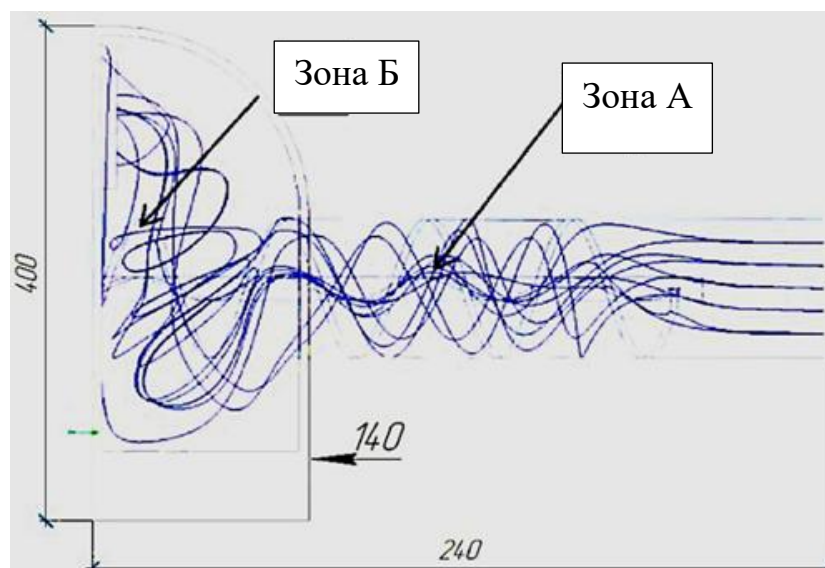


Рисунок 2.11 – Схема траекторий движения элементарных струек потока воздуха (линий тока) в пневмосепараторе в программном продукте

SolidWorks2020:

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

В результате компьютерного моделирования определена траектория движения воздушного потока по винтовой траектории (рис. 2.11). Данный рисунок наглядно демонстрирует, что при попадании частицы в зону А винтового воздушного канала она движется по спиралевидной траектории. Переходя к зоне Б, траектории приобретают характер нисходящего и восходящего потоков.

Согласно предварительным результатам численного моделирования движения воздушного потока в сепараторе с начальной скоростью 20 м/с, выявлено, что поток перемещается по винтовой траектории аспирационного канала, причем его скорость возрастает при входе из патрубка в канал вследствие уменьшения площади поперечного сечения (рис. 2.12).

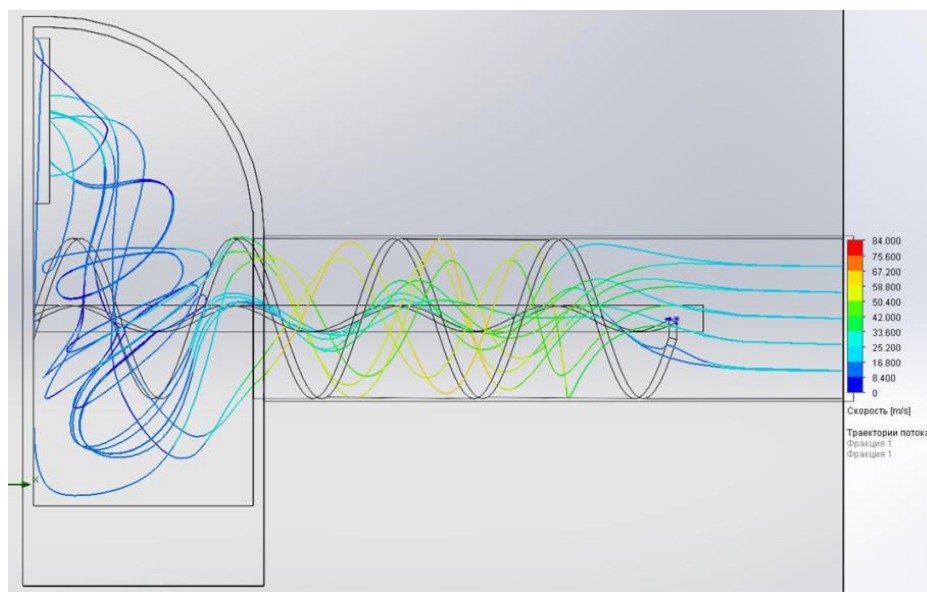
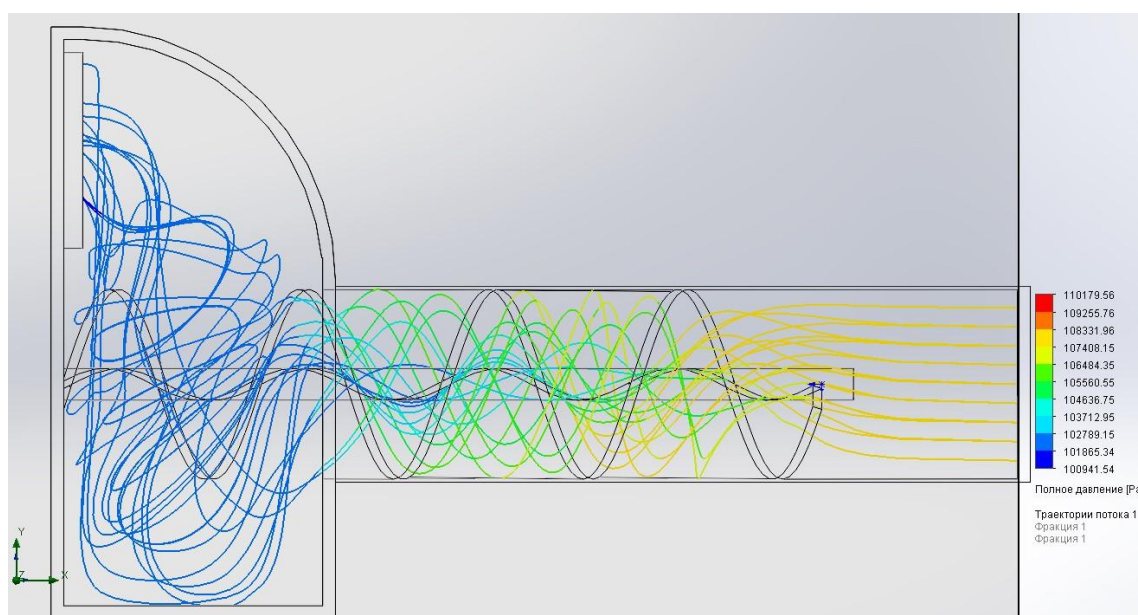
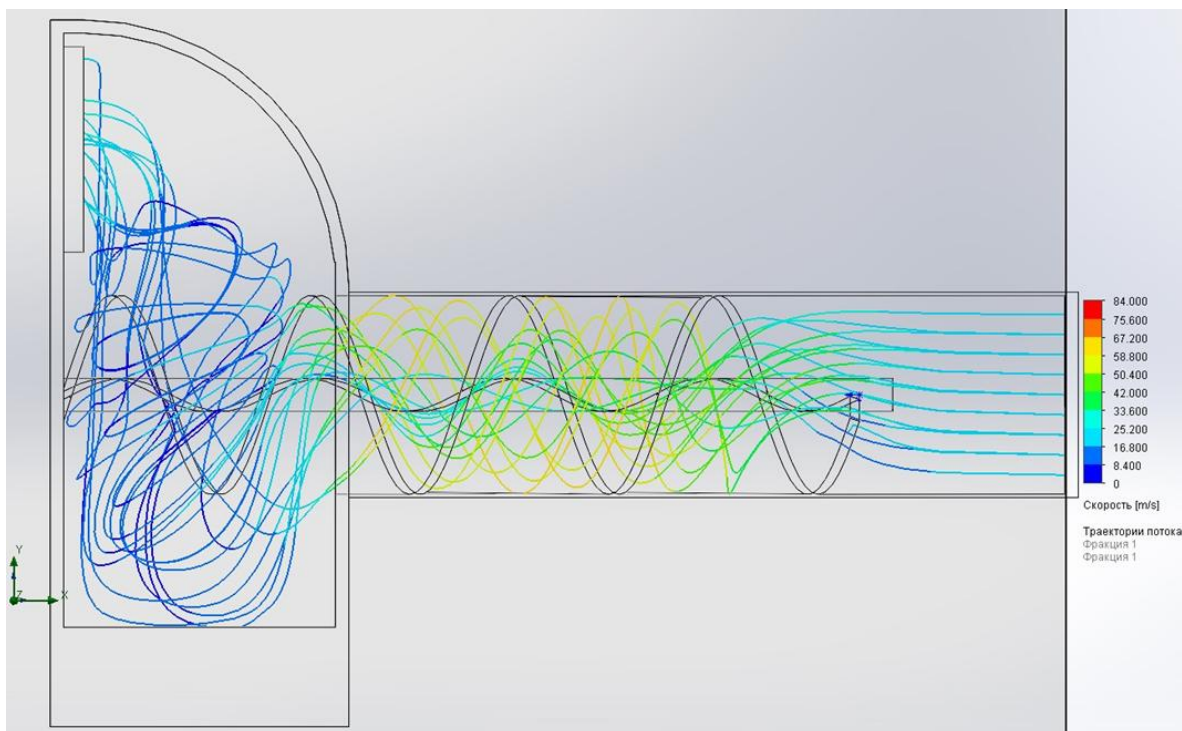


Рисунок 2.12 – Траектории движения элементарных струек потока воздуха
(скорость воздушного потока, м/с)

В результате проведенного моделирования определены градиент изменения давления (график а) и скорость воздушного потока (график б) в пневмосепараторе. Результаты графически интерпретированы на рисунке 2.13.



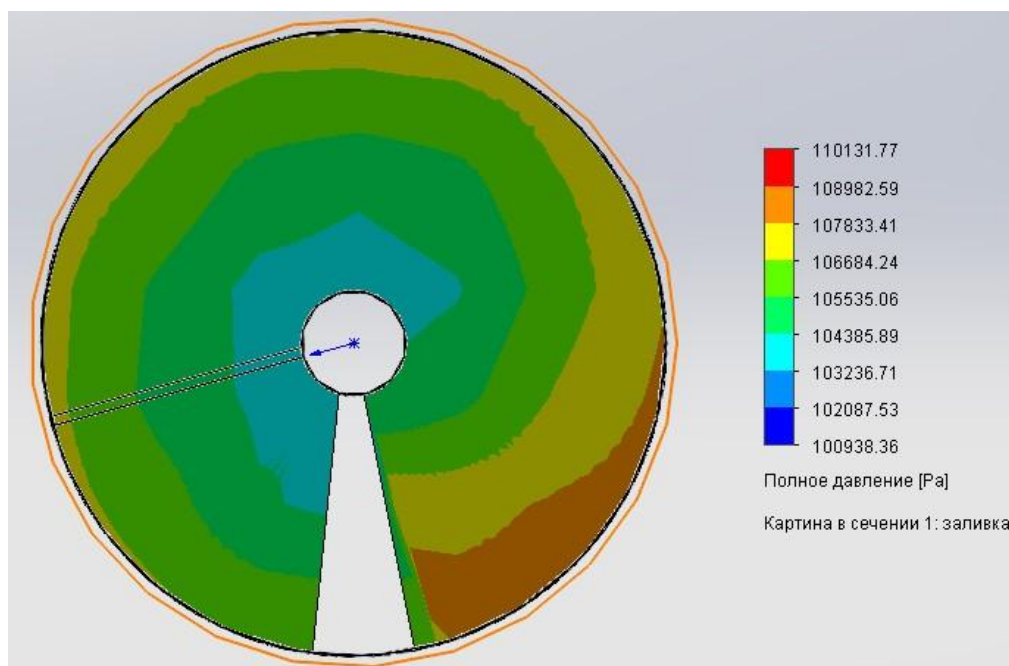
а



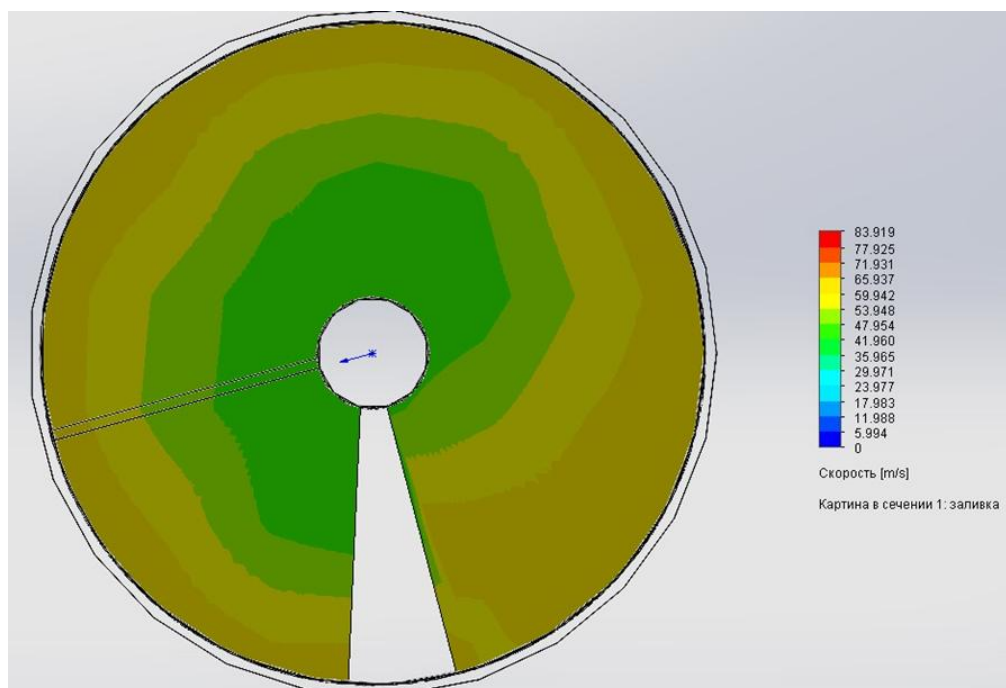
б

Рисунок 2.13– Градиент изменения давления, Па(а), скорости воздушного потока, м/с(б)

Исследования позволили определить распределение давления (пункт а) и скорости (пункт б) в поперечном разрезе пневмосепаратора. Результаты моделирования представлены графически на рисунке 2.14.



а



б

Рисунок 2.14– Показатели давления, Па(а), скорости, м/с(б)

Наблюдается четкая зависимость давления от расстояния до оси винтового рабочего органа пневмосепаратора. Наибольшее значение давления зафиксировано вблизи стенок корпуса и составляет 110 131,77 Па, наименьшее наблюдается ближе к центральной оси и составляет 103 236,71 Па (рис. 2.14а).

Режим движения воздуха носит ламинарный характер, при котором возникают силы трения между слоями воздуха, движущимися с разными скоростями. Ближе к центру трубки скорость увеличивается, достигая максимума, в то время как у стенок скорость заметно уменьшается вплоть до нуля.

Слои воздуха, прилегающие к стенкам, замедляют движение окружающих слоев, создавая цепочку затухающих воздействий. Чем сильнее отличается скорость соседних слоев, тем выше становится сила трения между ними.

График на рис. 2.14б демонстрирует распределение скорости воздушного потока в рабочем органе пневмосепаратора. Максимальная скорость зафиксирована возле стенок корпуса и достигает 65,937 м/с, далее,

по мере приближения к оси, скорость постепенно снижается до 59—53 м/с, а непосредственно на оси она резко падает до минимума — около 35 м/с.

На основе полученных данных построен график изменения скорости воздушного потока (рис. 2.15).

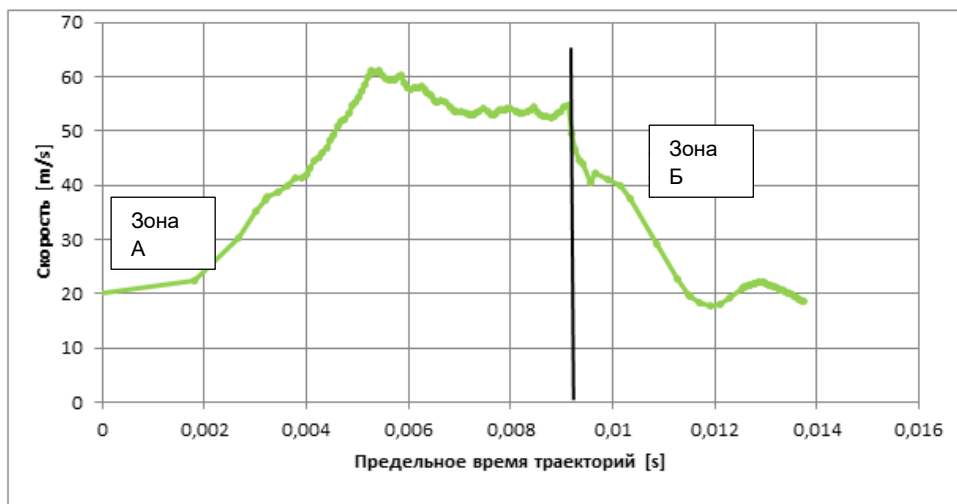


Рисунок 2.15 – График изменения скорости воздушного потока

На основе графика можно сказать, что в зоне А скорость воздушного потока при движении по винтовой траектории возрастает до 65,937 м/с. Скорость воздушного потока равна 59-53 м/с. При достижении зоны Б скорость падает с 53 м/с до 18 м/с. Однако, скорость возрастает до 22 м/с у выходного патрубка пневмосепаратора.

Рассмотрим траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе на рисунке 2.16.

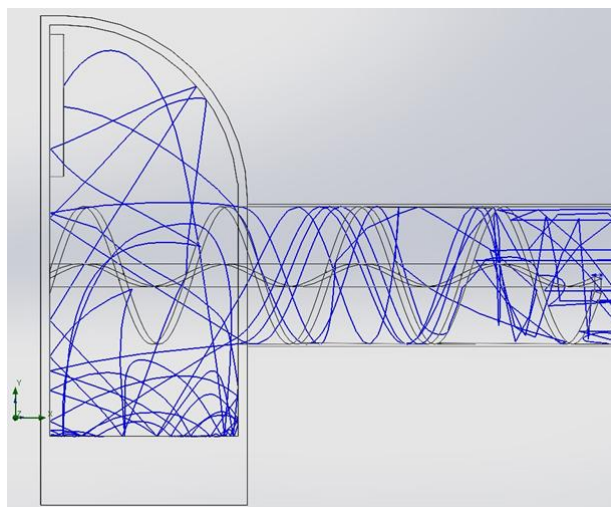


Рисунок 2.16 – Траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом с 4 витками

На основе разработанной модели построен график изменения скорости движения зерна (рис. 2.17). Видно, что скорость частицы существенно меняется в процессе ее движения по траектории. В зоне А скорость зерна нарастает и достигает значения 20,1 м/с. Однако при дальнейшем продвижении по винтовой поверхности скорость постепенно снижается до 19,6 м/с. При попадании в следующую зону частица вновь набирает скорость, увеличивая ее до 20,2 м/с, и затем выходит через выпускной патрубок..

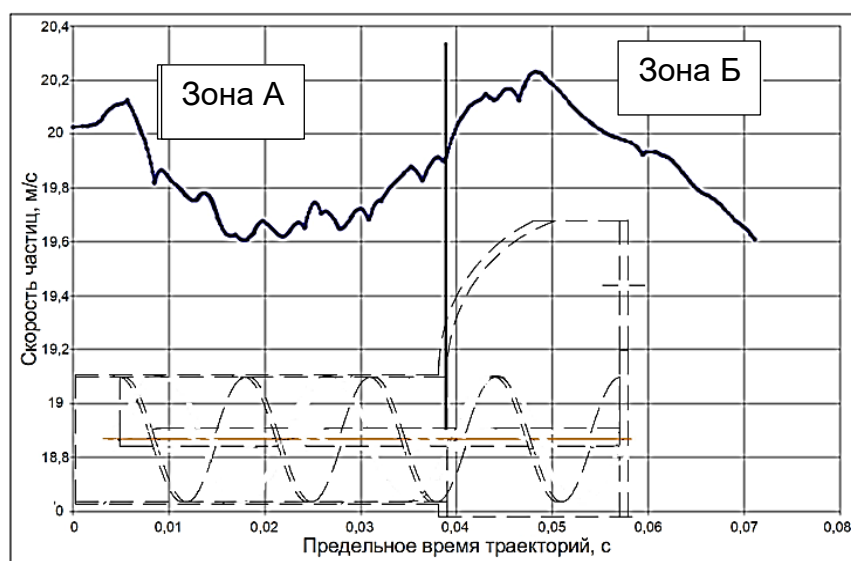


Рисунок 2.17 – График изменения скорости движения зерна

Для большей наглядности построен график, показывающий изменение положения частицы по оси Y в зависимости от времени (рис. 2.18). За точку отсчета по оси Y взята центральная ось винтового рабочего органа. Верхние и нижние границы графика соответствуют границам стенок сепаратора.

Положение частицы отображает ее движение по винтовой поверхности, после которого она направляется к выходу через специальный патрубок.

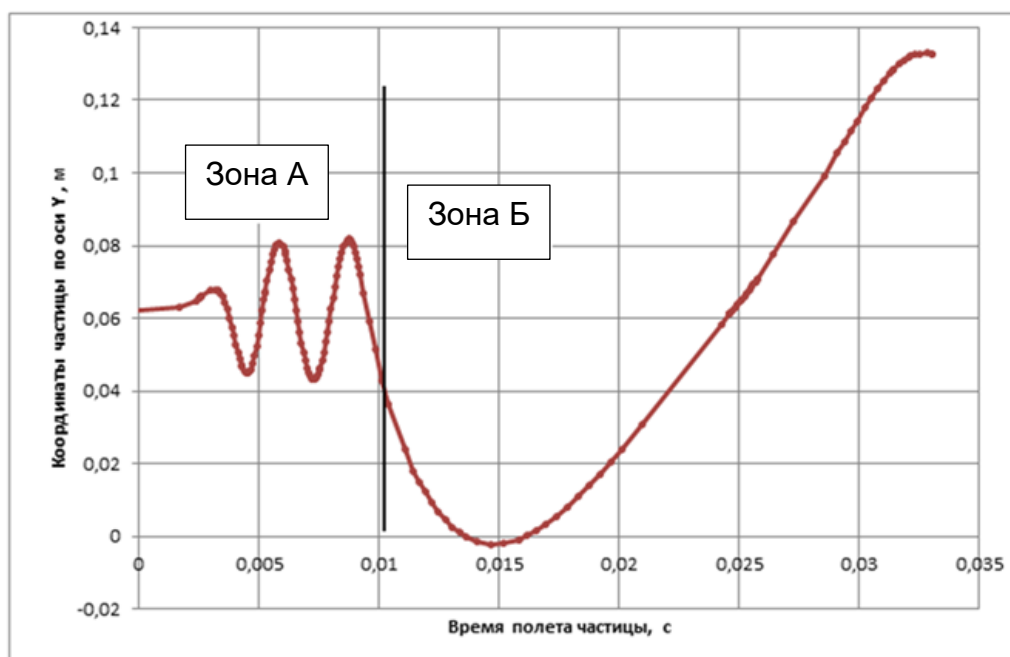


Рисунок 2.18 – График движения зерна относительно оси Y

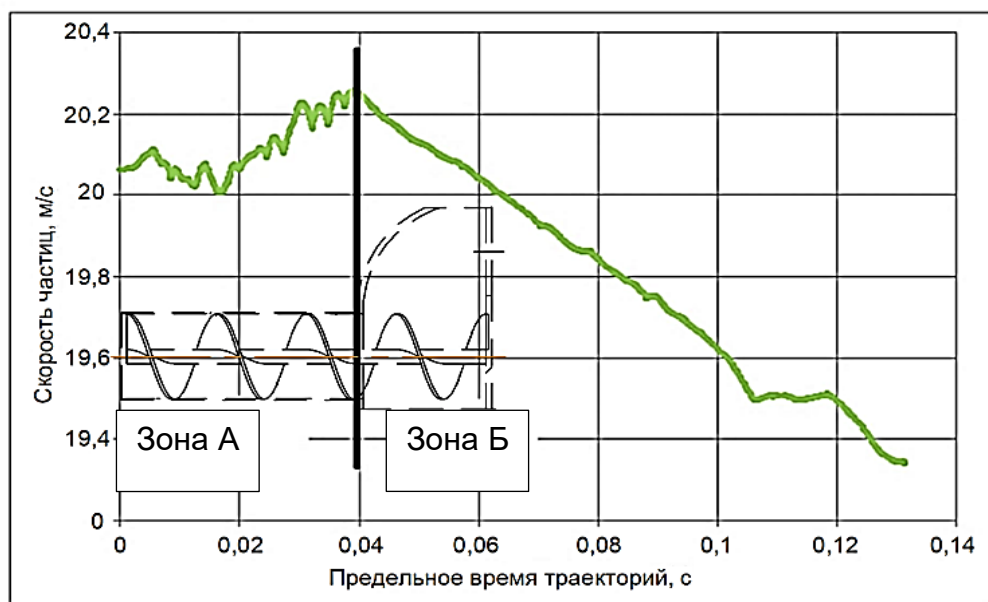


Рисунок 2.19 – График изменения скорости движения тяжелой частицы

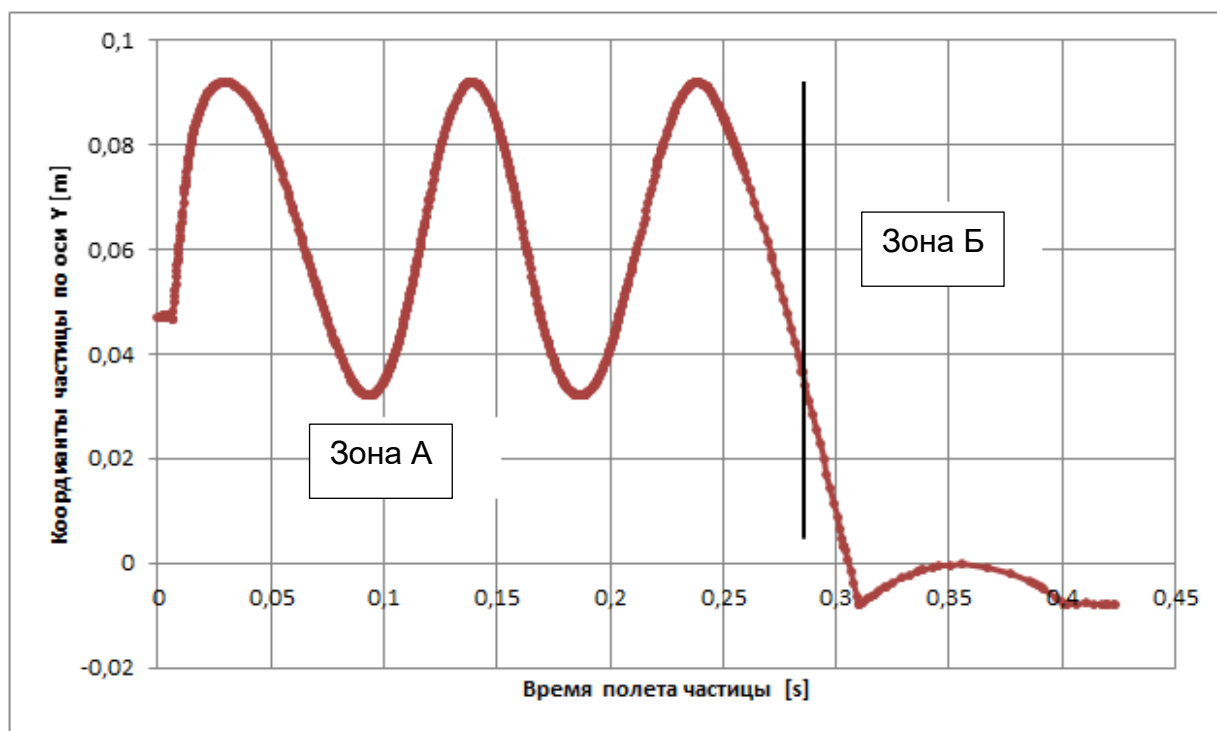


Рисунок 2.20– График движения тяжелой частицы по оси Y

График изменения скорости тяжёлой частицы (рис. 2.19) ясно показывает, что первоначально частица приобретает ускорение, затем её скорость начинает снижаться, и она теряет способность продолжать движение по винтовому каналу под воздействием воздушного потока. На графике движения тяжёлой частицы по оси Y (рис. 2.20) отчётливо видно, что тяжёлая частица перемещается к краю винтовой поверхности и продолжает своё движение по ней, а попадая в сепарационную камеру, под действием силы тяжести она погружается вниз.

Второе исследование выполнено с новыми параметрами: длина винтового рабочего органа составила 0,22 метра с добавлением длины патрубка (0,062 метра), диаметр — 0,07 метра, шаг винта — 0,08 метра, количество витков — 3. Установлены следующие граничные условия: на входе патрубка скорость воздуха V_v равна 20 м/с, на выходе — атмосферное давление $p_{атм}$ составляет 105 Па. Направление силы тяжести указано вниз по оси Z. Форма зерна принималась как идеальная сфера диаметром 10 мм, минеральная примесь имела диаметр 30 мм. Диаметр оси винтового рабочего органа составил 10 мм. Оси графиков строились автоматически программой,

при этом ось X соответствовала предельному времени траектории.

В результате предварительного компьютерного моделирования движения воздушного потока в сепараторе, стартующего со скоростью 20 м/с, выяснилось, что поток движется по винтовому аспирационному каналу. При переходе из входного патрубка в сам канал скорость воздуха возрастает ввиду изменения площади поперечного сечения (рис. 2.21).

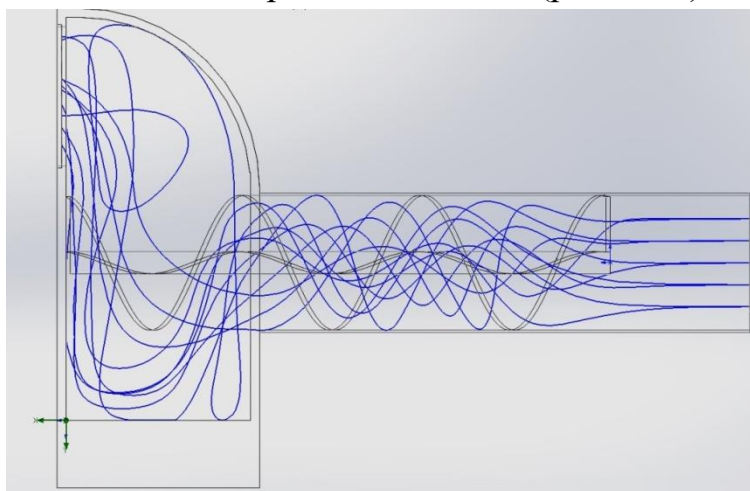
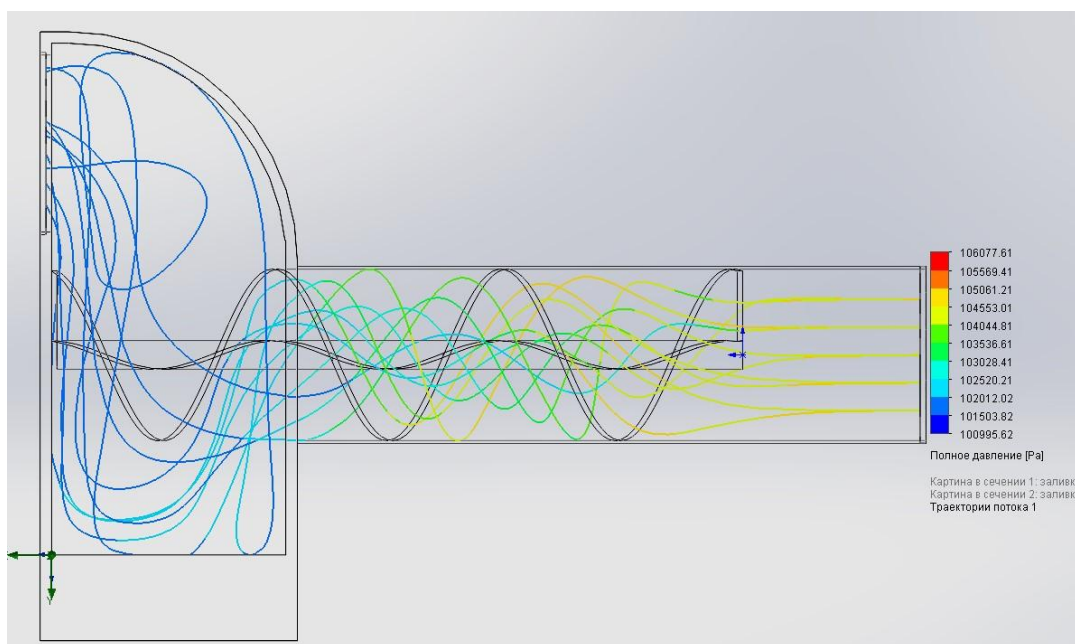
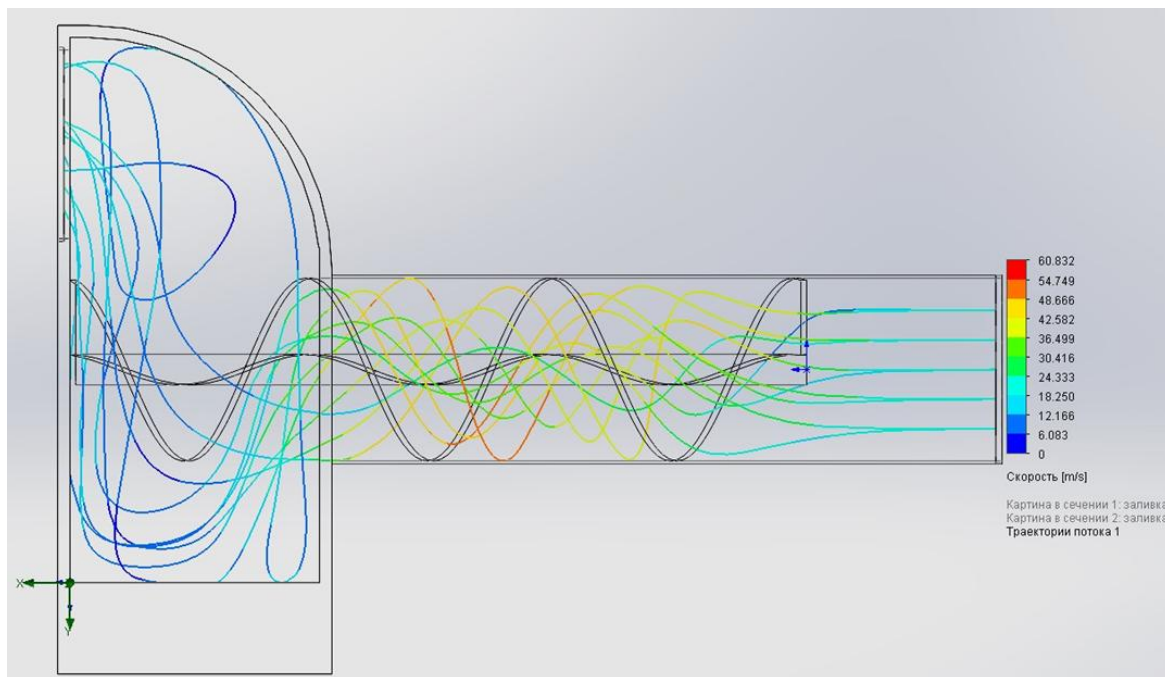


Рисунок 2.21 – Траектории движения элементарных струек потока воздуха с винтовым рабочим органом с 3 витками

В результате проведенного моделирования установлены градиент изменения давления (часть а) и скорость воздушного потока (часть б). Графическое изображение полученных данных представлено на рисунке 2.22.



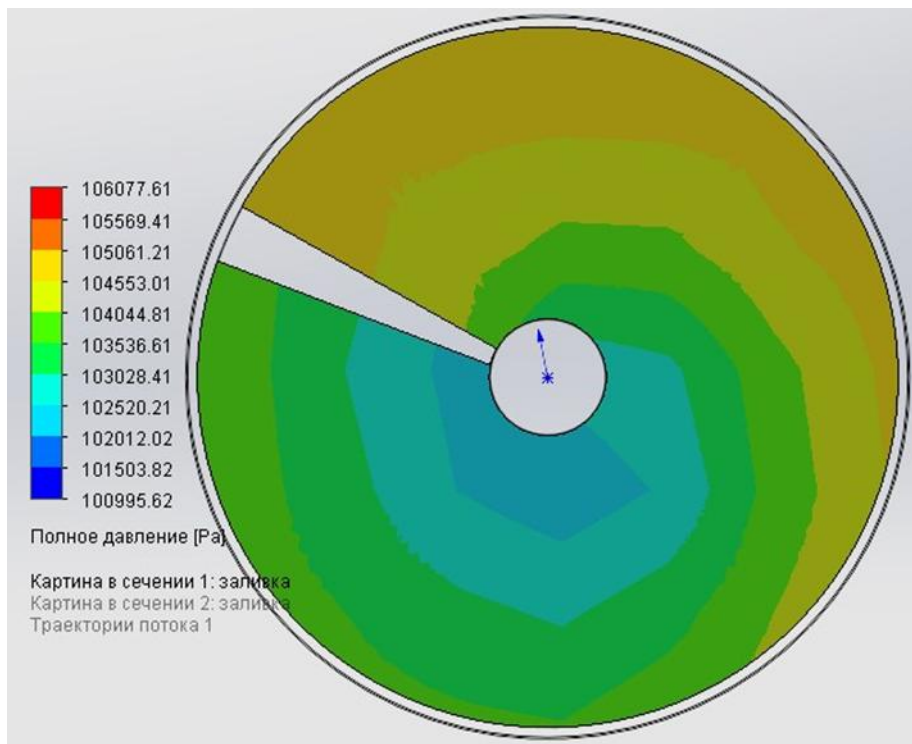
а



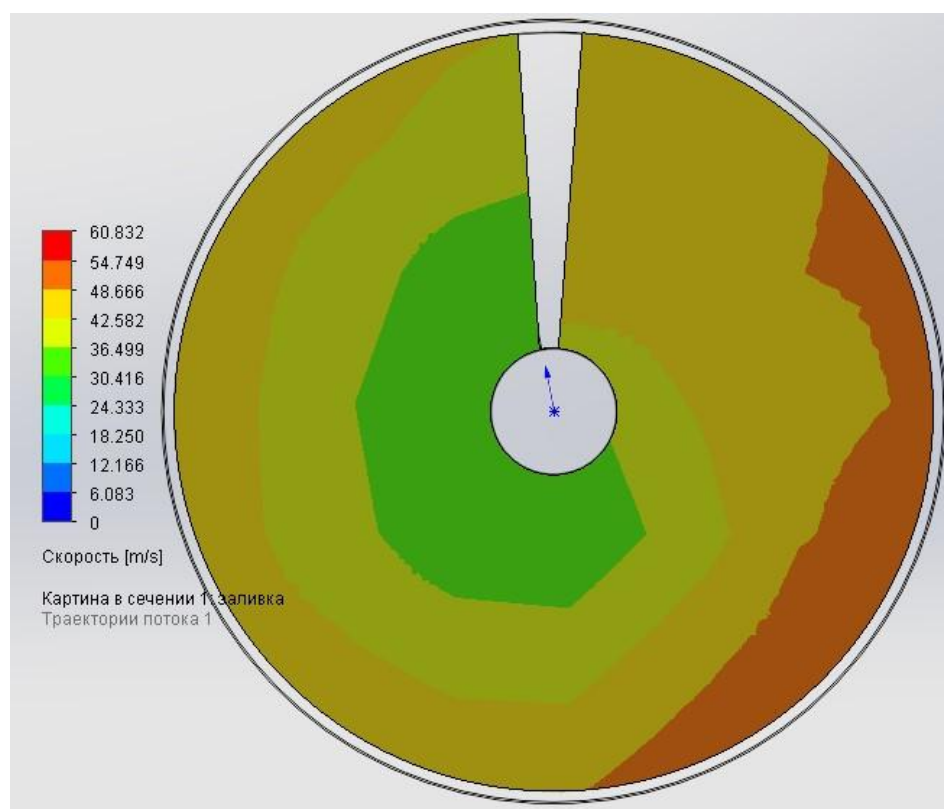
б

Рисунок 2.22 – Градиент изменения давления, Па(а), скорости воздушного потока, м/с(б).

Определены уровни давления (а) и скорости воздушного потока (б) в поперечном сечении пневмосепаратора. Графическое представление результатов вычислительного эксперимента дано на рисунке 2.23.



а



б

Рисунок 2.23 – Показатели давления, Па(а), скорости, м/с(б)

Установлено, что давление в пневмосепараторе зависит от расстояния до центральной оси устройства. Наибольшее значение давления — 106 077,61 Па — отмечается у стенок корпуса, а минимальное — 102 520,21 Па — близко к оси винтового рабочего органа (рис. 2.23а).

Графики скорости воздушного потока в рабочем органе пневмосепаратора показаны на рис. 2.23б и 2.24. Было выяснено, что у стенок корпуса скорость потока достигает максимальной отметки — 49 м/с, постепенно снижаясь до 48—42 м/с по мере приближения к оси, а непосредственно у оси снижается до 30 м/с.

На основе полученных данных построен график изменения скорости воздушного потока (рис. 2.24).

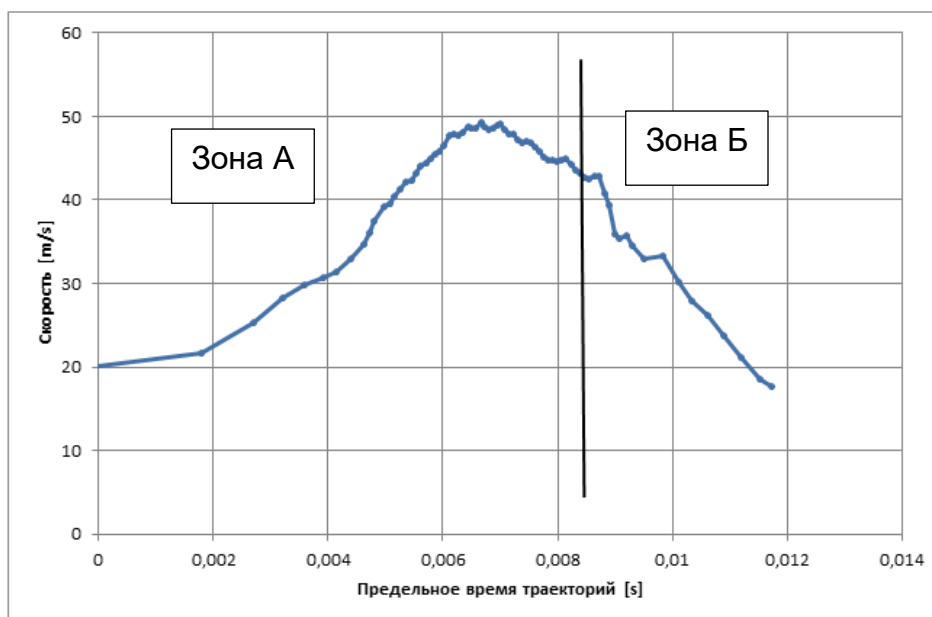


Рисунок 2.24 – График изменения скорости воздушного потока

На основе графика можно сказать, что в зоне А скорость воздушного потока при движении по винтовой траектории возрастает до 49 м/с. Скорость воздушного потока равна 49-42 м/с. При достижении зоны Б скорость падает с 42 м/с до 18 м/с. Однако, скорость возрастает до 22 м/с у выходного патрубка пневмосепаратора.

Рассмотрим траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе на рисунке 2.25.

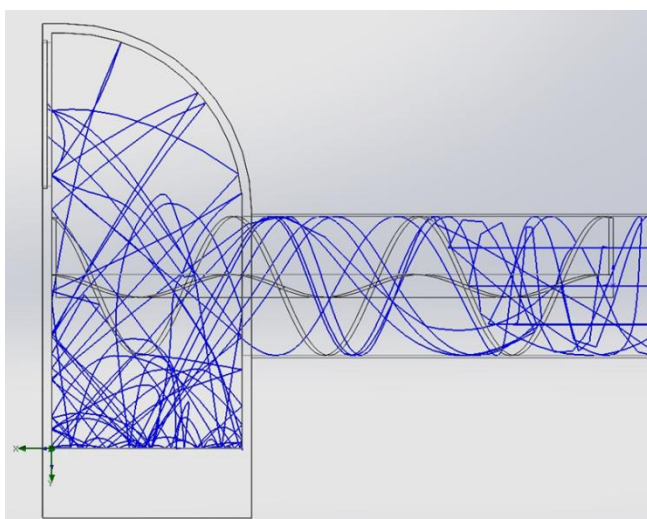


Рисунок 2.25 – Траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом с 3 витками

На основе данной модели построен график изменения скорости зерна (рис. 2.26).

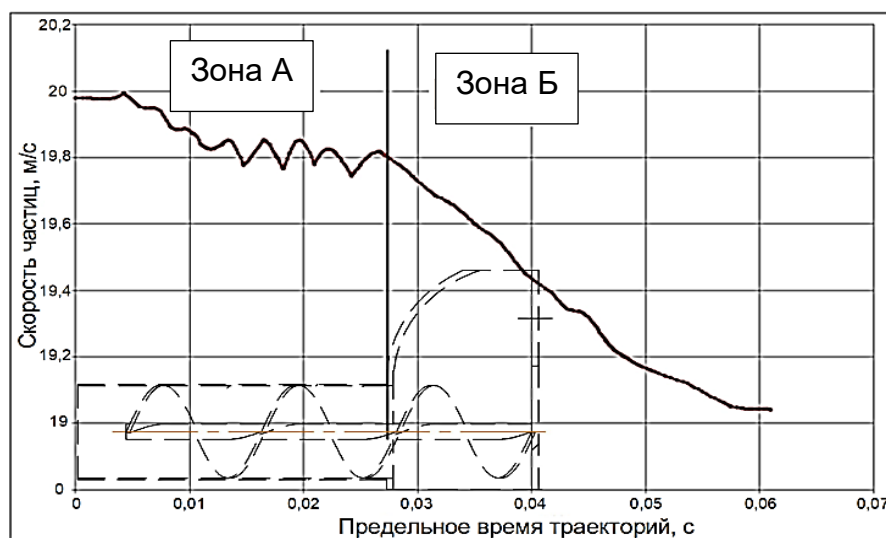


Рисунок 2.26 – График изменения скорости движения зерна

Из представленного графика отчетливо видно, что скорость частицы сильно варьирует в процессе её движения по заданной траектории. На первом зоне А скорость частицы возрастает до 20,1 м/с, затем, продвигаясь по винтовой поверхности, постепенно снижается до 19,6 м/с. При достижении зоны Б частица вновь увеличивает свою скорость до 19,8 м/с и выходит через выходной патрубок.

Для наглядного представления траектории движения был составлен график, отражающий изменение положения частицы по оси Y относительно времени (рис. 2.27). Начало отсчета по оси Y соответствует оси винтового рабочего органа, а верхний и нижний пределы на оси Y указывают на расположение стенок сепаратора.

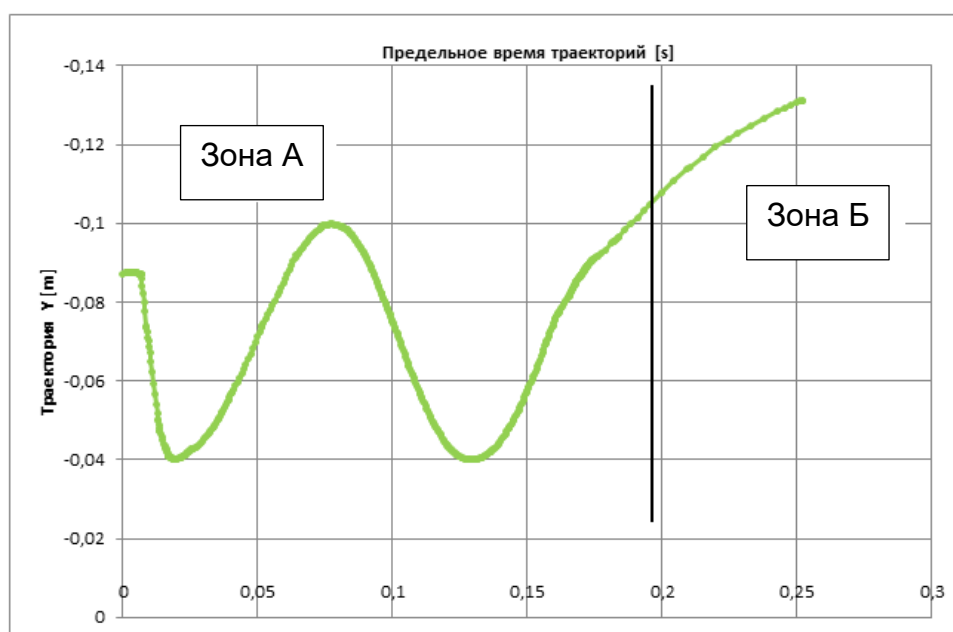


Рисунок 2.27 – График движения зерна относительно оси Y

Координаты движения частицы соответствуют движению по винтовой поверхности, а далее выводится через выходной патрубок.

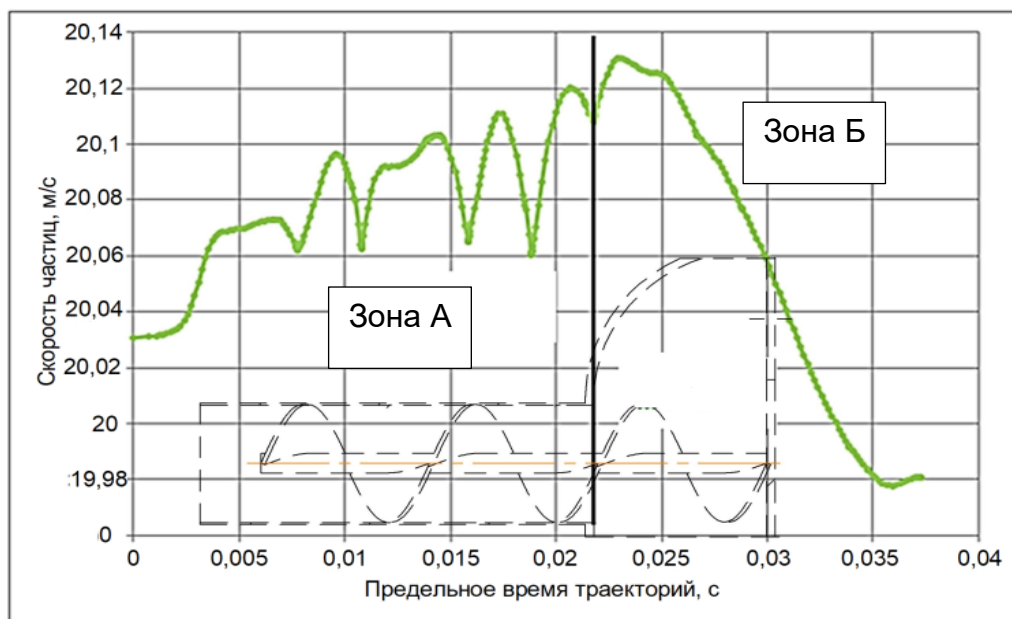


Рисунок 2.28 – График изменения скорости движения тяжелой частицы

График изменения скорости движения тяжёлой частицы (рис. 2.28) наглядно показывает, что изначально частица активно ускоряется, однако вскоре её скорость начинает уменьшаться, и в конечном итоге она утрачивает способность передвигаться по винтовому каналу под воздействием воздушного потока.

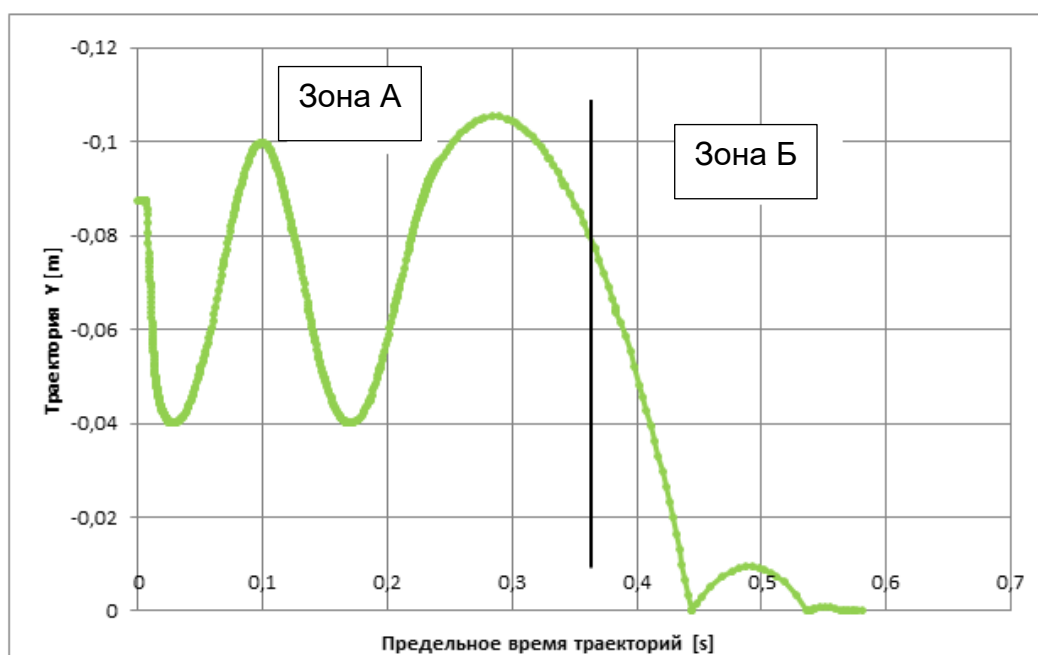


Рисунок 2.29– График движения тяжелой частицы по оси Y

На графике движения тяжёлой частицы по оси Y (рис. 2.29) отчётливо видно, что тяжёлые частицы откладываются на внешний край винтовой поверхности и продолжают движение по ней. После попадания в сепарационную камеру под действием силы тяжести они попадают внутрь.

Проведем третье исследование, применим следующие параметры: длина винтового рабочего органа 0,22 метра с учетом длины патрубка (0,062 метра); диаметр 0,07 метра; шаг винта 0,04 метра, количество витков 6. Поставлены граничные условия: на входном патрубке V_v – скорость воздуха 20 м/с; на выходном патрубке установлено $p_{атм}$ – атмосферное давление 10^5 Па. Вектор силы тяжести направлен по оси Z вниз. Размер зерна принят как идеальная сфера диаметром 10 мм, минеральная примесь диаметр 30 мм. Диаметр оси винтового рабочего органа 10 мм. При построении графиков ось X была определена программой как «Предельное время траекторий».

В результате предварительного моделирования движения воздушного потока в сепараторе с начальной скоростью 20 м/с установлено, что поток движется по винтовому аспирационному каналу, причём при переходе из патрубка в канал его скорость увеличивается из-за изменения площади поперечного сечения (рис. 2.30).

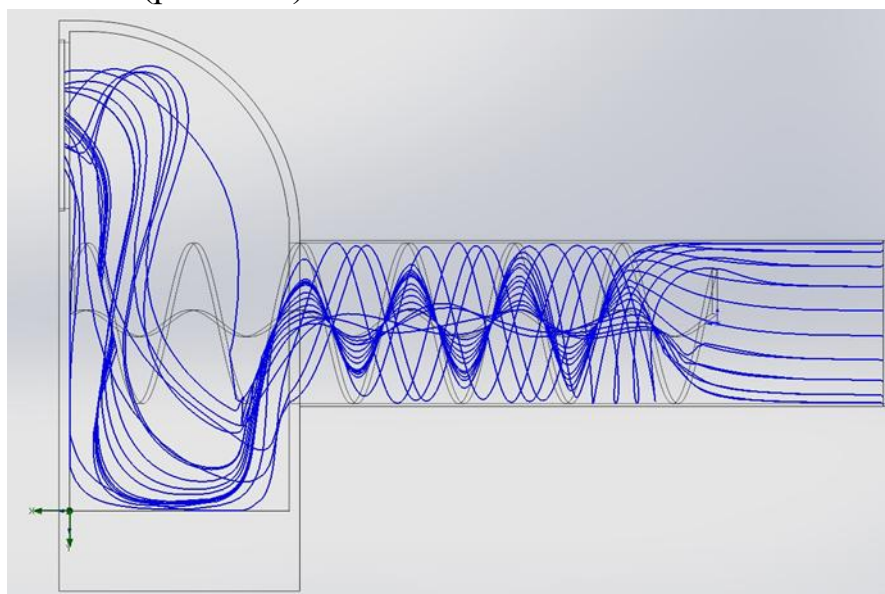
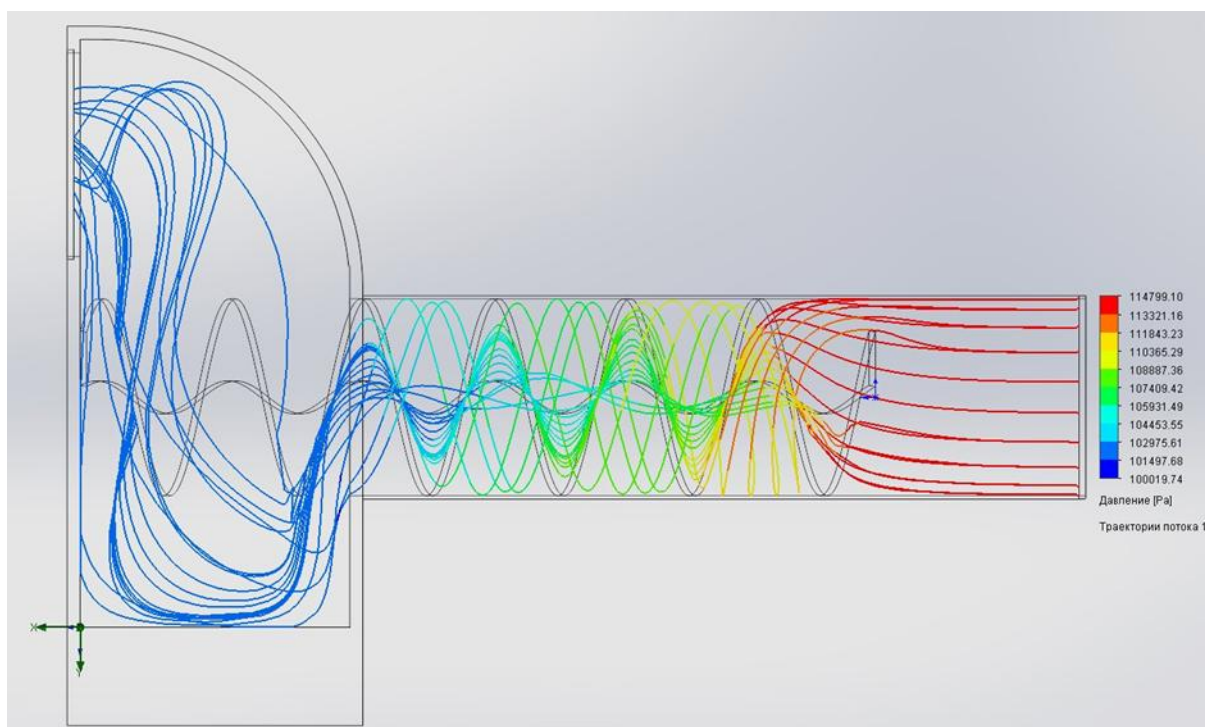


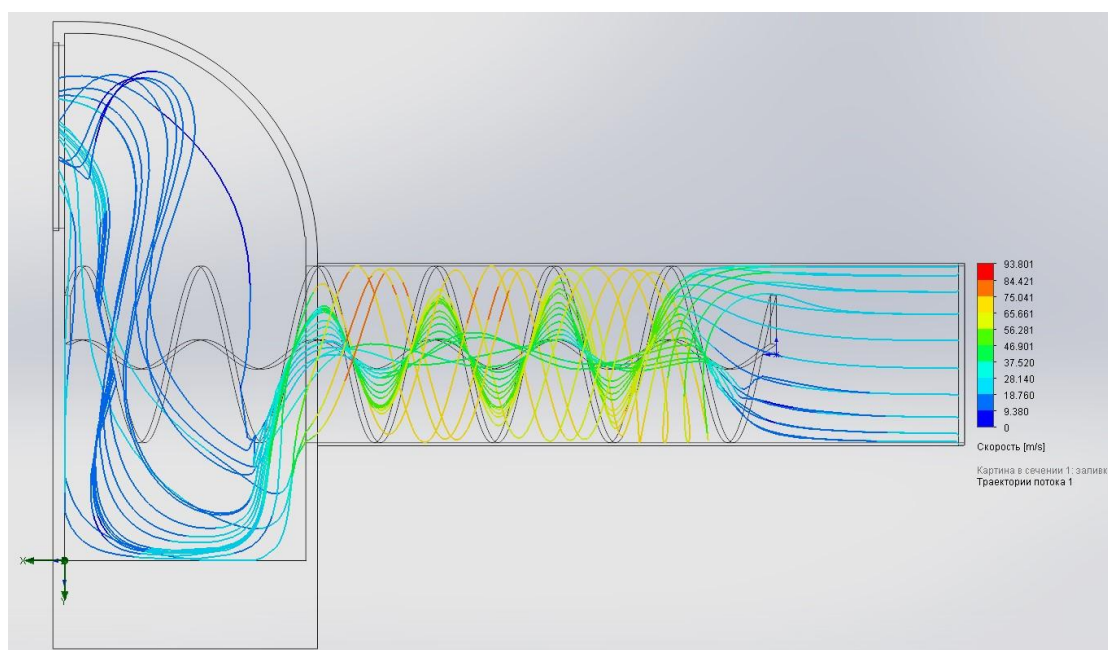
Рисунок 2.30 – Траектории движения элементарных струек потока воздуха с винтовым рабочим органом с 6 витками

В результате проведенного моделирования были выявлены градиент

изменения давления (часть а) и скорость воздушного потока (часть б).
Данные графически представлены на рисунке 2.31.



а

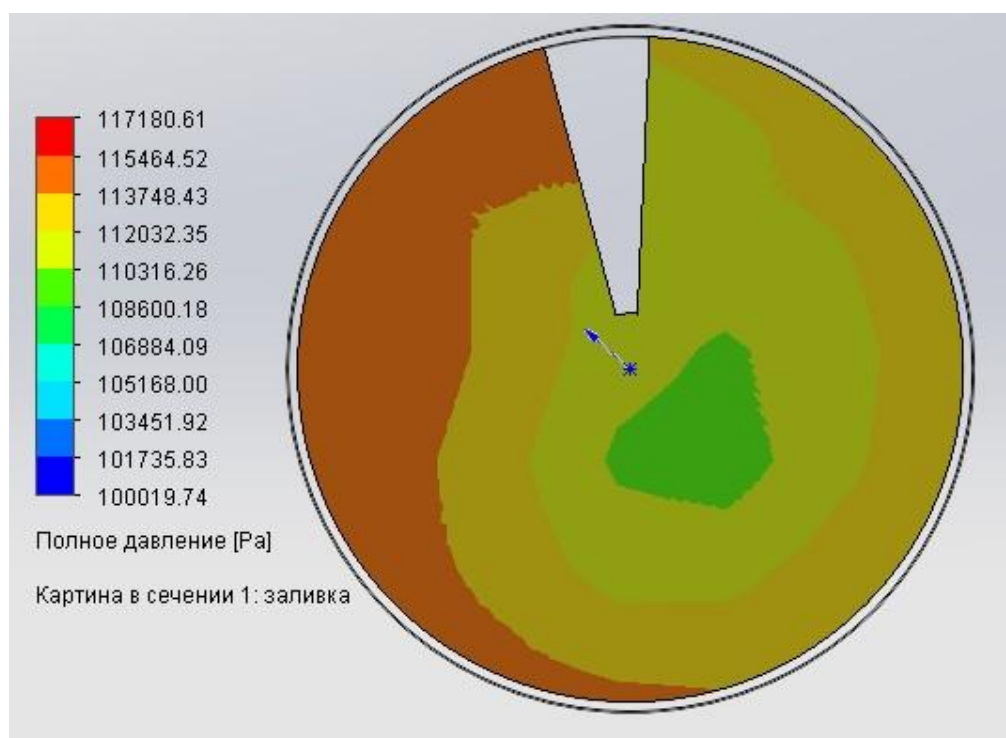


б

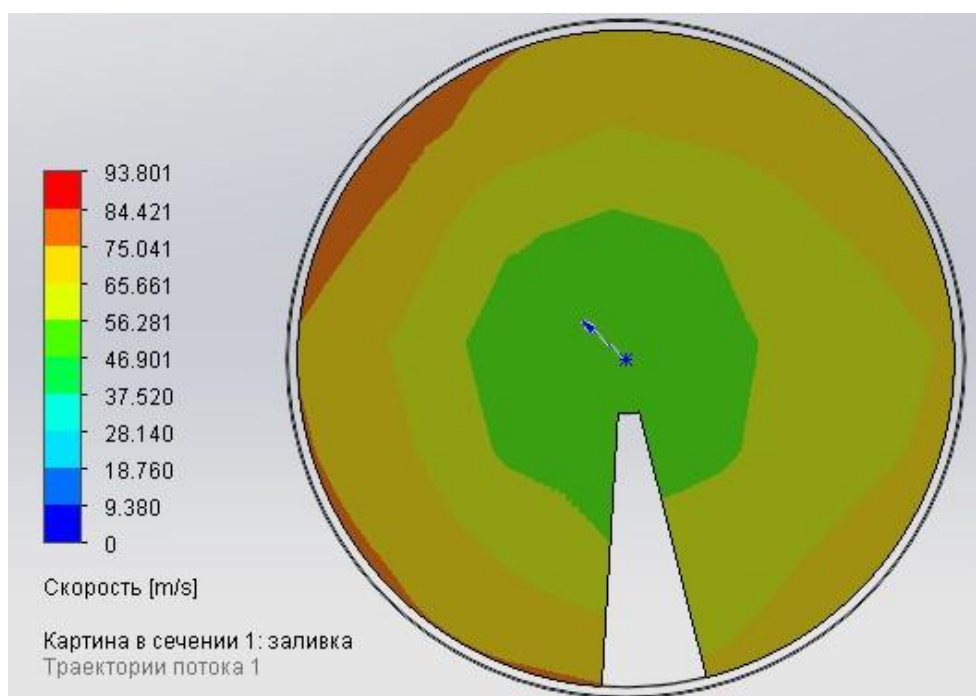
Рисунок 2.31 – Градиент изменения давления, Па(а), скорости воздушного потока, м/с(б).

В результате моделирования были получены данные о распределении

давления (а) и скорости воздушного потока (б) в поперечном сечении пневмосепаратора. Графическое представление результатов представлено на рисунке 2.32.



а



б

Рисунок 2.32 – Показатели давления, Па(а), скорости, м/с(б)

Исследования показали, что давление в пневмосепараторе зависит от

расстояния до его центральной оси. Максимальное давление, равное 117 180,61 Па, зафиксировано у наружной стенки корпуса, тогда как минимальное давление, составляющее 110 316,26 Па, приходится на ось винтового рабочего органа (рис. 2.32а).

На рис. 2.32б представлена картина распределения скорости воздушного потока в рабочем органе пневмосепаратора. Установлено, что максимальная скорость потока, достигающая 84,42 м/с, наблюдалась у стенок корпуса, а по мере приближения к оси сепаратора скорость постепенно снижается до диапазона 75,04–56,28 м/с, и непосредственно у оси падение продолжается до 46,9 м/с.

На основе полученных данных построен график изменения скорости воздушного потока (рис. 2.33).

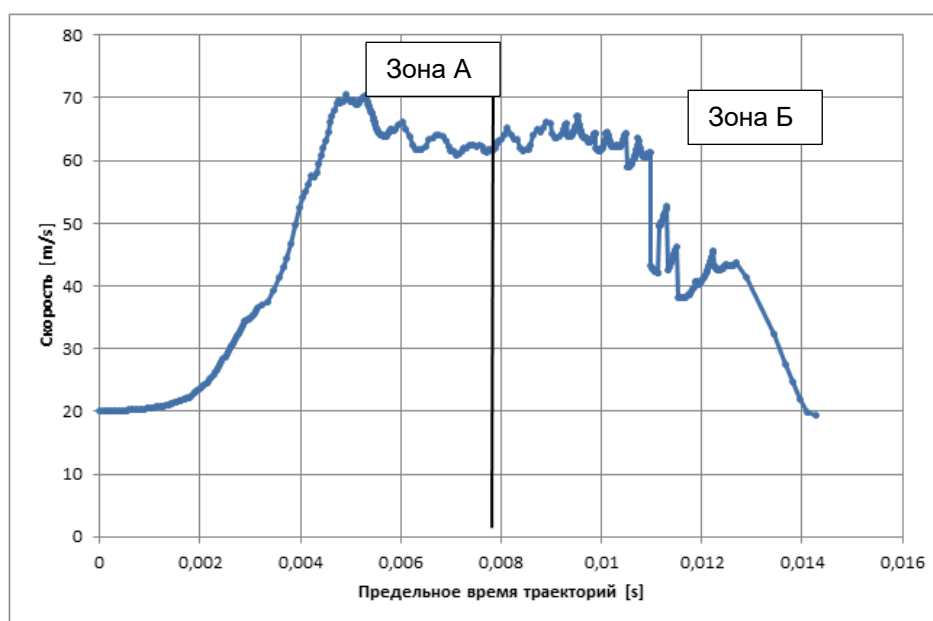


Рисунок 2.33 – График изменения скорости воздушного потока

На основе графика можно сказать, что в зоне А скорость воздушного потока при движении по винтовой траектории возрастает до 71 м/с. Скорость воздушного потока равна 70-60 м/с. При достижении зоны Б скорость падает с 60 м/с до 42 м/с. Однако, значение скорости при приближении к выходному патрубку пневмосепаратора равна 20 м/с.

Рассмотрим траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе
рисунок 2.34.

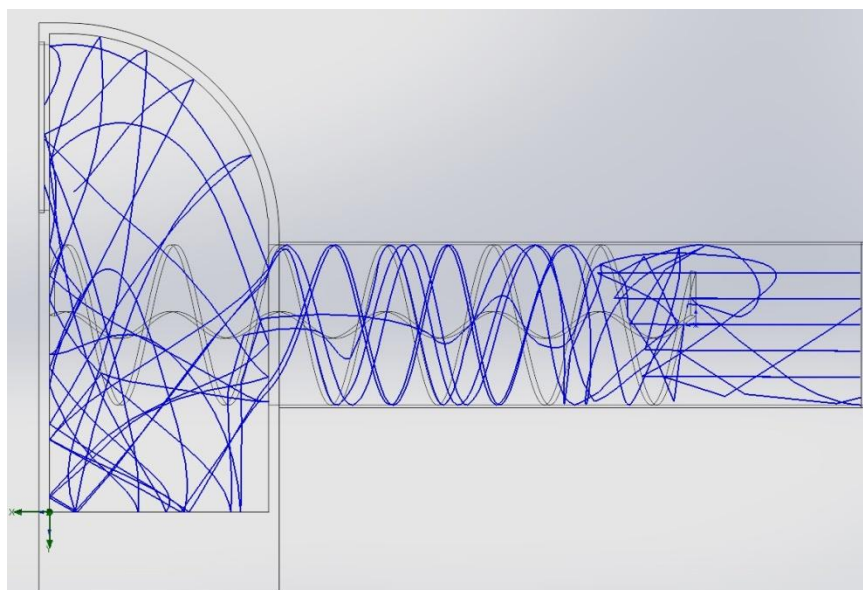


Рисунок 2.34 – Траектории движения зерновой смеси в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом с 6 витками

На основе данной модели построен график изменения скорости зерна (рис. 2.35).

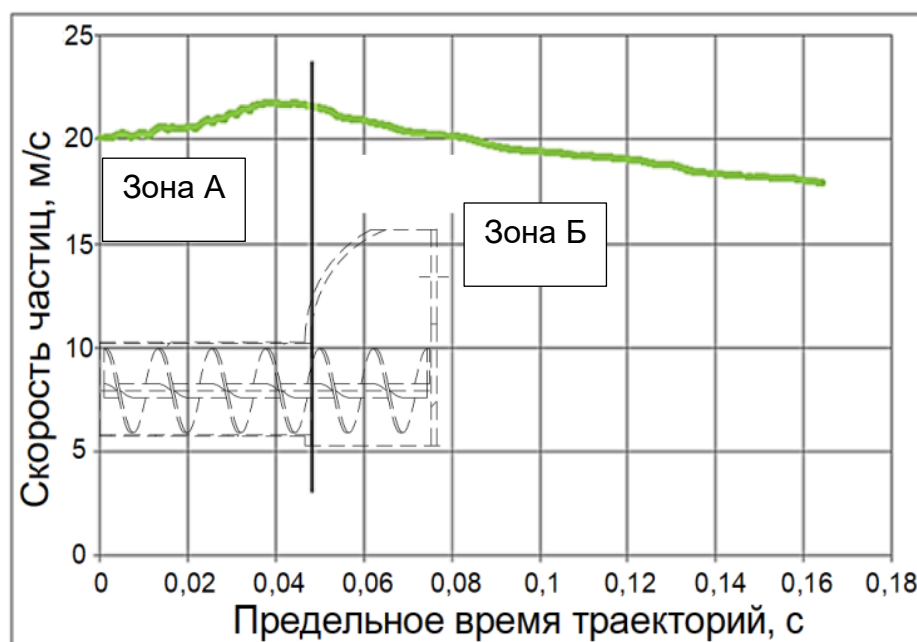


Рисунок 2.35 – График изменения скорости движения зерна

Использование режима работы сепаратора, при котором сорные частицы уносятся воздушным потоком, признано эффективным, поскольку в этом режиме удаляются только примеси с низкой скоростью витания, оставляя неповрежденное зерно в сепараторе. Установлено, что удаление

примесей происходит при скорости воздушного потока 7,5 м/с, при этом полноценное зерно сохраняется в устройстве.

Как видно из графика, скорость частицы значительно меняется в процессе её движения по траектории. В зоне А скорость увеличивается до 21 м/с, затем, при прохождении по винтовой поверхности, возрастает до 22,5 м/с. После попадания в зону Б частица ускоряется до 24 м/с и выводится через выпускной патрубок.

Для наглядности был построен график, показывающий изменение положения частицы по оси Y в зависимости от времени (рис. 2.36). Осью отсчета по оси Y стала ось винтового рабочего органа, а верхняя и нижняя границы соответствуют стенкам сепаратора. Траектория движения частицы соответствует движению по винтовой поверхности, после чего она выводится через патрубок.

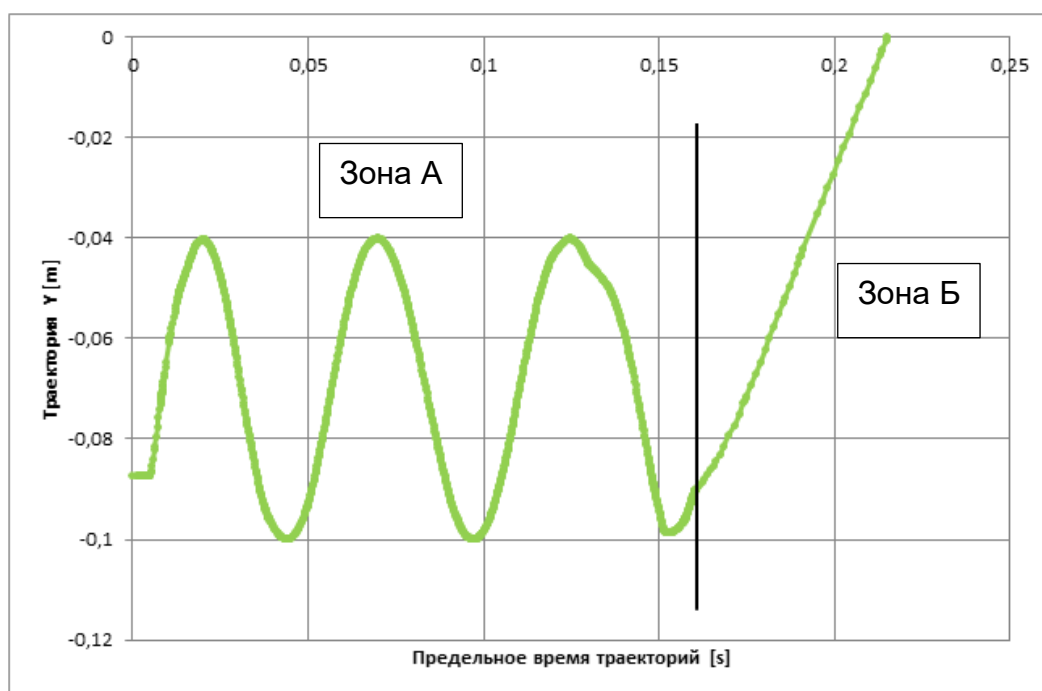


Рисунок 2.36 – График движения зерна относительно оси Y

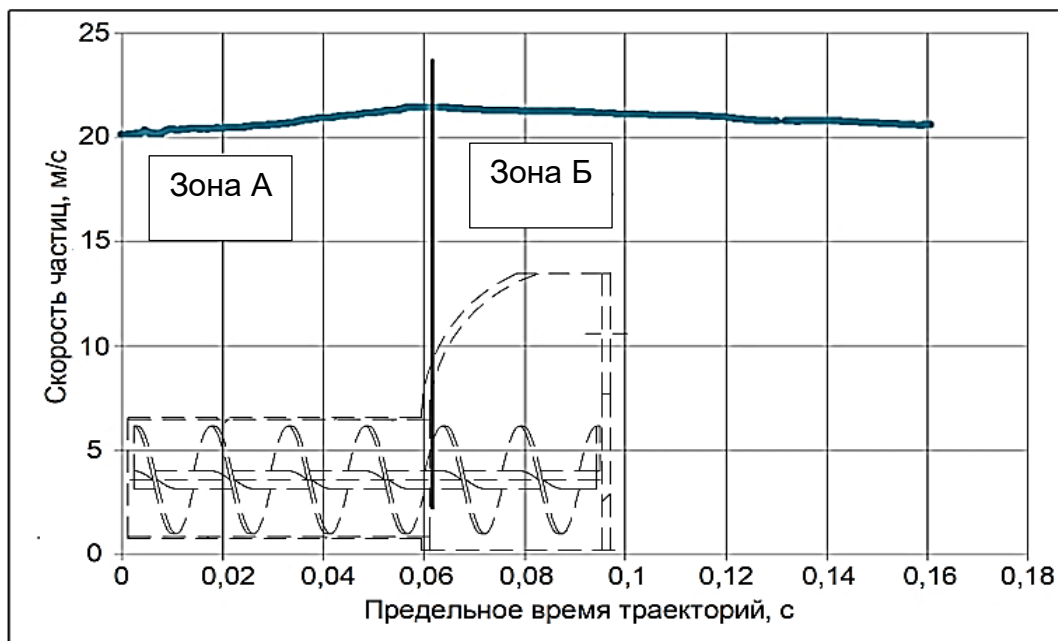


Рисунок 2.37– График изменения скорости движения тяжелой частицы

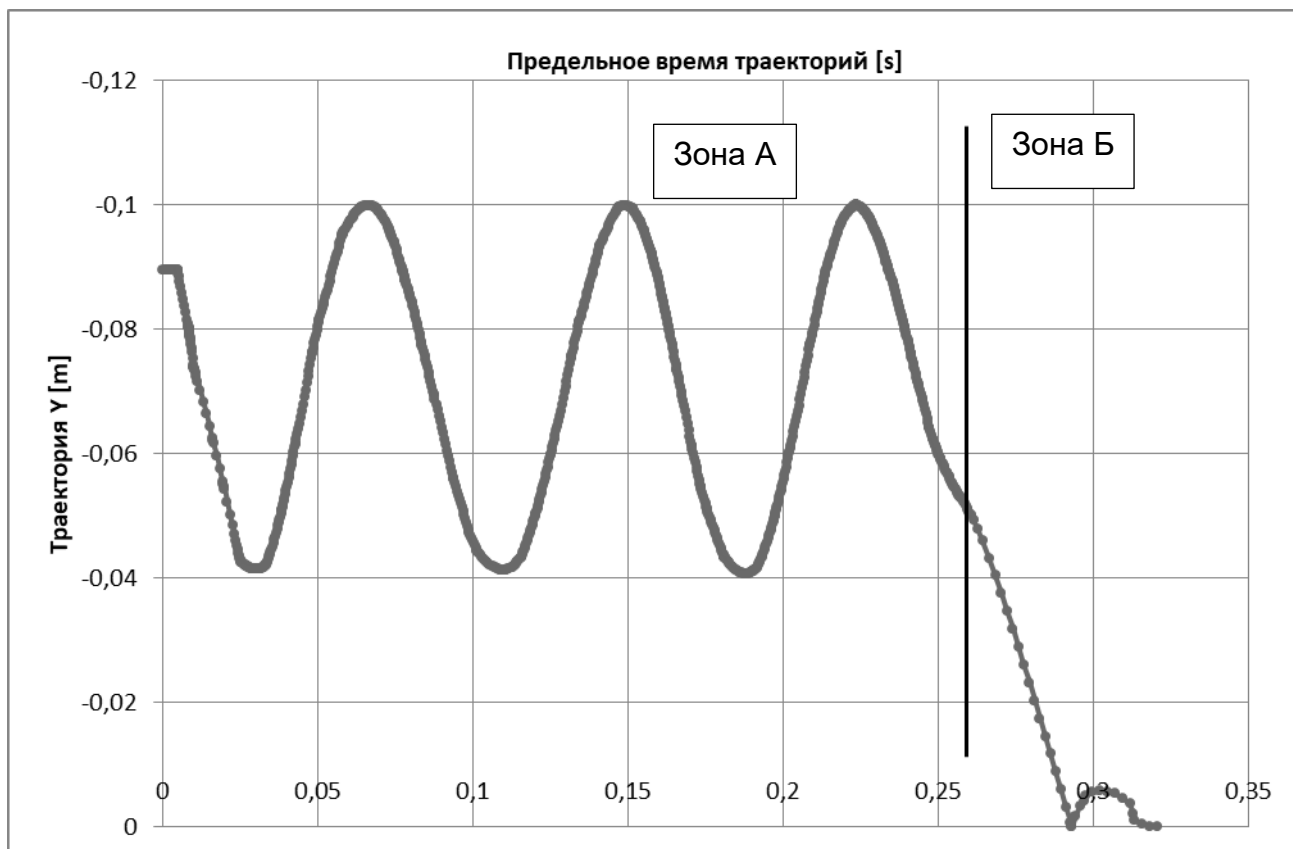


Рисунок 2.38 – График движения тяжелой частицы по оси Y

График изменения скорости тяжёлой частицы (рис. 2.37) наглядно показывает, что на начальном этапе частица активно ускоряется, однако затем её скорость постепенно снижается, и она лишается способности двигаться по винтовому каналу под действием воздушного потока. График траектории движения тяжёлой частицы по оси Y (рис. 2.38) демонстрирует,

что тяжёлые частицы перемещаются к внешнему краю винтовой поверхности и скользят по ней, а при попадании в сепарационную камеру под действием силы тяжести опускаются вниз.

2.5. Выводы по главе

1. Проанализированы работы ряда ученых, которые занимались исследованием очистки зерна от минеральных, металломагнитных и легких примесей. Определены основные параметры, влияющие на процесс очистки зерна в пневмосепараторе пневматической молотковой дробилки.

2. Разработана конструктивная схема пневмосепаратора с винтовым рабочим органом. Определены основные параметры, влияющие на процесс очистки в пневмосепараторе молотковой дробилки: диаметр винтового рабочего органа, шаг витков, высота осадительной камеры.

3. В результате теоретических исследований были получены математические зависимости, которые позволяют определить скорость и положение частицы в пневмосепараторе с винтовым рабочим органом. На основании полученных зависимостей обоснованы конструктивно-технологические параметры пневмосепаратора молотковой дробилки. Теоретически обоснована скорость воздушного потока в горизонтальном и вертикальном сепарирующем канале.

4. Теоретически обосновано движение воздушного потока в криволинейном сепарирующем канале. На основе полученных теоретических данных можно сделать вывод, что присутствует закономерность изменения скорости воздушного потока, скорости зерна, скорости минеральных примесей, а также изменения давления от количества витков винтового рабочего органа. При увеличении витков от 3 до 6, происходило повышение давления с 106077,61 Па (при 3 витках) и 117180,61 Па (при 6 витках). Скорость воздушного потока также изменилась с 49 м/с до 71 м/с при 3 и 6 витках соответственно. Скорость движения зерна повысилась с 20,1 до 23,3 м/с и минеральных примесей с 20,14 м/с до 21,6 м/с. При повышении количества витков повышается и сопротивление, однако повышается

разделение зерновой смеси на зерно и минеральные примеси за счет увеличения скорости при большем количестве витков, которое придает разгон частицам. Увеличение скорости частиц происходит из-за возникновения дополнительной центробежной силы. При этом снижение скорости минеральных примесей относительно скорости зерна связано с дополнительным сопротивлением, возникающим при движении по периферии винтовой поверхности.

3. 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 (рис. 3.1):

- разработку и изготовление экспериментальной установки для изучения траектории движения воздушного потока по винтовому рабочему органу под действием воздушного потока в пневмосепараторе молотковой дробилки;
- разработку и изготовление экспериментальной установки для изучения траектории движения материальных частиц по винтовому рабочему органу под действием воздушного потока в сепараторе дробилки;
- обоснование длины пневмопровода на входном патрубке дробилки в зависимости от количества витков винтового рабочего органа;
- выявление закономерностей изменения скорости воздушного потока на выходном патрубке дробилки в зависимости от количества витков винтового рабочего органа сепаратора;
- установление показателя эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в зависимости от количества витков винтового рабочего органа сепаратора дробилки;
- определение технико-энергетических показателей дробилки с сепаратором;
- выбор плана проведения многофакторного эксперимента, установление уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров процесса;
- определение рациональных конструктивно-режимных параметров сепаратора;
- проведение производственных испытаний экспериментального образца сепаратора дробилки.

Программа экспериментальных исследований

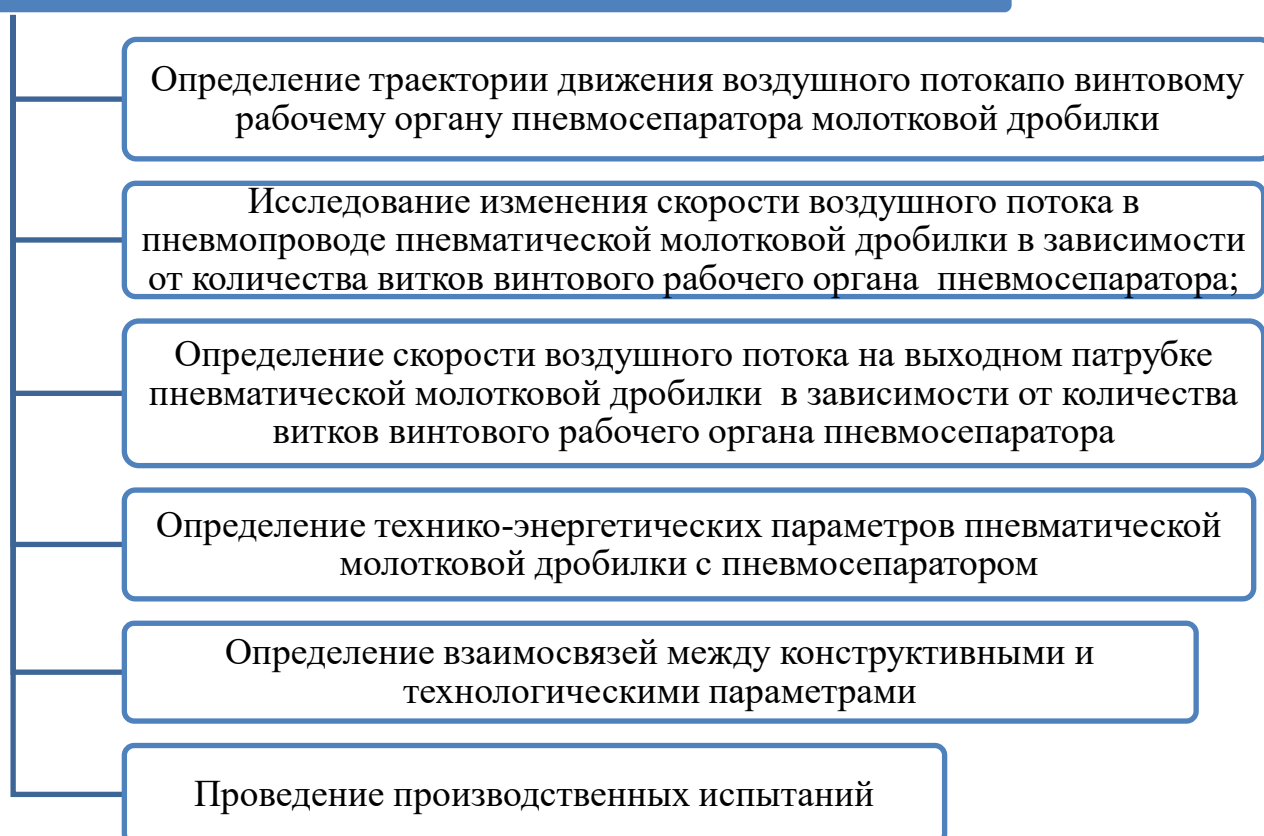


Рисунок 3.1 – Программа экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований работы пневмосепаратора с винтовым рабочим элементом, который встроен в молотковую дробилку, для очистки зерна от минеральных и металломагнитных включений применялись методы наблюдения и эксперимента.

3.1. Изучение траектории движения воздушного потока в пневмосепараторе молотковой дробилки

Для подтверждения результатов, полученных при помощи компьютерного моделирования движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу в пневмосепараторе молотковой дробилки разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 3.2).

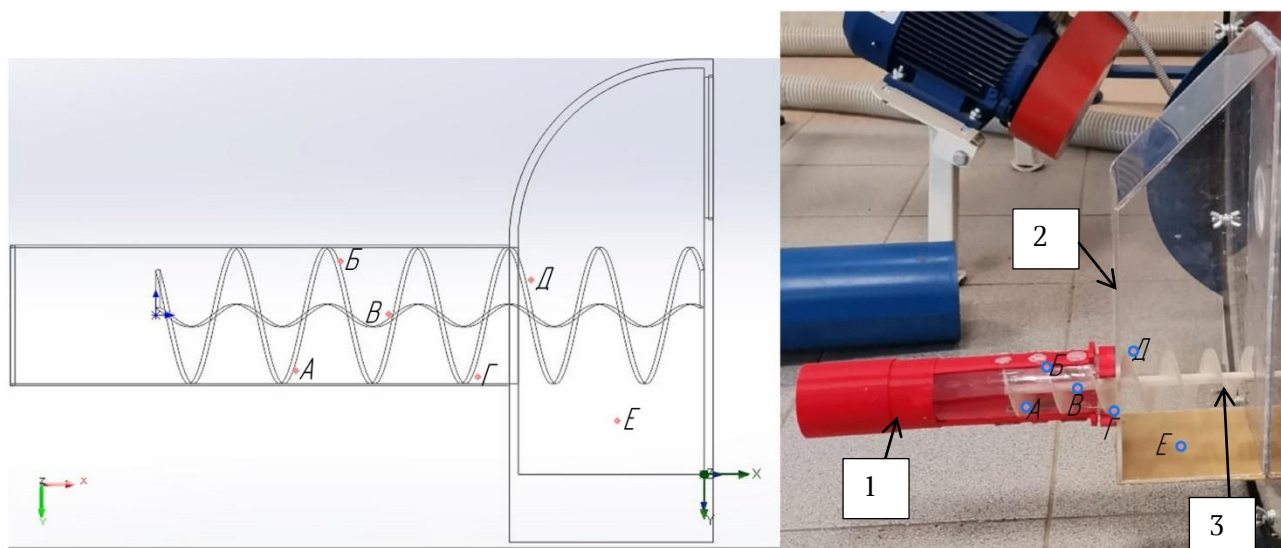


Рисунок 3.2 – Лабораторная установка «пневмосепаратор молотковой дробилки»:

1 – входной патрубок; 2 – пневмосепаратор; 3 – винтовой рабочий орган

Корпус пневмосепаратора молотковой дробилки изготовлен из светопропускающего материала ПЭТ (полиэтилентерефталат) для возможности фотофиксации экспериментальных траекторий движения воздушного потока. Фотосъемка осуществлялась в направлении параллельной боковой плоскости пневмосепаратора и велась фотокамерой Sony IMX683 64Мп. Полученные в ходе эксперимента фотоданные и данные, полученные в ходе теоретического исследования, накладывались на заранее откалиброванную координатную сетку (рис. 3.3) и путем сопоставления определялись координаты исследуемой точки. Координаты точек занесены в таблицу 3.1. Для визуализации траектории воздушного потока использовалась мелкодисперсная фракция размером 45мкм, насыпной плотностью 600 кг/м³. Полученные экспериментальные траектории были обработаны методом масштабирования фотографий в системе координат, где ось X соответствовала длине винтового рабочего органа, а ось Y — его диаметру. При построении графиков траекторий движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовой поверхности ось X принята как

длина винтового рабочего 240 мм и ось Y как диаметр винтового рабочего органа 70 мм.

Таблица 3.1 – Координаты движения точки.

	X _т	Y _т	X _ф	Y _ф	$\Delta X = X_{т} - X_{ф}$	$\Delta, \%$
А						
Б						
В						
Г						
Д						
Е						

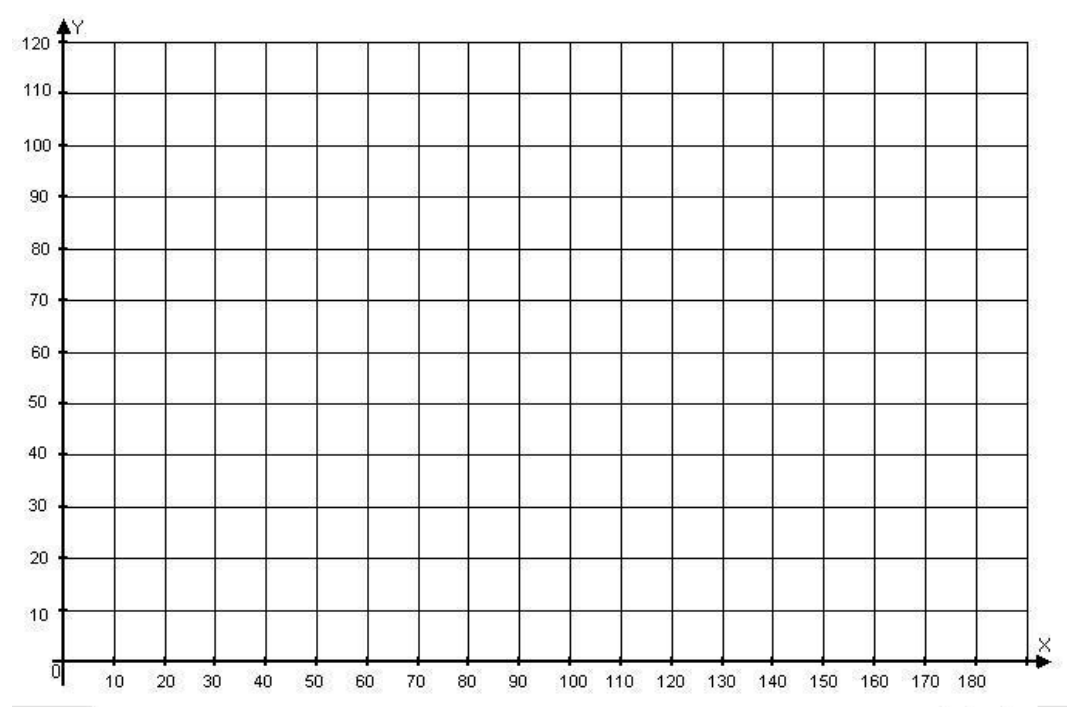


Рисунок 3.3 – Координатная сетка

Винтовые рабочие органы спроектированы и изготовлены из пластика PLA путем 3D-печати длиной 240 мм, диаметром 70 мм соответствующей диаметру входного патрубка и количеством витков 3, 4 и 6 (рис. 3.4).

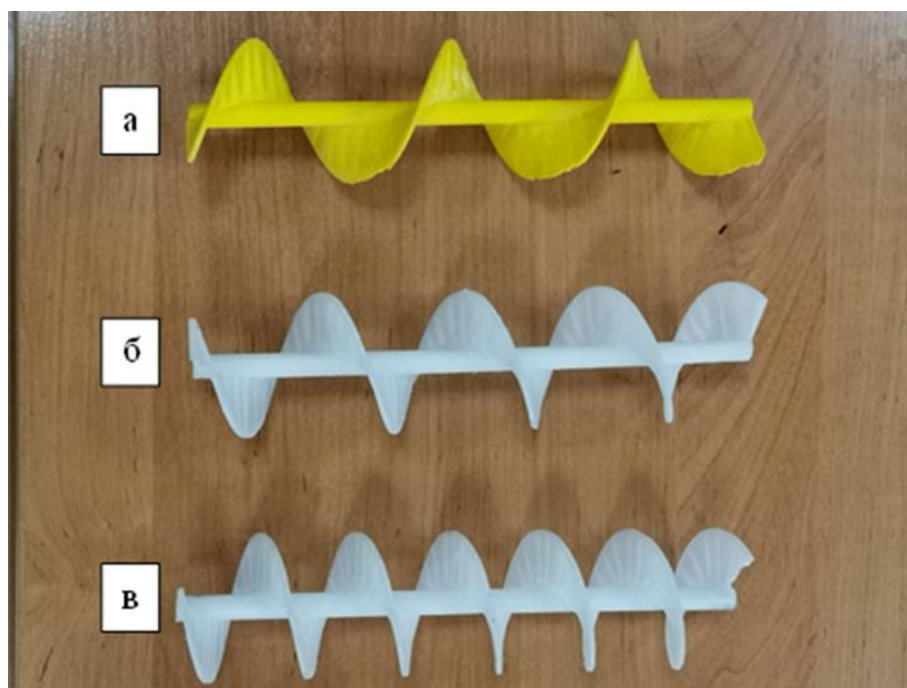


Рисунок 3.4 - Винтовые рабочие органы:

а – 3 витка; б – 4 витка; в – 6 витков.

В ходе эксперимента, проанализировав теоретические и экспериментальные данные, мы отметили несколько точек, что позволило построить траекторию движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу в пневмосепараторе молотковой дробилки. Для оценки точности полученных результатов мы использовали коэффициент относительной погрешности Δ .

3.2. Обоснование длины пневмопровода на входном патрубке пневматической молотковой дробилки

При обосновании длины пневмопровода на входном патрубке пневматической молотковой дробилке в зависимости от количества витков винтового рабочего органа, установленного в пневмосепараторе, учитывается изменение скорости воздушного потока по всей его длине для захвата зерен ячменя, скорость витания которых должна составить не менее чем 10,8 м/с [90].

При установке пневмосепаратора с винтовым рабочим органом возникает дополнительное сопротивление, что влияет на значение скорости воздушного потока в пневмопроводе пневматической молотковой дробилки.

Необходимо исследовать влияние количества витков винтового рабочего органа на скорость потока по длине пневмопровода. Измерение скорости потока проводилось с использованием электронного устройства анемометра Testo 405i и приложения «testoSmartProbes» (рис. 3.5). Технические характеристики анемометра приведены в таблице 3.2.



Рисунок 3.5 - Анемометр Testo 405i

Таблица 3.2 - Технические характеристики анемометра Testo 405i.

Параметр	Значение
Тип зонда	телескопический датчик
Диапазон измерения температуры воздуха	-20 ... +60 °C
Диапазон измерения скорости воздуха	0 ... 30 м/с
Точность измерения	± 0.5 °C / $\pm(0.1$ м/с + 5 % от изм. знач.), (0...2 м/с) $\pm(0.3$ м/с + 5 % от изм. знач.) (2...15 м/с)
Рабочая температура	-20 ... +50 °C

Исследование проводилось на пневмопроводе пневматической молотковой дробилки ДПМ-11 на длине 4 м. Каждые 0,5 м сделаны отверстия для измерения скорости (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Пневмопровод пневматической молотковой дробилки ДПМ-11

Установка анемометра для измерения скорости воздушного потока осуществлялась перпендикулярно пневмопроводу (рис. 3.7). Чувствительный элемент направлен в одну сторону с движением воздушного потока. Были измерены 3 значения в одной точке и выбрано среднее. Результаты измерений занесены в таблицу 3.3.



Рисунок 3.7 – Установка анемометра

Таблица 3.3 - Результаты измерений скорости воздушного потока по длине пневмопровода.

	1 м	1,5 м	2 м	2,5 м	3 м	3,5 м	4 м
Базовый							
3 витка							
4 витка							
6 витков							

3.3. Определение скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки

Для поддержания скорости транспортировки измельчённого продукта с использованием усовершенствованного пневмосепаратора с винтовым рабочим органом были проведены измерения скорости воздушного потока с помощью анемометра (рис. 3.5). После на электронном устройстве с помощью специализированного приложения «testoSmartProbes» фиксировались значения.

Измерение скорости воздушного потока на выходном патрубке проводились в 10 точках при установке базового пневмосепаратора и с 3 видами винтовых рабочих органов с разным количеством витков. Результаты измерений занесены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерений скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки.

	Скорость воздушного потока на выходном патрубке, V м/с										V _{ср} м/с
Базовый											
3 витка											
4 витка											
6 витков											

Полученные экспериментальные данные скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки позволили

сравнить изменение скорости от установки винтового рабочего органа с различным количеством витков.

3.4. Определение мощности пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором

Измерение изменения мощности пневматической молотковой дробилки проводились с помощью электросчетчика Инкотекс Меркурий 230 ART-01 CN (рис. 3.8).

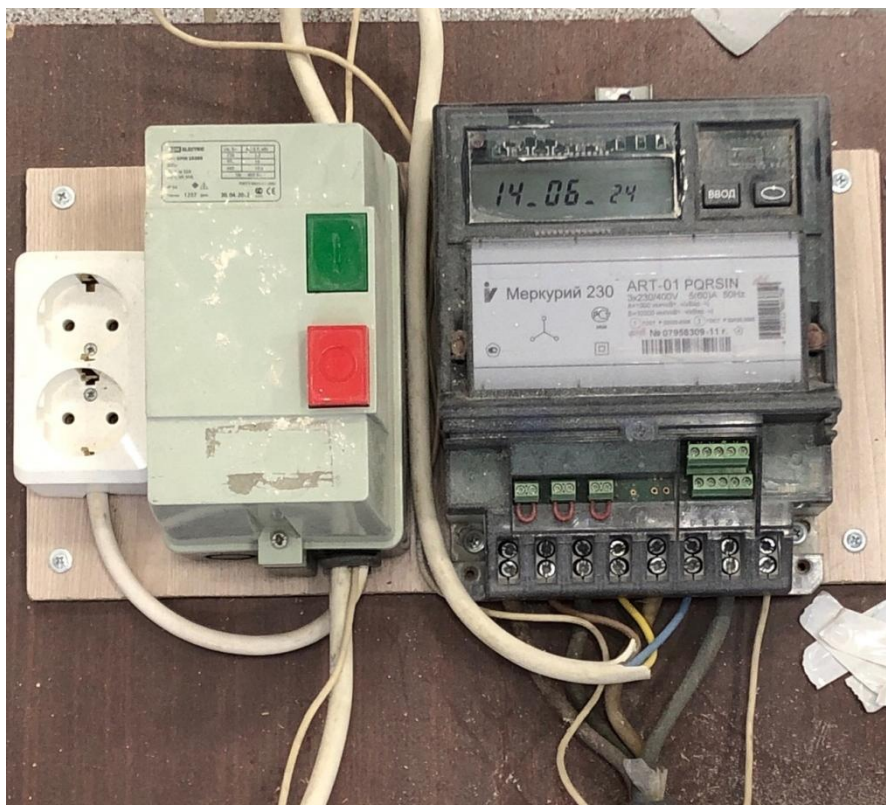


Рисунок 3.8 – Электросчетчик Инкотекс Меркурий 230 ART-01 CN [99]
Технические характеристики электросчетчика представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Технические характеристики электросчетчика Инкотекс Меркурий 230 ART-01 CN.

Количество тарифов	4
Класс точности	½
Тип сети	трехфазная
Тип индикации	цифровой
Количество фаз	трехфазный

Максимальная частота	50 Гц
Номинальный ток	5 А

При каждом коротком нажатии кнопки «ВВОД» на ЖКИ отображается накопленная энергия отдельно по каждому тарифу и по сумме тарифов.

При каждом длительном (более 3 с) нажатии кнопки «ВВОД» происходит переход к следующей группе основных параметров. Группы основных параметров отображаются в следующей последовательности:

- энергия за текущие сутки (подчеркнут символ «D» на лицевой панели);
- энергия за предыдущие сутки (подчеркнуты символы «D» и «P»);
- энергия за текущий месяц (подчеркнут символ «M»);
- энергия за предыдущий месяц (подчеркнуты символы «M» и «P»);
- энергия за каждый из предыдущих 11 месяцев (подчеркнуты символы «M» и «P»);
- энергия за текущий год (подчеркнут символ «Y»);
- энергия за предыдущий год (подчеркнуты символы «Y» и «P») [80].

В пределах группы при каждом коротком нажатии кнопки «ВВОД» происходит переход к следующему параметру.

При отсутствии нажатия кнопок в ручном режиме индикации через 30 с автоматически происходит возврат в режим циклической индикации.

Индикация основных параметров (учтенной активной и реактивной энергии отдельно по каждому тарифу и по сумме тарифов) производится с указанием номера тарифа, с дискретностью 0,01 кВт·ч или квар·ч (два знака после запятой). Рядом с этим значением указываются:

- размерность, в которой выражена отображаемая величина;
- слева индицируется номер тарифа;
- внизу отображается индикатор фаз: фаза1, фаза2, фаза3;
- вид и направление энергии индицируется курсорами сверху.

При индикации суммы по всем тарифам отображается надпись «Сумма» [80].

Счетчик, запрограммированный в одготарифный режим, обеспечивает вывод на ЖКИ значения потребляемой электроэнергии только по одному тарифу.

Для оценки сопротивления, оказываемого на пневматическую молотковую дробилку с установленным пневмосепаратором, который оснащён различными рабочими органами, был проведён поисковый эксперимент. Этот эксперимент позволил выявить изменения в мощности работы дробилки с модернизированным пневмосепаратором. Все показания занесены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Показания мощности пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором без зерна.

Пневмосепаратор:	Мощность, N кВт
Базовый	
с 3 витками	
с 4 витками	
с 6 витками	

3.5. Исследование технико-энергетических параметров пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором

Для исследования технолого-мощностных параметров пневматической молотковой дробилки с установкой модернизированного пневмосепаратора в качестве продукта было взято зерно ячменя в массовом размере 1кг. Подачу продукта определили через время опустошения приемного бункера с разной площадью открытия шиберной заслонки (рис. 3.9, 3.10). Подготовку смеси зерна с металломагнитными примесями для исследования эффективности очистки зерна в пневмосепараторе, в которую входит зерна ячменя и примеси

в соотношении 1:0,0045. В качестве продукта взято зерно ячменя, параметры которого согласно ГОСТ Р 53900-2010 [34]:

Влажность, % — не более 14,5.

Массовая доля белка, в пересчёте на сухое вещество, % — не более 12,0.

Сорная примесь, %, не более 1,0.

Зерновая примесь, %, не более 2,0.

Мелкие зёрна, %, не более 5,0.

Крупность, %, не менее 85,0.

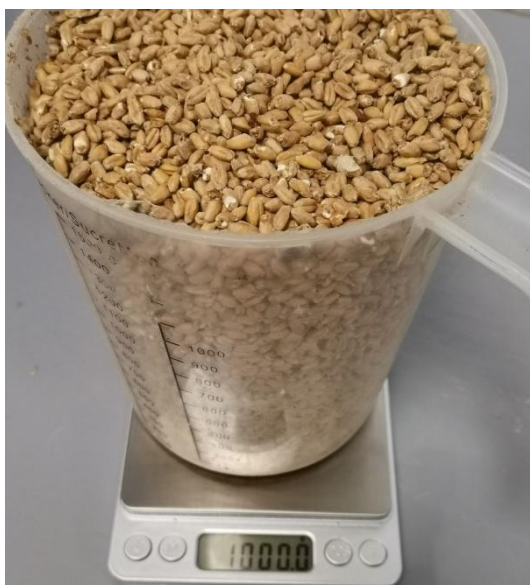


Рисунок 3.9 – Массовая проба зерна ячменя



а



б



в

Рисунок 3.10 – Площадь подачи шиберной заслонки:

а -100%, б – 65%, в – 30%.

Результаты рассчитанной подачи в приемном бункере пневмосепаратора представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Рассчитанные значения удельной подачи.

№ опыта	Открытие заслонки L , %	Площадь загрузочного отверстия S , см^2	Среднее значение массы зерна, проходящей через загрузочное отверстие в ед. времени m , кг	Время прохождения зерна через загрузочное отверстие t , с	Среднее значение подачи зерна в рабочую камеру дробилки P , кг/ч
1	30	5,88	1	3,5	1008
2	65	12,76	1	1,8	1908
3	100	19,63	1	1,2	2808

На существующей пневматической молотковой дробилке ДПМ-11 с пневматической загрузкой собрана экспериментальная установка (рис. 3.11), состоящая из приемного бункера 1, шиберной заслонки 2, входного патрубка 3, пневмосепаратора 4, осадительной камеры 5 и шиберной заслонки 6.

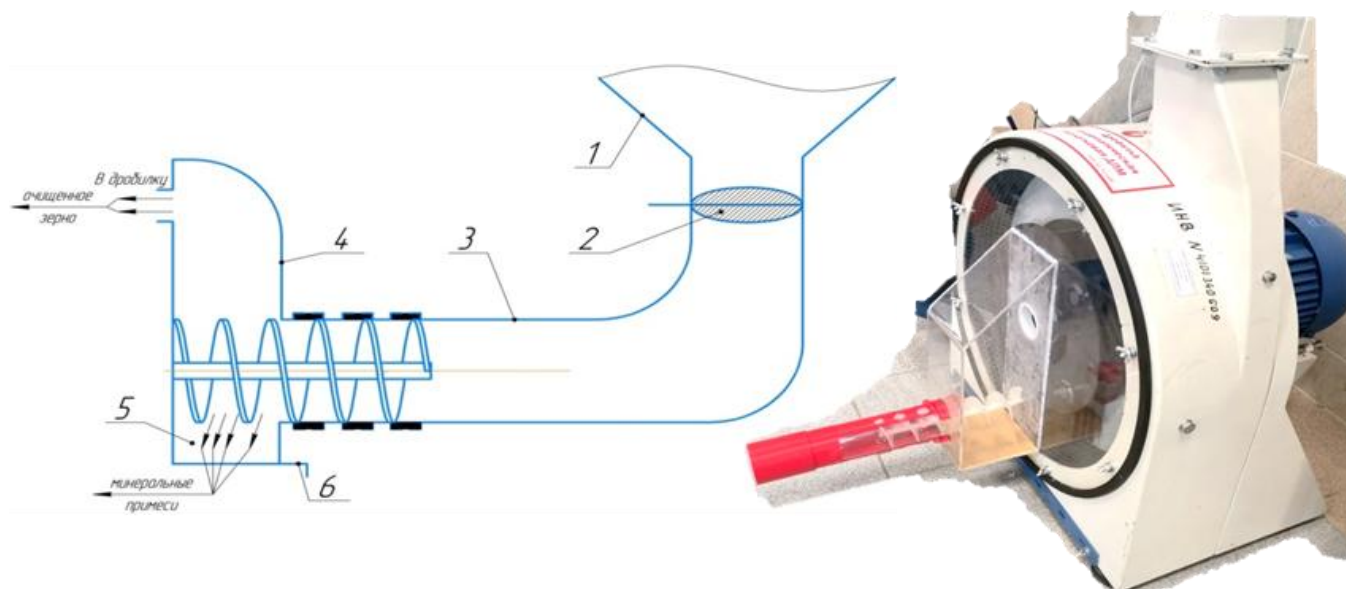


Рисунок 3.11 - Схема экспериментальной установки:

1 – приемный бункер; 2 – дисковый затвор; 3 – входной патрубок; 4 – пневмосепаратор; 5 – осадительная камера; 6 – шиберная заслонка.

Работа экспериментальной установки осуществляется следующим образом. При включении электродвигателя молотковой дробилки под

действием вентилятора и ротора создается разрежение, благодаря которому продукт, предназначенный для дробления, из приемного бункера с воздушным потоком поступает в пневмосепаратор через входной патрубок диаметром 60 мм и длиной 300 мм. В пневмосепараторе возможна установка по переменно статичного винтового рабочего органа диаметром 60 мм и длиной 240 мм с градацией количества витков 3,4,6. За счет установки винтового рабочего органа внутри входного патрубка воздушный поток поворачивает слой зерна таким образом, что зерно проходит по внутренней части цилиндрического магнита, в результате чего происходит очистка от металломагнитных примесей. Двигаясь по винтовому рабочему органу, воздушно-зерновой поток изменяет траекторию движения тяжелых примесей. В результате тяжелые примеси под действием центробежной силы движутся по периферии входного патрубка и направляются, вниз попадая в осадительную камеру, где под действием силы тяжести осаждаются. Очищенное зерно попадает в камеру дробления через входное отверстие в крышке корпуса. Очистка сепаратора происходит следующим образом. После отключения электродвигателя молотковой дробилки открывают задвижку и очищают камеру от тяжелых примесей. Цилиндрический магнит от металлических примесей очищают, вручную отсоединив от входного патрубка.

Производительность встроенного пневмосепаратора молотковой дробилки с винтовым рабочим органом Q определяется полным опустошением рабочей камеры и рассчитана по формуле (3.1):

$$Q_{\text{сеп}} = 3600M/t, \quad (3.1)$$

где M – масса зерна, кг;

t – время полного опустошения материала в сепараторе, с.

Удельный расход энергии пневматической молотковой дробилки со встроенным сепаратором с винтовым рабочим органом замерялись посредством электросчетчика Инкотекс Меркурий 230 ART-01 CN (рис. 3.8).

Результаты экспериментальных исследований технико-энергетических параметров встроенного пневмосепаратора молотковой дробилки сравнивались со значениями существующего пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ – 11 и занесены в таблицу 3.8.

Таблица 3.8 - Экспериментальные технологические показатели пневматической молотковой дробилки.

	Производительность $Q_{сеп}$, кг/с			Удельный расход энергии дробилки, $N_{уд.дроб}$, кВт*с/кг		
Базовый						
3 витка						
4 витка						
6 витков						

3.6. Исследование эффективности очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилки от металломагнитных примесей

Методика экспериментальных исследований эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей во встроенном пневмосепараторе молотковой дробилки перед измельчением в зависимости от количества витков винтового рабочего органа и подачи продукта включающая в себя:

1) Разработку и сборку лабораторной установки (рис. 3.12), состоящей из приемного бункера 1 с шиберной заслонкой, пневмосепаратора 2 с установленными по внутреннему диаметру магнитами, вентилятора с циклоном 3 и ЛАТРа 4. Пневмосепаратор 2 состоит из трубопровода диаметром 60 мм и длиной 300 мм, сменного статичного винтового рабочего органа диаметром 60 мм и длиной 240 мм с количеством витков 3,4,6. Работа лабораторной установки осуществляется следующим образом: в приемный бункер засыпается зерно с металломагнитными примесями и при включении вентилятора, в пневматическом канале с пневмосепаратором создается

разряжение, воздушный поток с зерном и металломагнитными примесями движется по винтовому рабочему органу и расслаиваются под действием центробежной силы. Очистка зерна от металломагнитных примесей осуществляется в непосредственном контакте продукта с магнитами, где примеси и остаются. Очистка пневмосепаратора от примесей осуществляется вручную и производится расчет эффективности отделения металломагнитных примесей от зерна.

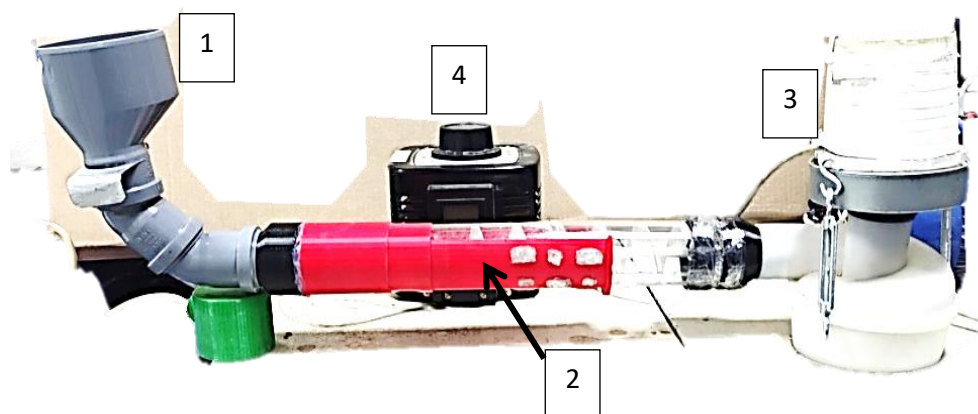


Рисунок 3.12 - Лабораторно-экспериментальная установка:

1 – приемный бункер; 2 – пневмосепаратор; 3 – вентилятор с циклоном; 4 –
ЛАТР

2) Подготовку смеси зерна с металломагнитными примесями для исследования эффективности очистки зерна в пневмосепараторе, в которую входит зерна ячменя и примеси в соотношении 1:0,0045 (рис. 3.13). В качестве продукта взято зерно ячменя, параметры которого согласно ГОСТ Р 53900-2010.

3) Установленную в пневматическом канале скорость воздушного потока на основе реальных значений скорости пневматической молотковой дробилки равная 20 м/с, установленная с помощью ЛАТРа на напряжении 180V.

4) Подачу продукта, которая определяется через время опустошения приемного бункера с тремя позициями открытия шиберной заслонки (рис. 62). В таблице 3.7 представлены результаты определения подачи зерна при открытии шиберной заслонки на 30%, 65% и 100%.



Рисунок 3.13 – Подготовка продукта к исследованию

5) Эффективность очистки зерна от металломагнитных примесей во встроенном пневмосепараторе рассчитана по формуле (3.2):

$$\beta = \frac{m_{\text{ост}} * 100}{m_{\text{изн}}}, \quad (3.2)$$

где β – эффективность очистки, %;

$m_{\text{ост}}$ – масса примеси, которая осталась на магнитах, гр;

$m_{\text{изн}}$ – изначальная масса примеси, гр.

Исследование эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей проводилось в зависимости от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора и удельной подачи в приемном бункере. Результаты занесены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 - Экспериментальные значения эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в пневмосепараторе.

	Эффективность очистки η , %		
	0,28 кг/с	0,53 кг/с	0,78 кг/с
Базовый			
3 витка			
4 витка			
6 витков			

На основе полученных экспериментальных данных, составили графики зависимости эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора и подачи приемного бункера.

3.7. План многофакторного эксперимента

Для подтверждения основных теоретических положений исследования и выявления рациональных параметров процесса очистки зерна от минеральных и металлических примесей в пневмосепараторе пневматической молотковой дробилки были проведены экспериментальные исследования. Программа этих исследований включала в себя следующие этапы:

1. Изучение влияния различных факторов на процесс очистки зерна в пневмосепараторе;
2. Выбор оптимального плана проведения многофакторного эксперимента с установлением уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров процесса;
3. Разработка экспериментальной установки для лабораторных исследований, позволяющей эффективно очищать зерно от примесей;
4. Определение рациональных технологических параметров пневмосепаратора для очистки зерна от минеральных и металлических примесей.

При выделении сепаратором минеральных и металломагнитных примесей оценивалось влияние факторов, выбранных на основе метода априорного ранжирования по ГОСТ ISO 8587-2015 и литературного анализа, приведенных в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Оценка значимости факторов

Исследователи	Факторы				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Булатов С.Ю.	5	4	1	2	5
Ческидов М.В.	1	2	5	3	1
Жигжитов А.О.	1	2	4	5	1
Пашинова Н.В.	2	1	5	3	2
Федоров О.С.	2	4	1	3	2
Голиков А.И.	5	4	2	3	5
Ранговые суммы	16	17	18	19	20
Отклонение Δ_i суммы рангов от средней суммы рангов	5	6	7	8	9
Средняя сумма рангов	11				
Квадраты отклонений Δ_i^2	25	36	49	64	81

1. Шаг витков рабочего органа t (X_1);
2. Глубина осадительной камеры для крупных примесей H (X_2);
3. Подача материала q (X_3);
4. Скорость воздушного потока V (X_4);
5. Частота вращения шнека n (X_5).

Вычисляем отклонение Δ суммы рангов от средней суммы рангов для каждого из факторов (3.3):

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (3.3)$$

где Δ_i – отклонение суммы рангов i -го фактора от средней суммы рангов;
 k – число факторов;

$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}$ – средняя сумма рангов.

Определив значения Δ_i для каждого из факторов, оценивают степень согласованности мнений опрошенных специалистов. Для этого используют коэффициент конкордации W , который вычисляют по формуле (3.4):

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (3.4)$$

где $S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2$.

Получаем значение коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12 \cdot (81 + 64 + 79 + 36 + 25)}{6^2 \cdot (5^3 - 5)} = 0,71$$

Значимость коэффициента конкордации W устанавливают с помощью критерия Пирсона. Для этого находят расчетное значение χ^2_p (3.5):

$$\chi^2_p = m(k-1)W, \quad (3.5)$$

Расчетное значение χ^2_p сравнивают с табличным значением из распределения Пирсона, найденным для принятого уровня значимости и числа степеней свободы $f = k - 1$. Гипотеза о наличии согласия мнений опрошенных специалистов принимается, если $\chi^2_p \geq \chi^2_t$. При 5%-ном уровне значимости ($\alpha = 0,05$) и числе степеней свободы $f = 5$, табличное значение χ^2_t составляет 9,49. Так как $\chi^2_p = 17,04 > \chi^2_t = 9,49$, то можно считать, что мнения специалистов согласуются.

Убедившись в согласованности мнений специалистов, можно построить диаграмму рангов. При построении этой диаграммы по оси абсцисс откладывают факторы в порядке возрастания суммы рангов, а по оси ординат - суммы рангов (рис. 3.14).

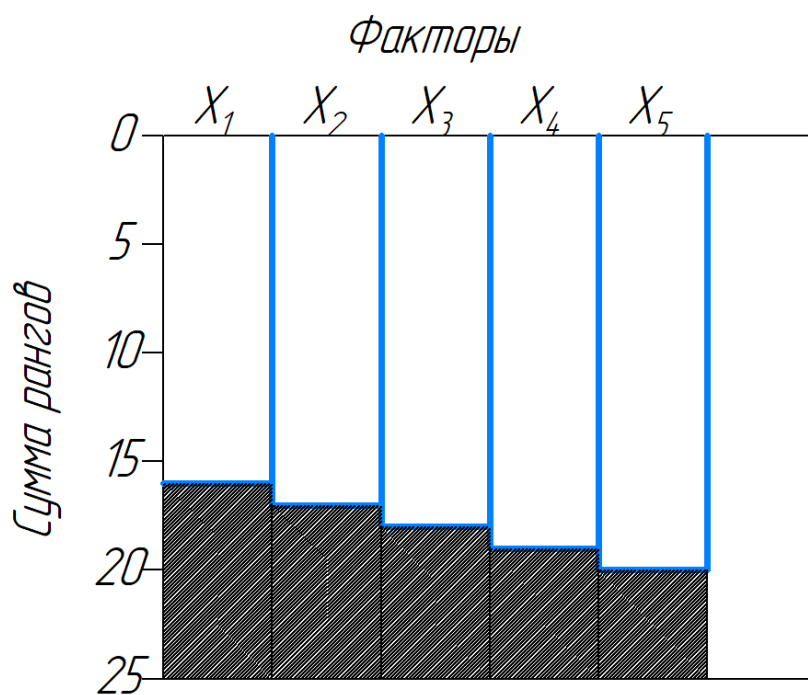


Рисунок 3.14 – Диаграмма рангов

На основании диаграммы рангов можно сделать вывод, что распределение степеней влияния факторов монотонно убывающее. Это означает, что в дальнейшее исследование процесса необходимо включить все факторы. Однако, мы рассмотрим первые три фактора X_1 , X_2 и X_3 , которые в большей степени подходит для исследования:

1. Шаг витков рабочего органа t (X_1): определяет расстояние между витками и оказывает влияние на интенсивность воздействия на зерно.

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

3. Подача материала q (X_3): определяет количество материала, поступающего в сепаратор, что непосредственно влияет на скорость и эффективность процесса очистки от металломагнитных примесей.

Уровни факторов эксперимента приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Уровни факторов экспериментов [119]

Факторы	Условные обозначения	Код	Уровни факторов			Интервал варьирования	Отклик (Количество выделенных примесей) β , %
			-1	0	+1		
Шаг витков винтового рабочего органа,	t	X_1	40	60	80	20	
Глубина осадительной камеры,	V	X_2	40	80	120	40	
Подача материала, кг/ч	q	X_3	1008	1908	2808	900	

Для обоснования рациональных конструктивно-режимных параметров пневмосепаратора молотковой дробилки на основе полученных результатов

был выбран план многофакторного эксперимента, представляющий собой композиционный симметричный трехуровневый план Бокса-Бенкена классическое уравнение регрессии полинома I порядка с доверительным интервалом в 95%.

В качестве отклика выбрано количество выделенных примесей β , выраженным в %, рассчитанного по формуле (3.6):

$$\beta = \frac{m_{\text{выд}} - m_{\text{зерна}}}{m_{\text{общ.прим.}}} * 100, \quad (3.6)$$

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 того чтобы определить, в какой области исследований необходимо работать, сколько опытов нужно провести, чтобы найти рациональные параметры и режимы очистки зерна от примесей, были применены передовые методы планирования и анализа экспериментов. Эти методы позволяют проводить исследования с высокой точностью и избегать заведомо неэффективных и неудобных режимов, что экономит ресурсы и время. Составляется уравнение регрессии, которое должно выглядеть следующим образом (3.7):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.7)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии проводится по формуле (3.8) [75]:

$$\Delta b_i = \pm t S_{(b_i)}, \quad (3.8)$$

где t — критерий Стьюдента.

Построчные дисперсии параллельных опытов считаются (3.9):

$$S_i^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{f_i}, \quad (3.9)$$

где $f_i = n - 1$.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле (3.10):

$$S^2(y) = \frac{\sum S_i^2}{N}, \quad (3.10)$$

где N – количество опытов.

Проверка воспроизводимости проверяется с помощью критерия Кохрена, расчетное значение которого определяется по формуле (3.11):

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{k=1}^N S_k^2}, \quad (3.11)$$

где S_k^2 – оценка дисперсии k -ого опыта (3.12):

$$S_k^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (y_{kj} - \bar{y}_k)^2 \quad (3.12)$$

$S_{\max}^2$ – максимальная из рассчитанных дисперсий.

Расчетное значение критерия Кохрена сравнивается с табличным значением G_T , которое находят по доверительной вероятности P , числу степеней свободы числителя $f_1 = m - 1$ и знаменателя $f_2 = N$. Если $G_p \leq G_T$, то гипотеза об однородности дисперсий (второй постулат) подтверждается. В противном случае необходимо выяснить причины нестабильности экспериментов, ликвидировать их и повторить все сначала [1,111].

Дисперсия коэффициентов регрессии (3.13):

$$S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{N \cdot n}, \quad (3.13)$$

Ошибка коэффициентов регрессии рассчитывается (3.14):

$$S(b_i) = \sqrt{S^2(b_i)}, \quad (3.14)$$

Проверку адекватности уравнения регрессии осуществляют с помощью критерия Фишера (3.15):

$$F_p = \frac{\max(S_{AD}^2; S_Y^2)}{\min(S_{AD}^2; S_Y^2)}, \quad (3.15)$$

где S_{AD}^2 – оценка дисперсии адекватности;

S_Y^2 – оценка дисперсии адекватности опытов в центре плана [1,111].

Полученный критерий Фишера сопоставляется с табличным значением. Если расчётный критерий окажется меньше табличного, это свидетельствует о том, что уравнение регрессии корректно описывает исследуемую поверхность отклика..

В приготовленной смеси зерна ячменя с примесями для исследования эффективности очистки зерна в пневмосепараторе соотношения ячменя к примесям 1:0,04 кг (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Подготовка продукта к исследованию

Для заполнения результатов экспериментальных исследований построена таблица 3.12.

Таблица 3.12 - Таблица для заполнения результатов экспериментальных исследований

№ опыта	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}$	$S^2(Y_u)$
1	-1	-1	-1					
2	-1	-1	+1					
3	-1	+1	-1					
4	-1	+1	+1					
5	+1	-1	-1					

6	+1	-1	+1					
7	+1	+1	-1					
8	+1	+1	+1					
9	+1	0	0					
10	-1	0	0					
11	0	+1	0					
12	0	-1	0					
13	0	0	+1					
14	0	0	-1					
15	0	0	0					
$\sum S^2(Y_u)$								

После получения адекватных математических моделей, определяющих качественные показатели процесса разделения в зависимости от величины факторов, проводился их анализ с целью изучения свойства поверхности отклика в окрестностях оптимума.

3.8. Методика проведения производственных испытаний

пневмосепаратора пневматической молотковой дробилки

Методика проведения производственных испытаний встроенного пневмосепаратора молотковой дробилки с рациональными конструктивно-режимными параметрами и исследования эффективности очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей на предприятии АО «Чкаловское» Новосибирский р-н, п Восход в период с 16.04.2025 по 23.04.2025 г., включает в себя:

1) Установку мини-комбикормового агрегата (рис. 3.16), состоящего из 1 пневматической молотковой дробилки марки ДПМ-11, 2 горизонтального смесителя СГ-4, циклона-осадителя БЦР-450 3 и шнекового транспортера

зерна ТСШ-150 с бункером 4. При проведении экспериментальных исследований использовались стандартный пневмосепаратор встроенный в крышку дробилки и пневмосепаратор с винтовым рабочим органом с рациональными конструктивно-режимными параметрами (рис. 3.17). Характеристики пневмосепараторов указаны в таблице 3.13.



Рисунок 3.16 – Мини-комбикормовый агрегат

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



А



Б

Рисунок 3.17– Пневмосепараторы

А – пневмосепаратор молотковой дробилки ДПМ-11; Б – пневмосепаратор с винтовым рабочим органом.

Таблица 3.13 – Технические характеристики пневмосепараторов молотковой дробилки

Параметр	Пневмосепаратор ДПМ-11	Пневмосепаратор с винтовым рабочим органом
Диаметр загрузочного патрубка, мм	75	75
Длина загрузочного патрубка, мм	240	240
Глубина осадительной камеры, мм	30	44
Диаметр винтового рабочего органа, мм	-	75
Теоретическая эффективность очистки зерна от примесей, %	90	98
Диаметр отверстий решета дробилки, мм	4	4

Зерновая смесь из бункера с помощью эжектора направляется в пневмосепаратор. В этом устройстве происходит очистка зерна от минеральных и металлических примесей, которые имеют магнитные свойства. После очистки зерно поступает в дробилку, где оно измельчается. Измельчённое зерно через выходной патрубок дробилки направляется в горизонтальный смеситель. В это же время лёгкие и мелкие частицы улавливаются циклонным осадителем. В смесителе к дробленному зерну добавляются компоненты кормовой смеси и перемешиваются в течение 3-5 минут. Затем готовая смесь выгружается через выпускной патрубок. С помощью шнекового транспортёра она направляется на раздачу в мешки.

2) Расчет и приготовление кормовой смеси массой 160 кг согласно рецептуре предприятия АО «Чкаловское»:

- зерно ячменя 121 кг;
- жмых 32 кг;
- соль 2,67 кг;
- сода 1,33 кг;
- мел кормовой 1,33 кг.

В качестве продукта взято зерно ячменя, параметры которого согласно ГОСТ Р 53900-2010, влажность которого в бурте составила 9-10%. Наличие примесей отображено на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Зерно ячменя

Массоконтроль при приготовлении смеси осуществлялся при помощи весового устройства ДУЭТ, установленного на раме горизонтального смесителя (рис. 3.19).

ДУЭТ состоит из весоизмерительного терминала, и тензодатчиков, подключенных к весоизмерительному терминалу через коммутационную коробку (блок АЦП). Тензодатчики воспринимают весовую нагрузку и передают информацию весоизмерительному терминалу, который преобразует и отображает в воспринимаемые показания веса.

3) Оценку эффективности очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей в пневмосепараторах проводилась путём сравнительного анализа содержания примесей в двух типах пневмосепараторов:



А

Б

Рисунок 3.19 – Весовое устройство ДУЭТ

А – весоизмерительный терминал; Б – тензодатчик.

- дробление 1,5 тонн зерна на встроенном сепараторе дробилки ДПМ-11 и 1,5 тонн зерна на сепараторе с винтовым рабочим органом.

4) Анализ результатов производственных испытаний пневмосепаратора с винтовым рабочим органом относительно пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ-11, которые были занесены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14 – Результаты производственных испытаний пневмосепаратора

Параметр	Пневмосепаратор молотковой дробилки ДПМ-11			Пневмосепаратор с винтовым рабочим органом		
Сила тока I, А						
Напряжение U, В						

Мощность Р, кВт						
Масса минеральных примесей $m_{\text{мин}}$, кг						
Масса минеральных примесей $m_{\text{метал}}$, кг						
Эффективность очистки зерна от примесей β , %						
Производительность пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ-11 Q , кг/ч						
Удельный расход электроэнергии N , кВт*ч/кг						

Мощность дробилки рассчитана по следующей формуле (3.16):

$$N = I \cdot U, \text{ кВт} \quad (3.16)$$

Производительность пневмосепаратора молотковой дробилки рассчитывалась по формуле (3.1). Измерение силы тока I и напряжения U осуществлялось на каждой фазе двигателя молотковой дробилки.

Результаты производственных испытаний дали возможность оценить эффективность работы внедряемого пневмосепаратора с винтовым рабочим органом. На основе полученных данных мы подготовили рекомендации для предприятия по установке и настройке конструктивно-режимных параметров, что позволит улучшить его функционирование.

3.9. Выводы по главе

Для подтверждения основных теоретических положений работы и выявления рациональных параметров рабочего процесса очистки зерна перед

измельчением были проведены экспериментальные исследования.

Программа этих исследований включала в себя несколько этапов по:

- выявлению закономерностей изменения скорости воздушного потока в пневмопроводе пневматической молотковой дробилки в зависимости от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора и на выходном патрубке;
- установлению эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в зависимости от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора молотковой дробилки;
- определению технико-энергетических показателей пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором с винтовым рабочим органом;
- изучению влияния технологических и конструктивных факторов на процесс очистки зерна от примесей в пневмосепараторе молотковой дробилки для последующего обоснования рациональных конструктивно-технологических параметров процесса очистки зерна;
- Определению сравнительных технико-энергетических и технологических характеристик пневмосепаратора с винтовым рабочим органом и базовом сепараторе в производственных условиях.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Траектории движения воздушного потока в пневмосепараторе молотковой дробилки

Для исследования теоретических и практических траекторий движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу пневмосепаратора молотковой дробилки использовалась лабораторная установка, описанная в разделе 3.1 (рис. 3.2).

Экспериментальные исследования позволили определить траекторию движения материальной частицы в воздушном потоке и проанализировать зависимость отклонения его движения в зависимости от количества витков винтового рабочего органа (рис. 4.1-4.3) [30]. Координаты полученных теоретических и экспериментальных точек занесены в таблицы (приложение 2).

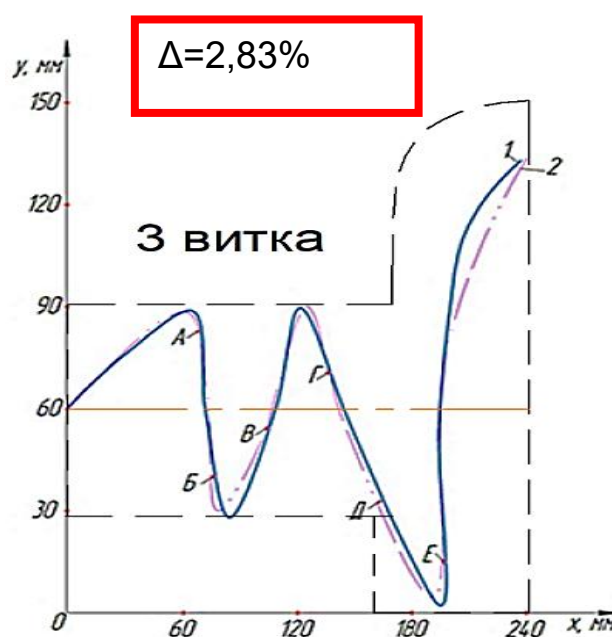


Рисунок 4.1 - Графики траекторий движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу с 3 витками

Проанализировав значения координат точек по оси X выявлена разница ΔX . Отклонение значений координат точек фактической от теоретической варьируется от 1,36 до 2,12 и принимается среднее значение 1,75. Относительная погрешность составила не более 2,83% [30].

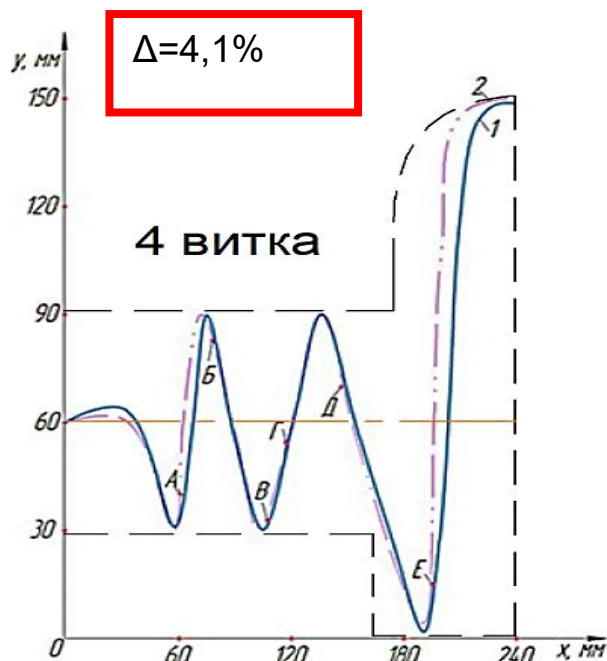


Рисунок 4.2 - Графики траекторий движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу с 4 витками

В результате анализа значений координат точек по оси X была обнаружена разница ΔX . Отклонение значений координат точек, полученных на практике, от теоретических значений колеблется от 1,56 до 2,48, при этом среднее значение составляет 1,9. Относительная погрешность не превышает 4,1% [30].

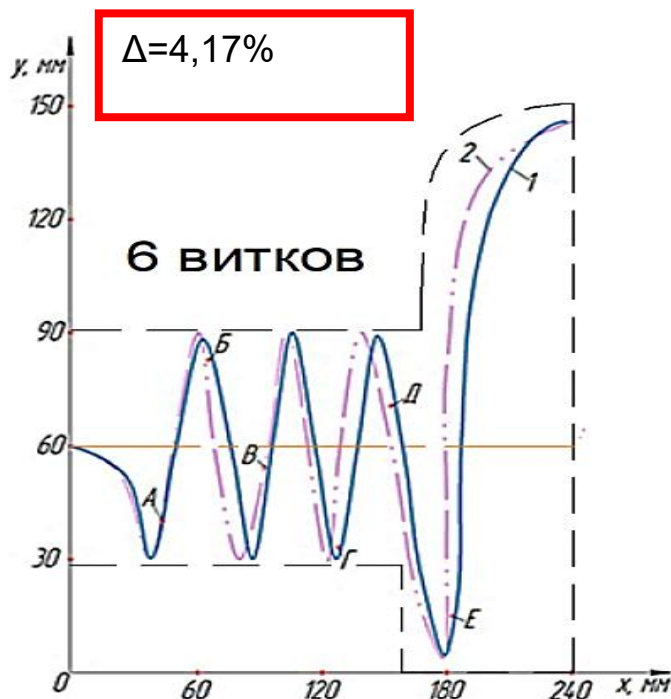


Рисунок 4.3 - Графики траекторий движения материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу с 6 витками

После анализа значений координат точек по оси X была обнаружена разница ΔX . Отклонения значений координат фактических точек от теоретических составляют от 1,78 до 4,04, а среднее значение равно 3,07. Относительная погрешность не превышает 4,17% [30].

В результате теоретического исследования получено уравнение, описывающее движение материальной частицы в воздушном потоке по винтовому рабочему органу в сепараторе пневматической молотковой дробилки (4.1):

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(p\vartheta)}{\partial y} + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \right) = 0, \\ p \left(\frac{\partial \vartheta_k}{\partial t} + \vartheta_x \frac{\partial \vartheta_k}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_k}{\partial y} \right) = \Delta \rho G_k - \Delta \frac{\partial p}{\partial k} + 2\Delta \frac{\partial}{\partial k} \left(\mu \frac{\partial \vartheta_k}{\partial x} \right) + \Delta \frac{\partial}{\partial l} \left[\mu \left(\frac{\partial \vartheta_l}{\partial k} + \frac{\partial \vartheta_k}{\partial l} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial k} \mu \theta, \end{cases} \quad (4.1)$$

Введённый коэффициент Δ позволяет с относительной погрешностью в 4,17% определить положение точки в пространстве при движении по винтовой траектории в сепараторе [30].

4.2. Результаты экспериментальных исследований обоснования длины пневмопровода на входном патрубке пневматической молотковой дробилки

Результаты экспериментальных исследований, направленных на обоснование длины пневмопровода пневматической молотковой дробилки на входном патрубке, показали, что установка пневмосепаратора с винтовым рабочим органом оказывает влияние на скорость воздушного потока в пневмопроводе. Результаты измерений представлены в приложении 3.

На основе полученных измерений, построили графики зависимости изменения скорости воздушного потока в зависимости от количества витков винтового рабочего органа и длины пневмопровода на входном патрубке (рис. 4.4).

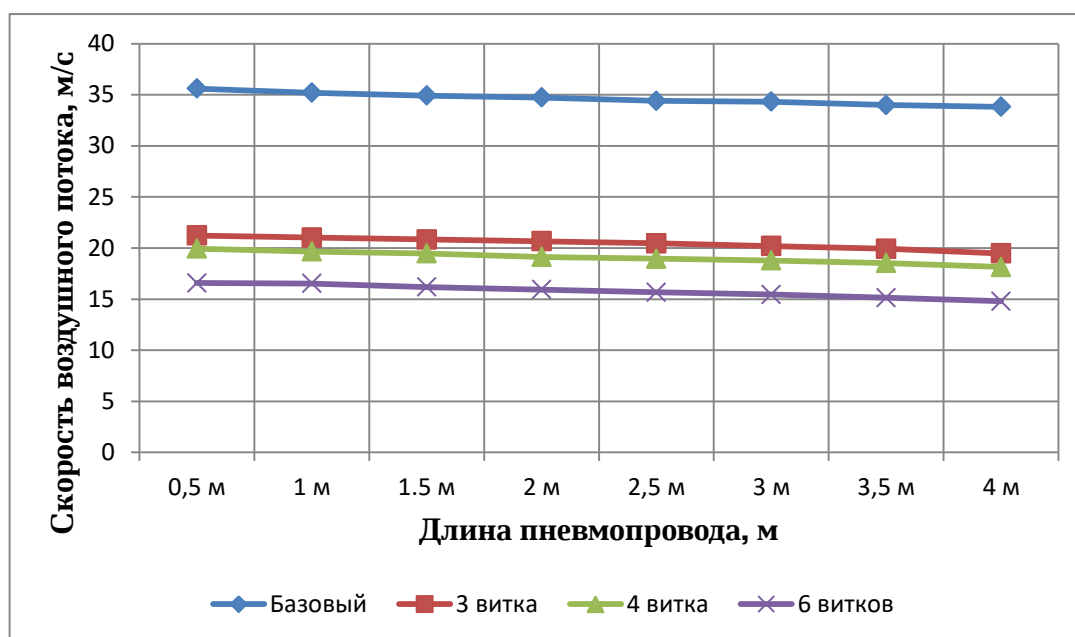


Рисунок 4.4 – Графики скорости воздушного потока

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.4, можно сделать вывод, что при увеличении длины пневмопровода на каждые 0,5 метра скорость воздушного потока снижается на 0,72%, 1,23%, 1,34% и 1,61% соответственно при 3, 4 и 6 витках пневмопровода. При установке пневмосепаратора с винтовым рабочим органом скорость воздушного потока на входном патрубке (0,5 метра) относительно базового сепаратора снижается на 40,37%, 43,99% и 53,43% при 3, 4 и 6 витках соответственно. Это снижение скорости обусловлено уменьшением пропускной способности входного патрубка. В таблице 4.1 представлены значения скорости воздушного потока в пневмопроводе с интервалом в 0,5 метра.

Таблица 4.1 – Изменение значений скорости воздушного потока в пневмопроводе.

	0,5 м - 1 м	1 м – 1,5 м	1,5 м – 2 м	2 м – 2,5 м	2,5 м – 3 м	3 м – 3,5 м	3,5 м – 4 м
Базовый	1,12	0,79	0,54	0,95	0,23	0,93	0,53
3 витка	0,94	0,95	0,81	0,97	1,32	1,34	2,26
4 витка	1,4	0,91	1,8	0,94	0,89	1,28	1,6
6 витков	0,3	2,05	1,54	1,69	1,4	2,07	2,25

Для обоснования длины пневмопровода пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором с винтовым рабочим органом анализируем рисунок 4.5.

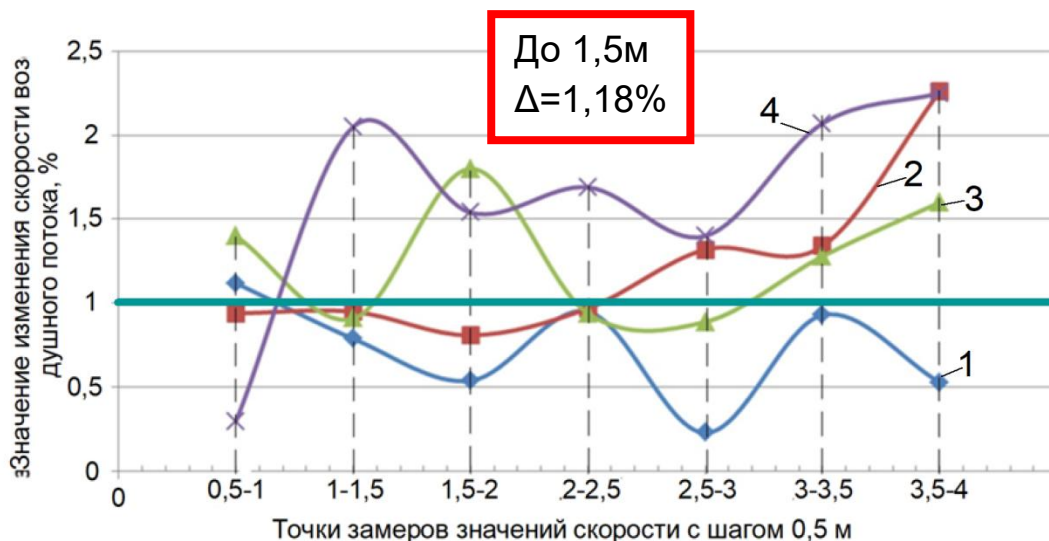


Рисунок 4.5 - Изменение скорости воздушного потока в пневмопроводе дробилки на входном патрубке:

1 – без витков; 2 – 3 витка; 3 – 4 витка; 4 – 6 витков.

Как видно из рисунка 4.5, при длине пневмопровода 1-1,5 метра наблюдается минимальное снижение скорости воздушного потока на 0,95% и 0,91% при использовании винтового рабочего органа с тремя и четырьмя витками соответственно. При шести витках снижение скорости в этой точке составляет 2,05%. Далее при использовании винтового рабочего органа происходит более значительное снижение скорости на 1,8% при четырёх витках и 1,54% при шести витках. При увеличении длины пневмопровода до 4 метров снижение скорости воздушного потока составляет 2,26%, 1,6% и 2,25% при трёх, четырёх и шести витках соответственно. Таким образом, целесообразно использовать пневмопровод длиной до 1,5 метра, при котором происходит наименьшее снижение скорости воздушного потока при установке пневмосепаратора с винтовым рабочим органом.

4.3. Результаты экспериментальных исследований определения скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что скорость воздушного потока на выходе из пневматической молотковой дробилки зависит от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора.

Результаты измерений показали, что увеличение количества витков с 3 до 6 приводит к незначительному снижению скорости воздушного потока. Данные измерений представлены в приложении 3.

Рассчитали среднюю скорость воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором с разными винтовым рабочими органами и построили график изменения скорости (рис. 4.6) [24].

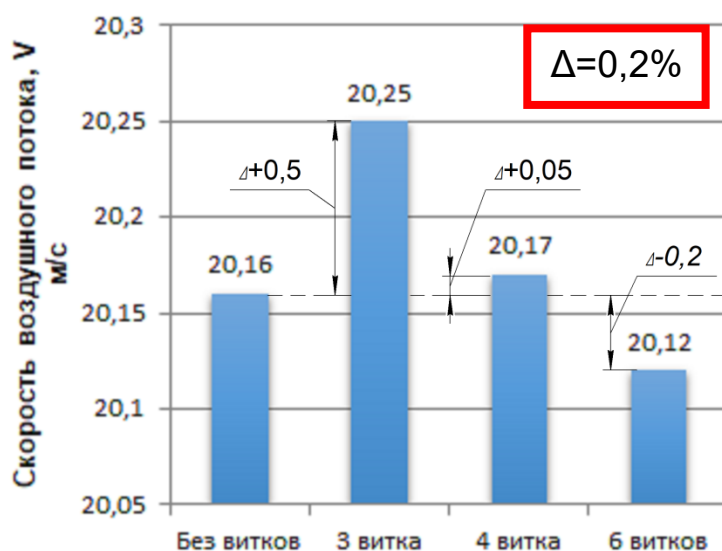


Рисунок 4.6 – График изменения скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилке ДПМ-11 [24]

График наглядно демонстрирует, что скорость воздушного потока на выходном патрубке молотковой дробилки с существующем встроенном сепараторе составляет 20,16 м/с. При установке винтового рабочего органа с 3 витка происходит повышение скорости на 0,44% относительно базового пневмосепаратора. При увеличении количества витков с 4 до 6 скорость

достигла 20,17 м/с и 20,12 м/с соответственно. Снижение скорости воздушного потока связано с уменьшением объёма входного патрубка. Таким образом, мы можем утверждать, что изменение средней скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки при увеличении количества витков винтового рабочего органа незначительно и составляет 0,2% [24].

4.4. Результаты экспериментальных исследований мощности пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором

Для изучения изменения энергетических характеристик на холостой работе пневматической молотковой дробилки ДПМ-11 с существующим и усовершенствованным пневмосепаратором в зависимости от количества витков винтового рабочего органа была использована лабораторная установка, описанная в разделе 3.4.

Для изучения сопротивления, которое пневматическая молотковая дробилка испытывает при установке пневмосепаратора с различными рабочими органами, был проведён поисковый эксперимент. В ходе этого эксперимента измерялось изменение мощности дробилки с усовершенствованным пневмосепаратором. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Показания мощности пневматической молотковой дробилки ДПМ-11 с пневмосепаратором при холостой работе [24].

Пневмосепаратор:	Мощность, N кВт
Базовый	2,96
с 3 витками	2,6
с 4 витками	2,49
с 6 витками	2,4

На основе полученных данных, построили график изменения мощности пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором с разным количеством витков винтового рабочего органа (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – График изменения мощности молотковой дробилки ДПМ-11 с пневмосепаратором [24]

График демонстрирует, что мощность молотковой дробилки ДПМ-11 в режиме холостого хода с использованием стандартной модели пневмосепаратора составила 2,96 кВт. Однако при установке винтового рабочего органа с 3, 4 и 6 витками мощность дробилки снижается на 0,36 кВт, 0,47 кВт и 0,56 кВт соответственно. Это снижение связано с уменьшением пропускной способности входного патрубка пневмосепаратора. В целом, мощность дробилки упала на 15,5% по сравнению с существующим пневмосепаратором [24].

4.5. Результаты экспериментальных исследований технико-энергетических параметров пневматической молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором

Результаты экспериментальных исследований технико-энергетических показателей пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором отображены на рисунках 4.8 и 4.9, демонстрирующие влияние изменения производительности пневмосепаратора и мощности молотковой дробилки в

зависимости от площади открытия шиберной заслонки и количества витков винтового рабочего органа. Результаты занесены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Экспериментальные технолого-мощностные показатели пневматической молотковой дробилки [31].

	Производительность $Q_{\text{сеп}}$, кг/ч			Удельный расход энергии дробилки ДПМ-11 $N_{\text{уд.дроб.}}$, кВт*с/кг		
	5,88 см ²	12,76 см ²	19,63 см ²	5,88 см ²	12,76 см ²	19,63 см ²
Базовый	560,2	884,7	1057,1	16,64	11,23	10,06
3 витка	556,4	812,5	1001,4	16,77	11,9	10,36
4 витка	362,8	716,6	960,5	24,2	13	10,64
6 витков	326,1	508	852,3	26,47	17,4	10,88

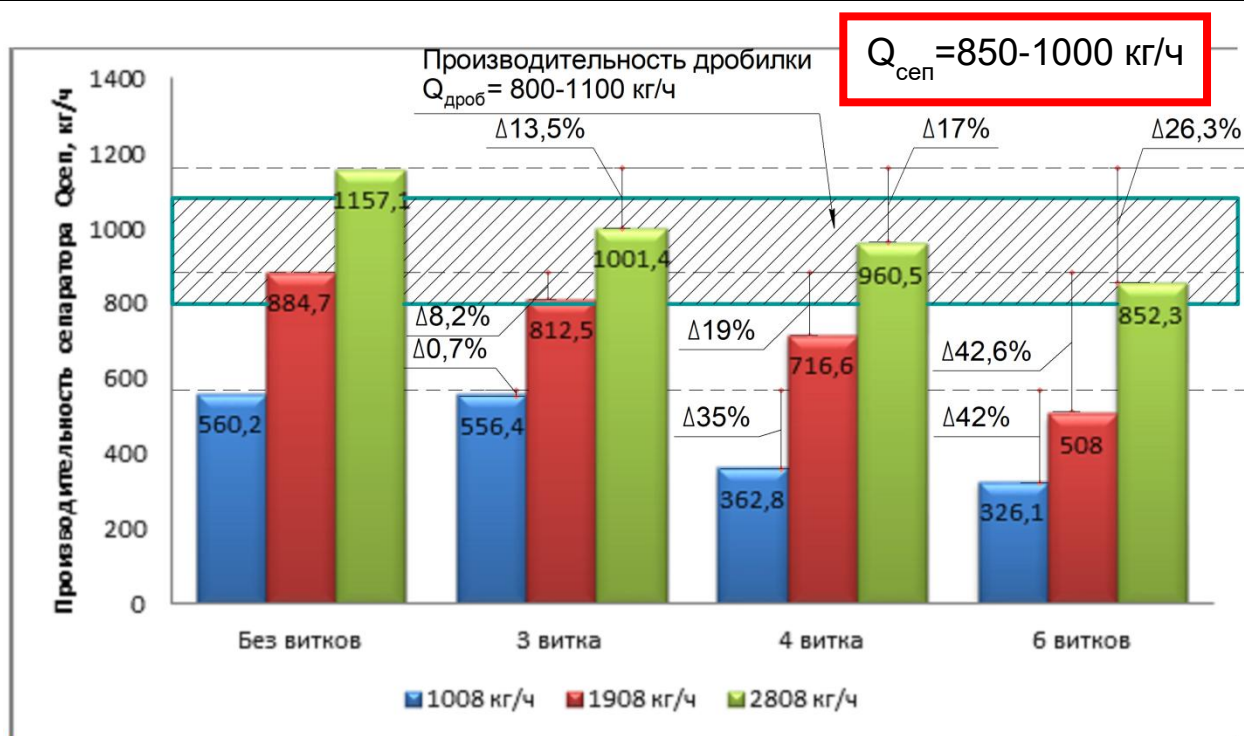


Рисунок 4.8 - График зависимости изменения производительности пневмосепаратора от подачи и количества витков винтового рабочего органа [31]

Производительность сепаратора молотковой дробилки ДПМ-11 оказывает влияние на производительность дробилки и качество измельчения

продукта. Производительность встроенного пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ-11 при увеличении подачи с площади открытия заслонки $5,88 \text{ см}^2$ 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 $790,1 \text{ кг/ч}$, при 4 витках $679,9 \text{ кг/ч}$, при 6 витках $562,1 \text{ кг/ч}$. По отношению к стандартной производительности сепаратора при максимальной подаче исходного зерна 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. Кроме того, следствием снижения производительности стало заполнение пневмосепаратора зерном в течение 5-30 секунд при 3 и 6 витках винтового рабочего органа, соответственно [31].

Следует отметить, что производительность молотковой дробилки ДПМ-11 составляет от 800 до 1000 кг/ч по данным завода изготовителя, что позволяет сделать вывод производительность стандартного сепаратора выше на $5,4\%$ при максимальном открытии заслонки. Высокая производительность сепаратора связана с тем, что зерновой поток поступает в дробилку неравномерно и пульсационно, что негативно сказывается на эффективность 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 пневмосепаратора с винтовым рабочим органом позволяет увеличить

эффективность очистки зерна от примесей, увеличить качество измельчаемого продукта [31].



Рисунок 4.9 - График зависимости изменения удельного расхода энергии дробилки от площади открытия заслонки и количества витков винтового рабочего органа [31]

Удельный расход энергии пневматической молотковой дробилки ДПМ-11 с установленным стандартным пневмосепаратором при увеличении подачи продукта с 1008 кг/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 со стандартным пневмосепаратором 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 винтового рабочего органа пневматической молотковой дробилки является уменьшение пропускной способности сепаратора, при этом наблюдается загрузка рабочей камеры с более равномерной подачей зерна на измельчение. Таким образом, установка пневмосепаратора с винтовым рабочим органом приведет к

увеличению энергозатрат не более 8,1% на измельчение, не понижая качество измельчения зерна и повышая эффективность очистки зерна от примесей [31].

В результате выполненных лабораторных исследований технико-энергетических характеристик пневмосепаратора молотковой дробилки определено незначительное влияние установки винтового рабочего органа отличающегося количеством витков, а именно наблюдается понижение производительности сепаратора по отношению к стандартному сепаратору от 9,1 % до 20% при максимальной подаче продукта, при этом производительность сепаратора с винтовым органом в зависимости от конструкции винтового рабочего органа по отношению к производительности дробилке снижается и составит 0,2 - 14,7%. Удельный расход энергии при установке винтового рабочего органа по отношению к значениям расхода энергии стандартного сепаратора увеличился в зависимости от количества витков от 2,9% до 8,1% [31].

4.6. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилки от металломагнитных примесей

Для оценки эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в пневмосепараторе в зависимости от количества витков винтового рабочего органа и подачи зерновой смеси была использована лабораторная установка, подробно описанная в разделе 3.6. Результаты занесены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 - Экспериментальные значения эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в пневмосепараторе [31].

	Эффективность очистки η , %		
	1008 кг/ч	1908 кг/ч	2808 кг/ч
Базовый	75,6	73,4	71,2
3 витка	88,9	82,6	80,4

4 витка	91,7	90	82,2
6 витков	98,8	98,3	98,2

На основе полученных экспериментальных данных, составили графики зависимости эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей от количества витков винтового рабочего органа пневмосепаратора и подачи зерновой смеси (рис. 4.10).

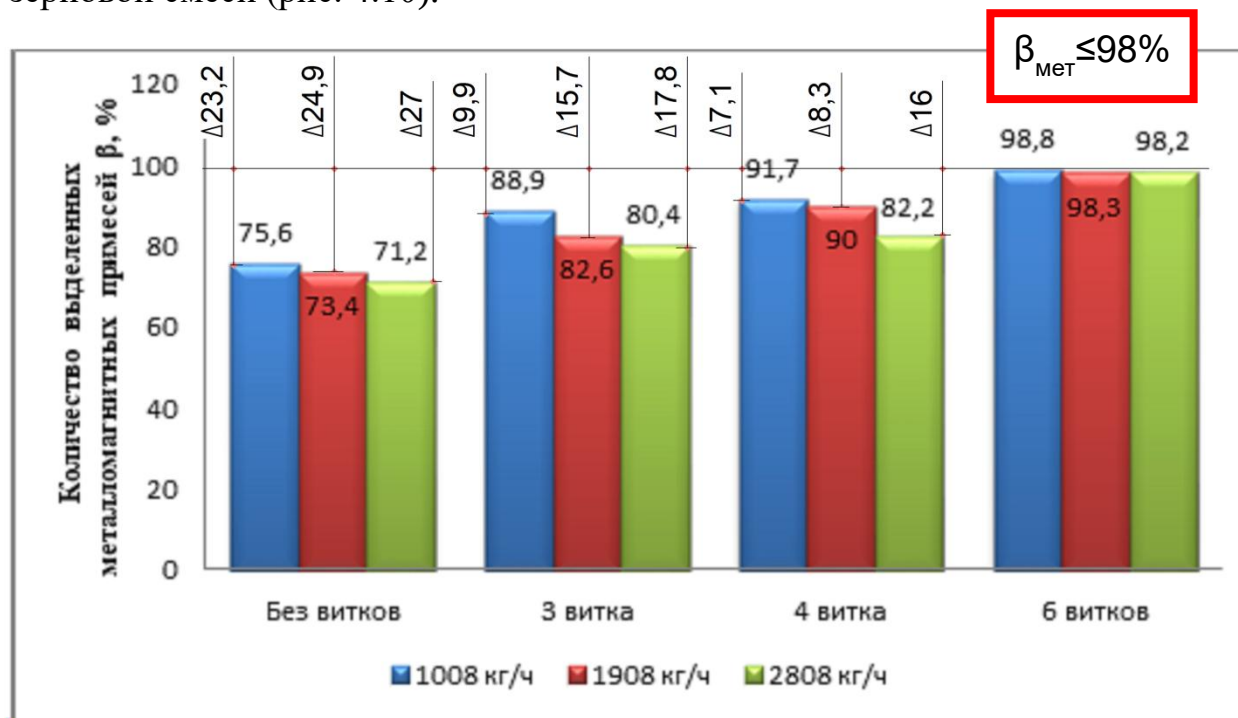


Рисунок 4.10 - График зависимости эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей от количества витков винтового рабочего органа и подачи [31]

График наглядно демонстрирует, что эффективность очистки зерна от металломагнитных примесей перед измельчением в существующем встроенном пневмосепараторе молотковой дробилки ДПМ-11 уменьшается с увеличением подачи и составляет в среднем 73,4%, с наибольшей эффективностью при минимальном открытии заслонки. Как видно из графика при установке винтового рабочего органа во входной патрубок пневмосепаратора с магнитами при увеличении количества витков с 3 до 6 по сравнению со стандартным сепаратором эффективность 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 рабочего органа повышается время и площадь контакта между металломагнитными примесями и магнитами [31].

Результаты исследования эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в зависимости от количества витков винтового рабочего органа и подачи зерновой смеси показали, что придание зерновой смеси винтовой траектории движения повышает время контакта металломагнитных примесей с магнитами. Эффективность очистки зерна перед измельчением от металломагнитных примесей достигает 98,8% [31].

4.7. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки зерна от примесей в пневмосепараторе молотковой дробилки

Для оценки эффективности очистки зерна от примесей в пневмосепараторе в зависимости от различных факторов, таких как количество витков винтового рабочего органа, глубина осадочной камеры и скорость подачи зерновой смеси, была создана лабораторная установка, подробно описанная в разделе 3.7.

В рамках диссертационной работы были проведены экспериментальные исследования пневмосепаратора с пневматической молотковой дробилкой, которая обеспечивала высокую эффективность очистки зерна — до 99%. Результаты этих исследований представлены в приложении 4.

Согласно математической обработке результатов исследования, критерий Стьюдента показал, что все коэффициенты модели значимы, поэтому окончательно уравнение регрессии в кодовый переменных приобретает следующий вид (4.2) [26]:

$$y = 97,558 - 1,126 \cdot X_1 - 0,295 \cdot X_2 - 0,489 \cdot X_3 - 0,4088 \cdot X_1 X_2 + 0,1213 \cdot X_1 X_3 + 0,2738 \cdot X_2 X_3 + 0,1813 \cdot X_1 X_2 X_3, \quad (4.2)$$

Получаем уравнение регрессии в исходных переменных (4.3) [26]:

$$\beta = 97,558 - 1,126 * \frac{t-60}{20} - 0,295 * \frac{H-80}{40} - 0,489 * \frac{q-0,53}{0,25} - 0,4088 * \left(\frac{t-60}{20} \right) \left(\frac{H-80}{40} \right) + \\ + 0,1213 * \left(\frac{t-60}{20} \right) \left(\frac{q-0,53}{0,25} \right) + 0,2738 * \left(\frac{H-80}{40} \right) \left(\frac{q-0,53}{0,25} \right) + 0,1813 * \left(\frac{t-60}{20} \right) \left(\frac{H-80}{40} \right), \quad (4.3)$$

что после несложных арифметических преобразований даст окончательное эмпирическое уравнение (4.4) [26]:

$$\beta = 99,74 + 0,01t + 0,037H - 1,256q - 0,001tH - 0,0487tq - 0,024qH + 0,0009tHq, \quad (4.4)$$

Для анализа полученной математической модели с помощью программы «Statistica 10» были построены зависимости, которые представлены в виде графической проекции и поверхности отклика.

На рисунках 4.11, 4.12 можно увидеть поверхность отклика, которая показывает взаимосвязь между шагом витков и глубиной осадительной камеры. При шаге витков от 40 до 50 мм и глубине осадительной камеры от 40 до 70 мм эффективность очистки зерна достигает до 99%. Однако, если шаг витков увеличить до 51-80 мм, а глубину осадительной камеры — до 71-120 мм, эффективность снижается до 96% [26].

На рисунках 4.13, 4.14 изображена поверхность отклика, на которой отображена взаимосвязь между количеством витков и подачей материала. При шаге витков от 40 до 58 мм и удельной подаче от 0,28 кг/с до 0,53 кг/с эффективность очистки зерна достигает 98,75%. Однако, если увеличить шаг витков до 59-80 мм и удельную подачу до 0,54-0,78 кг/с, эффективность снижается до 95,75% [26].

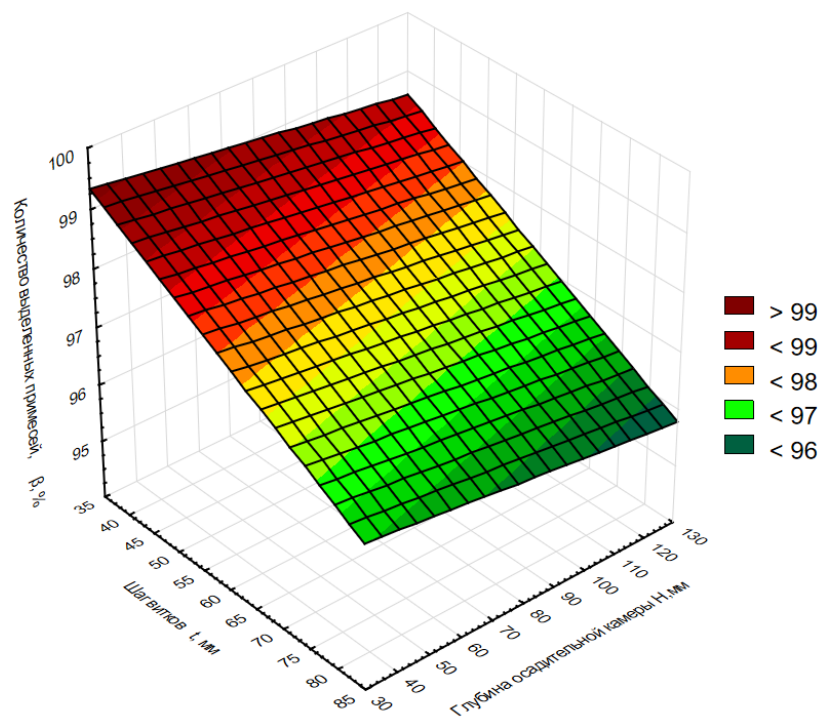


Рисунок 4.11 – Поверхность отклика взаимосвязи шага витков винтового рабочего органа и глубины осадительной камеры

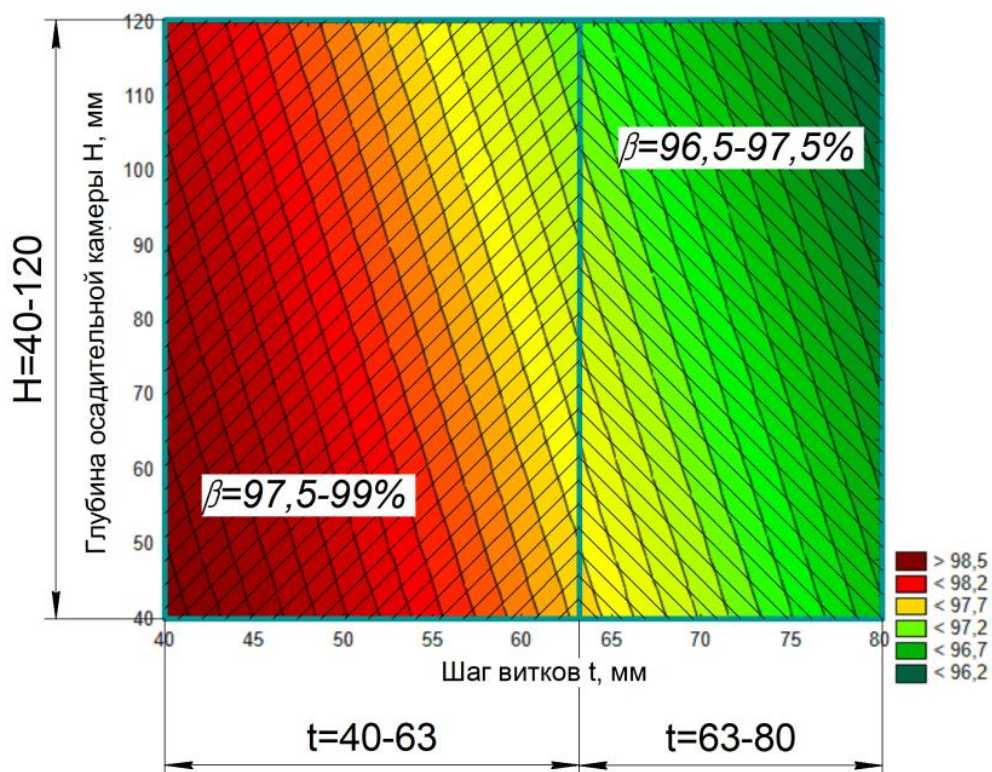


Рисунок 4.12 – Контурный график взаимосвязи шага витков винтового рабочего органа и глубины осадительной камеры

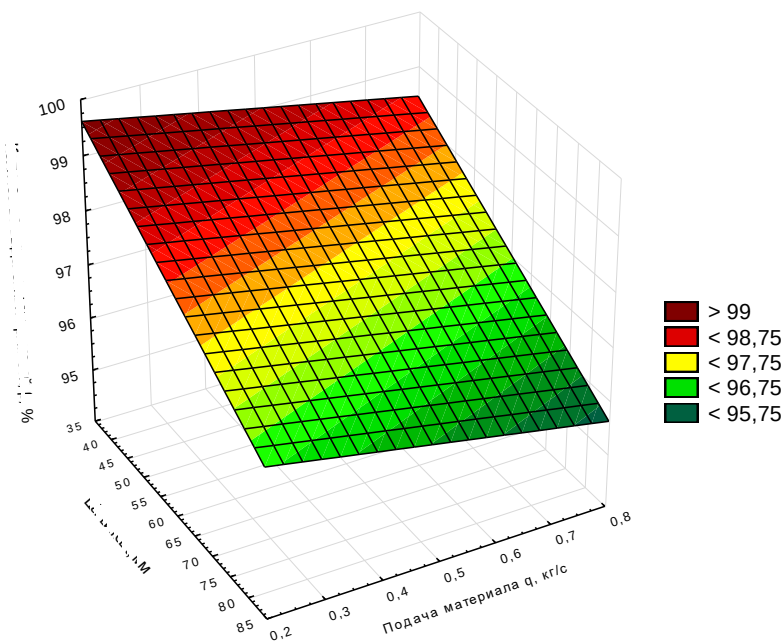


Рисунок 4.13 – Поверхность отклика взаимосвязи шага витков винтового рабочего органа и удельной подачи материала

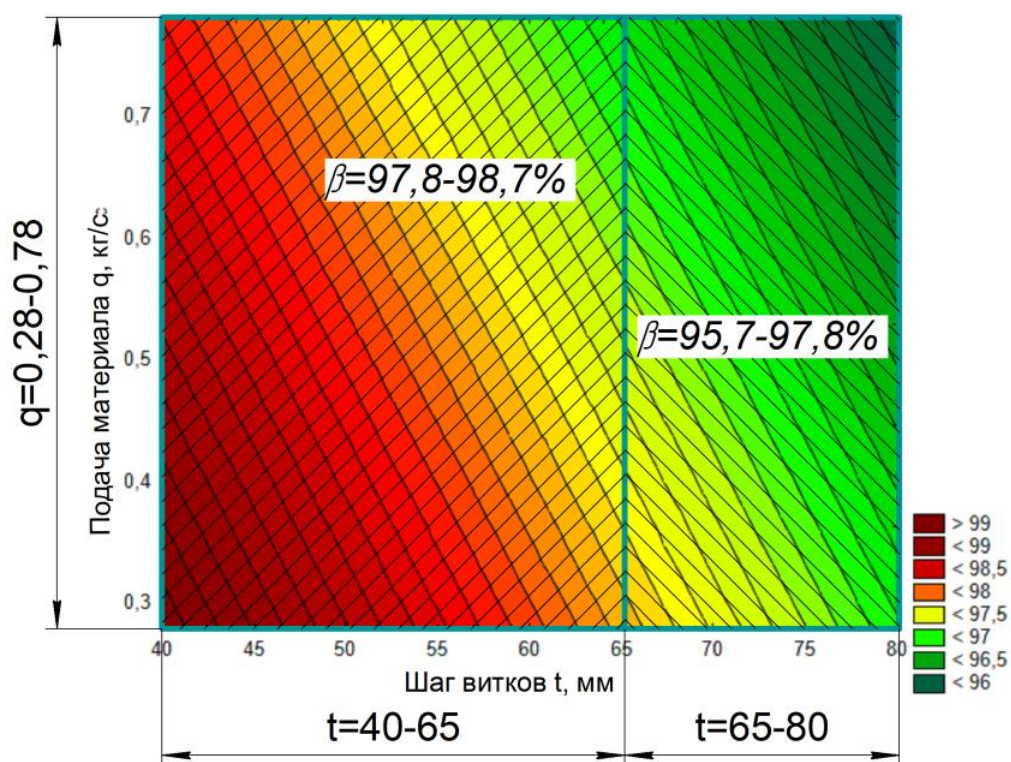


Рисунок 4.14 – Контурный график взаимосвязи шага витков винтового рабочего органа и удельной подачи материала

На графике зависимости эффективности очистки зерна от количества витков и подачи материала (рис. 4.15, 4.16) видно, что при глубине осадительной камеры от 40 до 75 мм и удельной подаче от 0,28 кг/с до 0,55

кг/с эффективность достигает до 98,5%. Однако при увеличении глубины осадительной камеры с 76 до 120 мм и удельной подаче с 0,56 кг/с до 0,78 кг/с эффективность очистки зерна снижается до 96,7% [26].

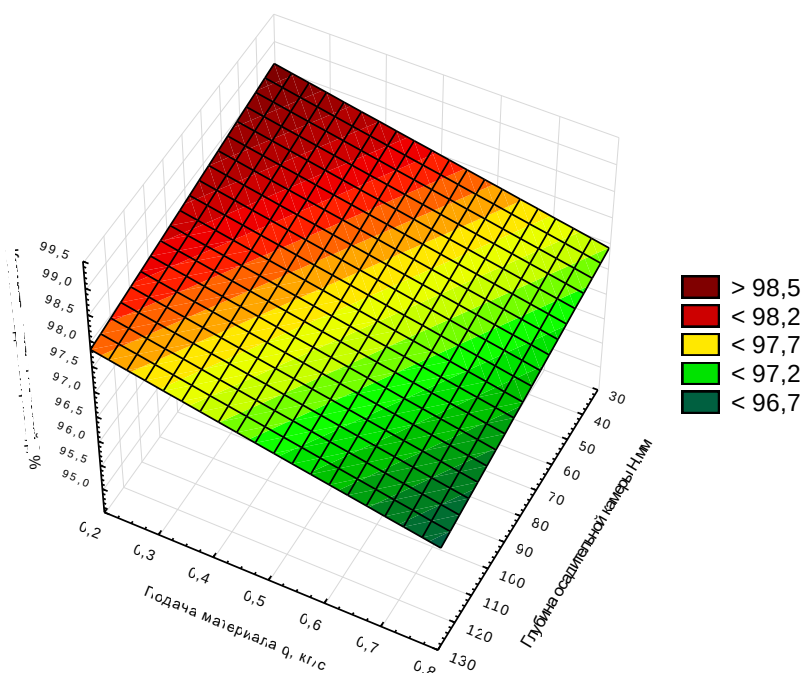


Рисунок 4.15 – Поверхность отклика взаимосвязи глубины осадительной камеры и удельной подачи материала

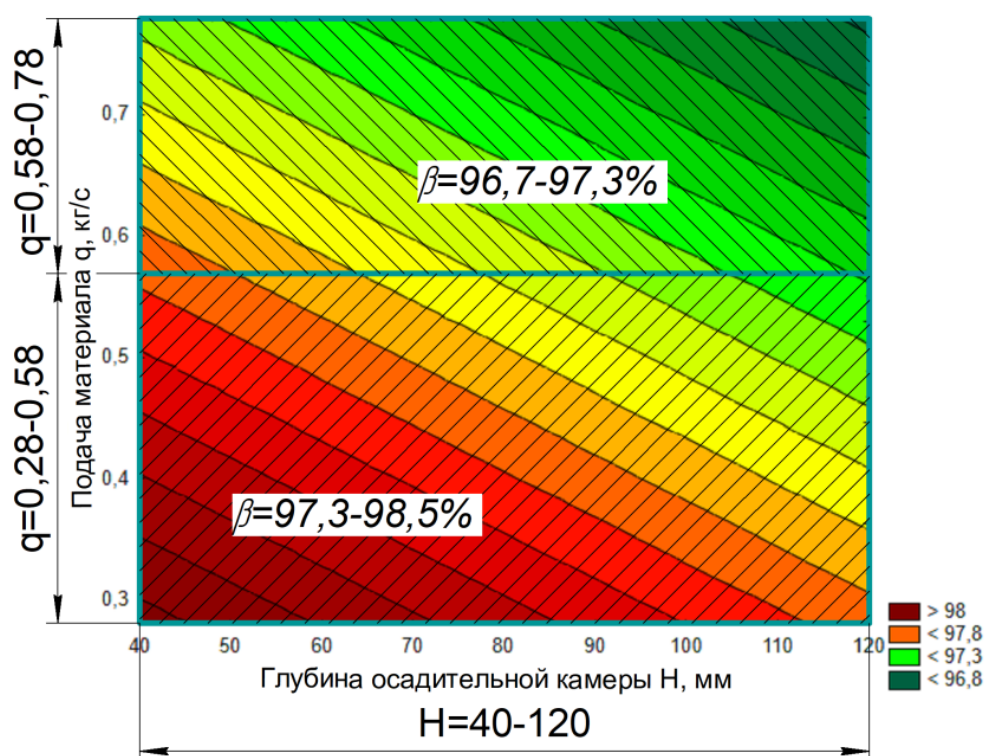


Рисунок 4.16 – Контурный график взаимосвязи глубины осадительной камеры и удельной подачи материала

Найдем расчетные значения отклика по уравнению регрессии (4.4) в раскодированном виде (приложение 3).

Согласно расчётным значениям эффективности очистки зерна от примесей, полученные с помощью раскодированного уравнения, очень близки к экспериментальным данным. Это свидетельствует о том, что математическая модель процесса очистки зерна от примесей перед измельчением в пневмосепараторе молотковой дробилки работает корректно.

Сначала вычислим дисперсию единичного измерения, дисперсию среднего значения функции отклика и соответствующее ей среднеквадратическое отклонение:

$$S^2_{ад}=0,059$$

Вычислим значение критерия Фишера по формуле:

$$F_p = \frac{0,059}{0,058} = 1,017 < F_{табл}$$

Для определения табличного значения критерия Фишера зададимся допустимой вероятностью: $P_F = 0,95$. С учетом этого, а также числа степеней свободы числителя $f_1 = 15-8 = 7$ и знаменателя $f_2 = 30$ по таблице определяем критическое значение критерия Фишера: $F_T = 2,33$. Отсюда можно сделать вывод что, критерий Фишера расчетный F_p меньше критерия Фишера табличного $F_{табл}$, а значит, уравнение регрессии можно признать адекватным. Это говорит о том, что уравнение регрессии (4.2) и, следовательно, математическая модель процесса очистки зерна от примесей перед измельчением в пневмосепараторе молотковой дробилки (4.4) адекватно описывает данные эксперимента. Адекватность математической модели, описывающей процесс очистки зерна, можно отобразить на сравнительном графике экспериментальных и расчетных значений эффективности очистки зерна на рисунке 4.17 [26].

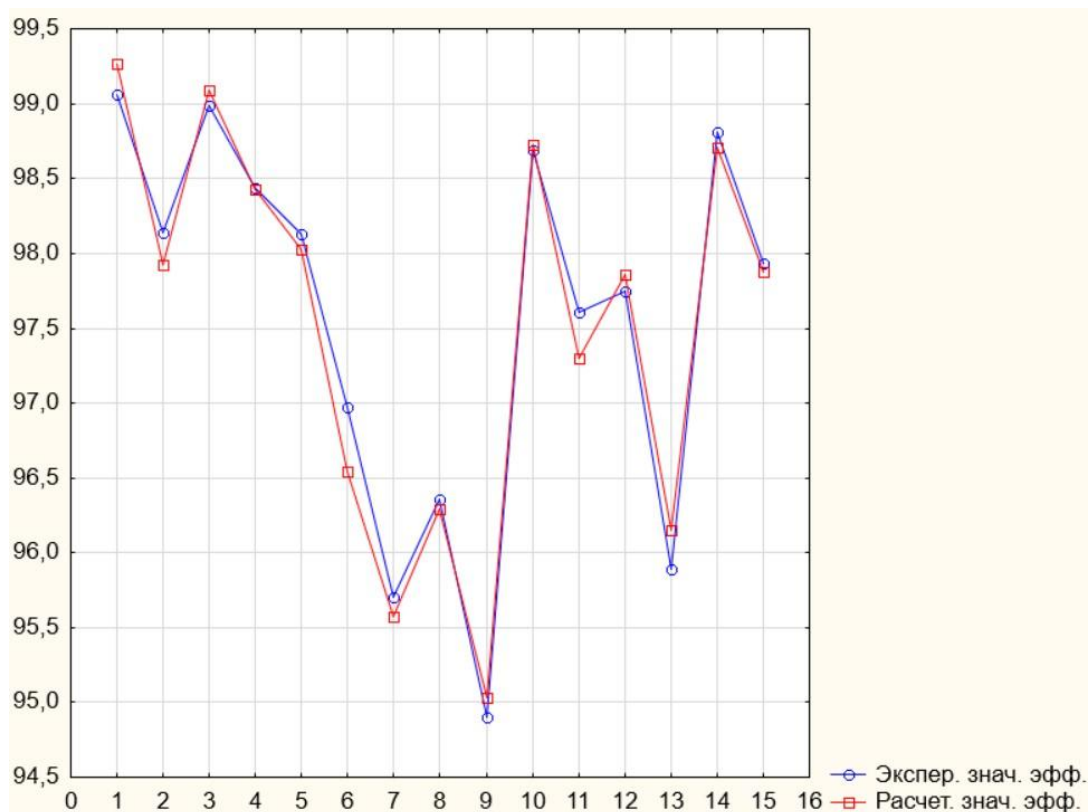


Рисунок 4.17 – Сравнительный график экспериментальных и расчетных значений эффективности очистки зерна

Так как математическая модель (4.4) адекватно описывает процесс очистки зерна от примесей в пневматической молотковой дробилке, необходимо найти рациональные значения шага витков рабочего органа, глубину осадительной камеры и подачу материала при которых значение эффективности очистки зерна будет максимальным. Для этого необходимо продифференцировать уравнение регрессии (4.2).

$$y = 97,558 - 1,126 \cdot X_1 - 0,295 \cdot X_2 - 0,489 \cdot X_3 - 0,4088 \cdot X_1 X_2 + 0,1213 \cdot X_1 X_3 + 0,2738 \cdot X_2 X_3 + 0,1813 \cdot X_1 X_2 X_3 \rightarrow \max |X_1 X_2 X_3|$$

$$\frac{dy}{dX_1} = -1,126 - 0,295 X_2 - 0,489 X_3 - 0,4088 X_2 + 0,1213 X_3 + 0,2738 X_2 X_3 + 0,1813 X_2 X_3$$

$$\frac{dy}{dX_2} = -1,126 X_1 - 0,295 - 0,489 X_3 - 0,4088 X_1 + 0,1213 X_1 X_3 + 0,2738 X_3 + 0,1813 X_1 X_3$$

$$\frac{dy}{dX_3} = -1,126X_1 - 0,295X_2 - 0,489 - 0,4088X_1X_2 + 0,1213X_1 + 0,2738X_2 + 0,1813X_1X_2$$

После того, как мы продифференцировали уравнение регрессии (4.2), выписываем полученные уравнения отдельно и решаем, как систему уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -1,126 - 0,7038X_2 - 0,3677X_3 + 0,4551X_2X_3 \\ 0 = -0,295 - 1,5348X_1 - 0,2152X_3 + 0,3026X_1X_3 \\ 0 = -0,489 - 1,0047X_1 - 0,0212X_2 - 0,2275X_1X_2 \end{cases}$$

Решив систему уравнений получили значения X_1 , X_2 и X_3 :

$$X_1 = -0,37$$

$$X_2 = -0,907$$

$$X_3 = 1$$

После чего рассчитываем натуральные рациональные значения шага витков рабочего органа, глубины осадительной камеры и подачи материала:

$$X_1 = \frac{t - 60}{20}$$

$$X_2 = \frac{H - 80}{40}$$

$$X_3 = \frac{q - 0,53}{0,25}$$

Отсюда получаем рациональные значения факторов: $t = 52,6$ мм, $H = 43,72$ мм, $q = 0,78$ кг/с [26].

Подставим рациональные значения факторов в математическую модель (4.4) и получим максимальное значение эффективности очистки зерна:

$$\beta = 99,74 + 0,01 \cdot 52,6 + 0,037 \cdot 43,72 - 1,256 \cdot 0,78 - 0,001 \cdot 52,6 \cdot 43,72 - 0,0487 \cdot 52,6 \cdot 0,78 - 0,024 \cdot 0,78 \cdot 43,72 + 0,0009 \cdot 52,6 \cdot 43,72 \cdot 0,78 = 97,4\%$$

При подстановке рациональных значений основных факторов в математическую модель процесса очистки зерна в пневмосепараторе молотковой дробилки полученная эффективность очистки составила 97,4%

при шаге витков витков 52,6 мм, глубины осадительной камеры 43,72 мм и подаче материала 0,78 кг/с.

Проведение полного факторного эксперимента позволило определить взаимосвязь конструктивно-технологических параметров пневмосепаратора с винтовым рабочим органом молотковой дробилки и их влияние на эффективность очистки зерна перед измельчением [26].

4.8. Результаты производственных испытаний пневмосепаратора молотковой дробилки

Производственные испытания оценки работы пневмосепаратора молотковой дробилки с винтовым рабочим органом при рациональных конструктивно-режимных параметрах проводились согласно методике, описанной в разделе 3.8. Результаты испытаний занесены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты производственных испытаний.

Параметр	Пневмосепаратор молотковой дробилки ДПМ-11	Пневмосепаратор с винтовым рабочим органом
Сила тока $I_{\text{ср}}$, А	13,6	10,6
Напряжение $U_{\text{ср}}$, В	220	220
Мощность $P_{\text{общ}}$, кВт	2,99	2,33
Масса минеральных примесей $m_{\text{мин}}$ с 3т зерновой смеси, кг	0,3778	0,4574
Масса металломагнитных примесей $m_{\text{мет}}$ с 3т зерновой смеси, кг	0,06	0,076
Содержание очищенных минеральных примесей с 3т зерновой смеси $X_{\text{мин}}$, %	0,0126	0,0152
Эффективность очистки	17,1%	

зерна от минеральных примесей $\beta_{\text{мин}}$, %		
Содержание очищенных металломагнитных примесей с 3т зерновой смеси $X_{\text{мет}}$, %	0,001	0,0013
Эффективность очистки зерна от металломагнитных примесей $\beta_{\text{мет}}$, %	23,1%	
Производительность молотковой дробилки ДПМ-11 Q, кг/ч	804	810
Удельный расход электроэнергии N, кВт*с/кг	40,16	31,06

Производилось усреднение значений силы тока I и напряжений U на трехфазном двигателе молотковой дробилки ДПМ-11.

В ходе испытаний пневматической молотковой дробилки, оснащенной исходным пневмосепаратором, была достигнута максимальная производительность составила 804 кг/ч и максимальная мощность 8,97 кВт. Удельный расход энергии составил 40,16 кВт*с/кг. При измельчении 3 т зерна содержание очищенных минеральных примесей составило 0,3778 кг и металломагнитных примесей 0,06 кг. При установке пневмосепаратора с рациональными конструктивно-режимными параметрами были достигнуты следующие показатели: производительность 810 кг/ч и мощность составила 6,99 кВт. При измельчении 3 т зерна содержание очищенных минеральных примесей составило 0,4574 кг и металломагнитных примесей 0,076 кг (рис. 4.18).

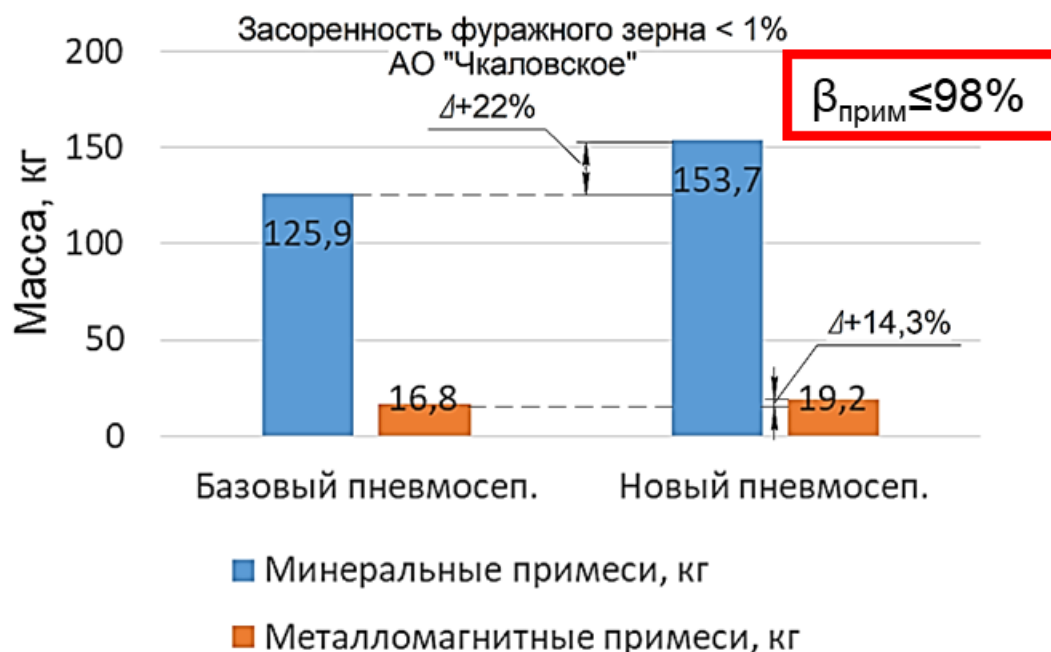


Рисунок 4.18 – Количество выделенных примесей при производственных испытаниях

Проанализировав результаты производственных испытаний таблицы 4.5, можно сделать вывод, что внедрение пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ-11 с винтовым рабочим органом, обладающего рациональными конструктивно-технологическими параметрами режима работы, на АО «Чкаловское» привело к повышению эффективности очистки зерна от минеральных примесей на 17,1% и металломагнитных примесей на 23,1%. Это обусловлено увеличением времени нахождения зерновой смеси в пневмосепараторе. Также отмечается снижение удельного расхода энергии на 22,66% при средней производительности пневматической молотковой дробилки ДПМ-11, составляющей 810 кг/ч.

В результате проведенных исследований удалось повысить эффективность рабочего процесса пневмосепаратора молотковой дробилки. Устройство способно работать в непрерывном всасывающем воздушном потоке без использования дополнительных приводов. Эффективность выделения минеральных и металломагнитных примесей составляет 98%. Акт проведения испытаний и внедрения в производство пневмосепаратора представлены в приложение 5.

4.9. Выводы по главе

Для реализации проведенных исследований по повышению эффективности очистки зерна перед измельчением в пневмосепараторе молотковой дробилки разработан экспериментальный образец пневмосепаратора с разными винтовыми рабочими органами.

Результаты экспериментальных и производственных исследований показали:

1. Результаты исследований теоретических и экспериментальных траекторий движения воздушного потока в зависимости от количества витков винтового рабочего органа позволили получить математическую модель движения частиц в пневмосепараторе с поправочным коэффициентом Δ .

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \vartheta)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \right) = 0, \\ p \left(\frac{\partial \vartheta_k}{\partial t} + \vartheta_x \frac{\partial \vartheta_k}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_k}{\partial y} \right) = \Delta \rho G_k - \Delta \frac{\partial p}{\partial k} + 2\Delta \frac{\partial}{\partial k} \left(\mu \frac{\partial \vartheta_k}{\partial x} \right) + \Delta \frac{\partial}{\partial l} \left[\mu \left(\frac{\partial \vartheta_l}{\partial k} + \frac{\partial \vartheta_k}{\partial l} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial k} \mu \theta, \end{cases}$$

Введённый коэффициент Δ позволяет с относительной погрешностью в 4,17% определить положение точки в пространстве при движении по винтовой траектории в сепараторе.

2. Результаты исследований, направленных на обоснование длины пневмопровода молотковой дробилки при установке пневмосепаратора с винтовым рабочим органом, показали, что при длине пневмопровода в диапазоне от 1 до 1,5 метров наблюдается наименьшее снижение скорости воздушного потока, которое составляет 2% относительно значений скорости, полученных при установке базового пневмосепаратора.

3. Результаты исследований зависимости изменения скорости воздушного потока на выходном патрубке пневматической молотковой дробилки от пневмосепаратора с винтовым рабочим органом показали, что увеличение количества витков винтового рабочего органа приводит к незначительному снижению скорости воздушного потока на 0,2% по

сравнению со значениями скорости при использовании базового пневмосепаратора.

4. Результаты исследований технико-энергетических показателей пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором и винтовым рабочим органом показали, что мощность при холостом ходе дробилки снизилась на 15,5%. Удельный расход энергии при установке винтового рабочего органа увеличился по сравнению со значениями стандартного сепаратора в зависимости от количества витков от 2,9% до 8,1%. Наблюдалось снижение производительности сепаратора по сравнению со стандартным сепаратором от 9,1% до 20% при максимальной подаче продукта. При этом производительность сепаратора с винтовым органом в зависимости от конструкции винтового рабочего органа по сравнению с производительностью дробилки снижается и составляет от 0,2% до 14,7%. Повысилась эффективность очистки зерна перед измельчением от металломагнитных примесей до 98,8%.

5. Результаты многофакторного исследования позволили получить уравнение регрессии и математическую модель процесса очистки зерна перед измельчением в пневмосепараторе молотковой дробилки. На основе регрессионной модели определены рациональные значения конструктивно-режимных параметров пневмосепаратора: шаг витков — 52,6 мм, высота осадительной камеры для минеральных примесей — 43,72 мм, подача материала — 2808 кг/ч. Математическая модель позволила оценить эффективность разделения зерна от минеральных и металломагнитных примесей до 98%.

6. Результаты экспериментально-производственных испытаний подтверждают, что установка пневмосепаратора с винтовым рабочим органом позволила повысить эффективность очистки зерна от минеральных и металломагнитных примесей до 98%. При этом средняя производительность установки составила 810 кг/ч.

5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ПНЕВМОСЕПАРАТОРА МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Расчет технико-экономических показателей пневмосепаратора с винтовым рабочим органом молотковой дробилки проводился по ГОСТ Р 53056-2008 [33].

Прямые эксплуатационные расходы на единицу выработки рассчитываются по следующей формуле (5.1):

$$Z_{\text{экспл}} = Z_{\text{опл.тр.}} + Z_{\text{энерг}} + Z_{\text{рем}} + Z_{\text{аморт}}, \quad (5.1)$$

где $Z_{\text{опл.тр.}}$ – затраты на оплату труда обслуживающего персонала, руб/т;

$Z_{\text{энерг}}$ – затраты на электроэнергию, руб/т;

$Z_{\text{рем}}$ – затраты на проведение ремонтов и ТО, руб/т;

$Z_{\text{аморт}}$ – затраты на амортизационные отчисления, руб/т.

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала можно рассчитать по следующей формуле (5.2):

$$Z_{\text{опл.тр.}} = \frac{1}{P_{\text{см}}} * L * O * K_{\text{нач}}, \quad (5.2)$$

Где L – численность обслуживающего персонала, $L = 1,0$ чел;

$P_{\text{см}}$ – сменная производительность машины, $P_{\text{см}} = 0,9$ т/ч;

O – оплата труда обслуживающего персонала, $O = 75,5$ руб/ч;

$K_{\text{нач}}$ – коэффициент начислений, учитывающий доплаты, премии, надбавки и социальные выплаты, $K_{\text{нач}} = 1,2$.

Затраты на электроэнергию при эксплуатации пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором, оснащённым винтовым рабочим органом, рассчитываются по формуле (5.3):

$$Z_{\text{энерг}} = q * Ц, \quad (5.3)$$

Где q – удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т;

$Ц$ – тариф стоимости электроэнергии, $Ц = 7,85$ руб/кВт*ч.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание при эксплуатации пневматической молотковой дробилки с пневмосепаратором, оснащённым винтовым рабочим органом, определяются по формуле (5.4):

$$З_{\text{рем}} = \frac{Ц_{\text{сеп}} * г_{\text{рем}}}{П_{\text{экспл}} * Т_{\text{загр}}}, \quad (5.4)$$

где $Ц_{\text{сеп}}$ – цена пневмосепаратора без учета налога на добавленную стоимость, руб;

$г_{\text{рем}}$ - коэффициент отчислений на ремонт и техническое обслуживание техники, $г_{\text{рем}} = 0,13$;

$П_{\text{экспл}}$ – эксплуатационная производительность пневмосепаратора в час, т/ч;

$Т_{\text{загр}}$ – годовое фактическое время работы (загрузка) пневмосепаратора, ч.

Балансовую стоимость пневмосепаратора рассчитаем по формуле (5.5):

$$С_{\text{бал}} = С_{\text{мат}} + С_{\text{з.п.}} + С_{\text{общ}}, \quad (5.5)$$

где $С_{\text{мат}}$ – стоимость расходных материалов и комплектующих деталей, используемых при производстве пневмосепаратора, руб.;

$С_{\text{з.п.}}$ – зарплата работников производства с учетом обязательных страховых взносов, руб.;

$С_{\text{общ}}$ – накладные производственные расходы предприятия, руб.

Затраты на материалы, использованные при создании пневмосепаратора с винтовым рабочим органом для молотковой дробилки ДПМ-11, представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.2 содержит расчет затрат на заработную плату сотрудникам с учетом всех установленных отчислений ($С_{\text{з.п.}}$).

Таблица 5.1 – Смета затрат на материалы и комплектующие изделия

Наименование материала, изделия	Кол-во	Цена за ед., руб.	Стоимость, руб.
Пластик для 3D принтера PLA UNID, 800 гр, 1.75 мм	1	1009	1009

Лист металлический холоднокатанный 250*500, 2 мм	2	496	992
Электрод сварочный, кг	0,8	200	200
Лента уплотнительная Момент 12 м	1	118	118
Ферритовый магнит кольцо, шт	3	28	84
Всего	-	-	2403

Таблица 5.2 – Смета расходов на заработную плату сотрудникам с учетом всех установленных отчислений

Виды работ	Разряд	Трудоемкость, ч	Тарифная ставка, руб./ч	Стоимость, руб.
Токарные	4	1	162,67	162,67
Слесарные	4	4	162,67	650,68
Сварочные	4	2	162,67	325,34
Итого	-	-	-	1138,69
Отчисления на социальные нужды (30%)	-	-	-	341,61
Всего	-	-	-	1480,3

Общепроизводственные расходы $C_{\text{общ}}$ принимаются равными 4% от фонда зарплаты с налоговыми отчислениями, то есть $C_{\text{общ}}=59,21$ руб.

Амортизационные затраты при эксплуатации оборудования определяются по формуле (5.6):

$$Z_{\text{аморт}} = \frac{C_{\text{сеп}} * a}{P_{\text{экспл}} * T_{\text{загр}}}, \quad (5.6)$$

где a – норма амортизации, $a=0,167$.

В процессе эксплуатации молотковых дробилок зерна возникают затраты на техническое обслуживание и ремонт. На базовой модели дробилки ДПМ-11 требуется замена молотков после переработки 400 тонн зерна. В новой версии дробилки ресурс молотков увеличен в 2,3 раза за счёт повышения эффективности отделения зерна от минеральных и

металлических примесей. Кроме того, при использовании ДПМ-11 необходимо заменять сепарирующие решёта в дробильной камере как минимум два раза в год. В новой версии дробилки решёта не требуют замены. Таким образом, затраты на техническое обслуживание и ремонт дробилки ДПМ-11, приходящиеся на одну тонну измельчённого зерна, определяются по следующей формуле (5.7):

$$З_{\text{ДПМ-11}} = \left(\frac{N_{\text{зон.год}}}{P_{\text{мол}}} * M * C_{\text{мол}} + C_{\text{реш}} * K_{\text{реш}} \right) / N_{\text{зон.год}}, \quad (5.7)$$

где $P_{\text{мол}}$ - ресурс молотков в базовой дробилке, т;

M – количество молотков в дробилке, шт;

$C_{\text{мол}}$ – стоимость молотков, руб/шт;

$C_{\text{реш}}$ – стоимость решет, руб;

$K_{\text{реш}}$ – количество замен решет в течение года.

Годовая экономия определится по формуле (5.8):

$$Э_{\text{год}} = З_{\text{экспл.баз}} * N_{\text{зон.год}} * (1 + 0,07) - З_{\text{экспл.нов.}} * N_{\text{зон.год}}, \quad (5.8)$$

Следующим критерием технико-экономической оценки новой дробилки является годовой экономический эффект, который рассчитывается по следующей формуле (5.9):

$$Э' = Э_{\text{год}} - E_{\text{н}} * (C_{\text{н}} - C_{\text{б}}), \quad (5.9)$$

где $E_{\text{н}}$ = коэффициент экономической эффективности, $E_{\text{н}}=0,25$.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений пневмосепаратора $T_{\text{ок}}$, выраженный в годах, рассчитывается по формуле (5.10):

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{б}}}{Э_{\text{год}}}, \quad (5.10)$$

Итоги расчётов экономических показателей для базового варианта и варианта с установленным пневмосепаратором с винтовым рабочим органом представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчетов экономических показателей по базовому варианту и варианту с применением пневмосепаратора с винтовым рабочим органом.

Состав технологической линии	Цена техники, руб.	Число обслуживающего персонала	Производительно сть, т		Расход электроэнергии, кВт*ч/т	Структура совокупных затрат, руб./т					Годовой экономический эффект, руб.
			Сменная	Эксплуатационная		В том числе прямые эксплуатационные затраты, руб.				Всего, руб.	
Зарплату	Электроэнергию	Ремонт и ТО	Амортизацию								
Базовый вариант											
Базовый пневмосепаратор	8770,00	1	1,1	1,1	11,2	82,36	87,92	12,4	3,34	186,02	-
Экспериментальный вариант											
Пневмосепаратор с винтовым рабочим органом	3942,51	1	0,9	0,9	8,63	100,67	67,74	8,87	1,5	178,78	12148

В таблице 5.4 приведены показатели сравнительной экономической эффективности базового варианта и варианта, предусматривающего применение пневмосепаратора с винтовым рабочим органом.

Таблица 5.4 - Показатели сравнительной экономической эффективности
базового варианта и варианта с внедрением пневмосепаратора, оснащённого
винтовым рабочим органом

Наименование показателя	Значение показателя по сравниваемым вариантам	
	Базовый пневмосепаратор	Пневмосепаратор с винтовым рабочим органом
Объем переработанной продукции, т	504	
Затраты средств на оплату труда, руб.	82,36	100,67
Затраты средств на электроэнергию, руб.	87,92	67,74
Затраты средств на ремонт и ТО, руб.	12,4	8,87
Затраты средств на амортизацию, руб.	3,34	1,5
Итого: прямые эксплуатационные затраты денежных средств, руб.	186,02	178,78
Итого: совокупные затраты денежных средств, руб.	186,02	178,78
Капитальные вложения, руб.	8770,00	3942,51
Годовой экономический эффект, руб.	-	12148
Срок окупаемости, лет	-	0,4

В ходе производственных испытаний на агропромышленном предприятии АО «Чкаловское» был достигнут годовой экономический эффект в размере 12 148 рублей. Это стало возможным благодаря снижению расходов на электроэнергию на 23% и уменьшению затрат, связанных с ремонтом и техническим обслуживанием молотковой дробилки ДПМ-11, на 28,5%. Срок окупаемости внедрения пневмосепаратора с винтовым рабочим органом составил 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 было предложена конструкция пневмосепаратора с винтовым рабочим органом для молотковой дробилки с пневматической подачей зерна.

2. Разработана математическая модель для описания движения частиц в криволинейном и вертикальном сепарирующих каналах. Определены зоны, при которой центробежная сила направляет и организывает траектории движения частиц в зерновом потоке по винтовой траектории. Построены траектории движения зерна, минеральной и металломагнитной примеси.

При увеличении витков винтового рабочего органа от 3 до 6, происходило повышение давления с 106077,61 Па (при 3 витках) и 117180,61 Па (при 6 витках). Скорость воздушного потока также изменилась с 49 м/с до 71 м/с при 3 и 6 витках соответственно. Результаты исследования скорости материальной частицы в воздушном потоке показали что, при возникновения дополнительной центробежной силы, за счет установки винтового рабочего органа, скорость движения зерна увеличилась на 16%, а минеральных примесей на 7%. При этом снижение скорости минеральных примесей относительно скорости зерна связано с дополнительным сопротивлением, возникающим при движении по периферии винтовой поверхности. Разработана математическая модель движения частиц в воздушном потоке в пневмосепараторе с поправочным коэффициентом Δ .

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \right) = 0, \\ p \left(\frac{\partial v_k}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) = \Delta p G_k - \Delta \frac{\partial p}{\partial k} + 2\Delta \frac{\partial}{\partial k} \left(\mu \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \Delta \frac{\partial}{\partial l} \left[\mu \left(\frac{\partial v_l}{\partial k} + \frac{\partial v_k}{\partial l} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial k} \mu \theta, \end{cases}$$

Введённый коэффициент Δ позволяет с относительной погрешностью в 4,17% определить положение точки в пространстве при движении по

винтовой траектории в сепараторе.

3. Разработана принципиальная схема пневмосепарирующего устройства с винтовым рабочим органом, встроенного на крышке молотковой дробилки с пневматической загрузкой зерна. Результаты исследования эффективности очистки зерна от металломагнитных примесей в зависимости от количества витков винтового рабочего органа и подачи зерновой смеси показали, что придание зерновой смеси винтовой траектории движения повышает время контакта металломагнитных примесей с магнитами. Эффективность очистки зерна перед измельчением от металломагнитных примесей достигает 98,8%.

В результате выполненных исследований технико-энергетических характеристик пневмосепаратора молотковой дробилки определено незначительное влияние установки винтового рабочего органа отличающегося количеством витков, а именно наблюдается понижение производительности сепаратора по отношению к стандартному сепаратору от 9,1 % до 20% при максимальной подаче продукта, при этом производительность сепаратора с винтовым органом в зависимости от конструкции винтового рабочего органа по отношению к производительности дробилке снижается и составит 0,2 - 14,7%. Удельный расход энергии при установке винтового рабочего органа по отношению к значениям расхода энергии стандартного сепаратора увеличился в зависимости от количества витков от 2,9% до 8,1%.

В результате экспериментальных исследований получены регрессионная и математическая модели для оценки эффективности выделения примесей пневмосепаратором с винтовым рабочим органом. На основе этих моделей определены рациональные значения конструктивно-режимных технологических параметров пневмосепаратора, режимы которых обеспечивают очистку зерна от примесей до 98%: 1) шаг витков 52,6 мм; 2) высота осадительной камеры для крупных примесей 43,72мм; 3) подача материала 2808 кг/ч.

4. Результаты производственных испытаний пневмосепаратора с винтовым рабочим органом с рациональными конструктивно-технологическими параметрами в производственных условиях АО «Чкаловское» показали, что производительность составила 810 кг/ч и эффективность очистки зерна от примесей до 98%.

Реализация выполненных исследований в производственных условиях обеспечило решение проблемы эффективности разделения зерна от минеральных и металломагнитных примесей перед измельчением и позволило повысить эксплуатационный ресурс молотков дробилки в 2,3 раза, снизить затраты энергопотребления на измельчение на 23%. Расчетный годовой экономический эффект от использования данного усовершенствованного аппарата составит 12148 рублей и срок окупаемости 0,4 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеенко А.П. Основы научных исследований : учебное пособие / составители А. П. Авдеенко [и др.]. — Персиановский : Донской ГАУ.- 2018. — 184 с.
2. Альшинаийин Х. Д. Д. Предварительная очистка зерна с помощью машины С.SAS-013 / Х. Д. Д. Альшинаийин, И. А. Х. Хуссейн, // Эколого-генетические основы селекции и возделывания сельскохозяйственных культур : материалы Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых по эколого-генетическим основам растениеводства, Краснодар, 24–27 мая 2022 года. – Краснодар: Издательство «ЭДВИ». - 2022. – С. 29-32.
3. Андержанова Н. Н. Обзор конструктивно-технологических схем молотковых дробилок зерна// Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Йошкар-Ола. - 2019. - С. 506.
4. Архипов В. А. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде : учебное пособие / В. А. Архипов, А. С. Усанина. — Томск : ТГУ. - 2014. — 252 с.
5. Аскарлов А.Д. Математическое описание процесса очистки зерна на экспериментальной установке / А. Д. Аскарлов, Е. Б. Медведков, А. Е. Кайрбаева, Г. Ш. Насруллин // Вестник Алматинского технологического университета. – 2022. – № 1. – С. 10-17.
6. Аульченко С.М. Динамика материальной точки : Учебное пособие / С. М. Аульченко, А. А. Белкин, А. В. Болеста [и др.] ; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); под редакцией В. Я. Рудяка. – Новосибирск : Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). - 2016. – 72 с.

7. Афанасьев В.А. Теория и практика специальной обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов / В.А. Афанасьев. – Воронеж: ВГУ. – 2014. – 296 с.
8. Бадретдинов И. Д. Научное обоснование и совершенствование пневматических систем сельскохозяйственных машин на основе моделирования технологического процесса / И. Д. Бадретдинов, С. Г. Мударисов // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 9(100). – С. 5-16.
9. Баранов Н. Ф. Пневмосепаратор фуражного зерна/ Н.Ф. Баранов, С.Ю. Булатов, А.Г. Сергеев// Тракторы и сельхозмашины. - 2010. - №1. - С. 25-26.
10. Баранов Н.Ф., Бажин А.А., Булатов С.Ю., Зыкин А.А. Оценка эффективности работы пневмосепаратора при выделении мелких примесей // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Киров. - 2009. - С 15-20.
11. Бегунов М. А. Экспериментальные исследования пневматического сепаратора с пассивной декой / М. А. Бегунов // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2023. – № 2(33). – С. 46-48.
12. Бегунов М.А. Исследования пневматического конического сепаратора / М. А. Бегунов, А. В. Черняков, В. С. Коваль, Д. Н. Коростелев // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2024. – № 2(54). – С. 139-145.
13. Бец А. К. Механизация приготовления кормов на малых фермах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2003. - № 1 (9). - С. 46–48.
14. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. Учебное пособие. Тамбов: изд-во Тамбовского Государственного Технического Университета. - 2014. - 75 с.
15. Булатов С. Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса

кормоприготовительных машин// Пермский аграрный вестник. - 2017. - №1 (17). - С. 55-64.

16. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н. Результаты исследований рабочего процесса пневмосепаратора фуражного зерна// Вестник ВНИИМЖ. - 2012. - №3 (7). - С. 78-87.

17. Бурков А. И. Результаты приемочных испытаний сепаратора пневматического фракционного СП-2Ф / А. И. Бурков, В. А. Лазыкин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2016. – № 5(54). – С. 73-78.

18. Вараксин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / А. Ю. Вараксин. – Москва : ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература". - 2003. – 185 с.

19. Волков К. Н. Течения газа с частицами / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ. - 2008. — 600 с.

20. Галлагер Ричард. Метод конечных элементов : основы; перевод с английского В. М. Картвелишвили ; под ред. Н. В. Баничука. Москва : Мир. - 1984. - 428 с.

21. Гафин М.М. Способы существующих технологий оборудования для очистки зерна/ М.М. Гафин// Наука в современных условиях: От идеи до внедрения. – Ульяновск. – 2010. - С. – 127-130.

22. Глазков В.В. Динамика многофазных сред: Учебное пособие. – СПб: Изд-во «Лань». – 2022. – 168 с.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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. – Минск. - 2021. – С. 30-36.

28. 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 : сб. тез. Всерос. (с междунар. уч.). науч.-практ. интернет-конф. преп., мол. уч. и студ. – Новосибирск. - 2023. - №1. – С. 43-45.

29. 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. - Новосибирск. – 2022. – С.518-520.

30. Голиков А.И. Теоретическое исследование движения воздушного потока в сепараторе пневматической молотковой дробилки / А.И. Голиков, А.А. Мезенов // Вестник Брянской ГСХА. – В печати.

31. 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). - IDA [article ID]: 2082504053.

32. 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.

33. ГОСТ Р 53056-2008. Методы экономической оценки.

34. ГОСТ Р 53900-2010. Ячмень кормовой. Технические условия.

35. Григорьев А.А. Пневмокласификатор по очистке от примесей зерновых культур по Республике Саха (Якутия) / А. А. Григорьев, В. И. Кузьмин, А. С. Степанова [и др.] // Устойчивое развитие сельского хозяйства и агросистем будущего в Арктике: Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции в рамках «Северного форума – 2022», Якутск, 30 ноября 2022 года. – Новокузнецк: Издательство "Знание-М". - 2022. – С. 139-143.

36. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. М.: «Машиностроение». – 1972. - 184с.

37. Груздев И.Э. Теория шнековых устройств/ И.Э. Груздев, Р.Г. Мирзоев, В.И. Янков. - Ленинград : Изд-во ЛГУ. - 1978. - 142 с.

38. Губайдуллин А. А. Введение в механику сплошной среды : учебное пособие / А. А. Губайдуллин. — Тюмень : ТюмГУ. - 2020. — 207 с.

39. Дринча В.М. Проблемы и перспективы совершенствования процессов пневмосепарации зерна / В. М. Дринча, Ю. Ж. Дондоков, И. Н. Аммосов, Н. Е. Слепцов // Вестник АГАТУ. – 2023. – № 4(12). – С. 92-101.

40. Дробилки молотковые однороторные. Технические условия: ГОСТ 7090-72.

41. Ермаков А. И. Исследование работы аспирационной системы универсальной зерноочистительной машины МУЗ-16 / А. И. Ермаков, В. В. Литвяк, Ю. Ф. Росляков // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2024. – № 2. – С. 252-259.

42. Ермаков А. И. Совершенствование аспирационной системы зерноочистительной машины / А. И. Ермаков, С. А. Зеленко // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 1(15). – С. 45-51.

43. Жолобов Н.В. Исследование рабочего процесса пневмосепарирующего канала/ Н.В. Жолобов, Б.Ю. Блинов// Улучшение эксплуатационных показателей мобильной энергетики. - Киров. - 2007. - С. 88-92.

44. Зенькова Н.Н. Практическое руководство по использованию кормовых ресурсов в кормопроизводстве: практическое руководство/ Н.Н. Зенькова. – Витебск: ВГАВМ. – 2021. – 176 с.

45. Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержание мелких зёрен и крупности; содержание зёрен пшеницы, повреждённые клопом черепашкой; содержание металломагнитной примеси: ГОСТ 30483 – 97.

46. Зерно. Правила приемки и методы отбора проб: ГОСТ 13586.3-2015.

47. Зиганшин Б. Г. Анализ существующих конструкций пневмосепарирующих машин / Б. Г. Зиганшин, А. А. Федоренко, М. Д. Кононов // Современные достижения аграрной науки : Научные труды

всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Хазипа Сабировича, Казань, 26 февраля 2021 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный аграрный университет. - 2021. – С. 77-83.

48. Зубков В.Е. Аналитический обзор устройств для сепарации зерновых, зернобобовых и технических культур / В. Е. Зубков, И. А. Тарабановская, А. В. Боярский, К. А. Папченко // Интеграция образования, науки и практики в АПК: проблемы и перспективы : Сборник материалов III международной научно-практической конференции, Луганск, 23–24 ноября 2023 года. – Луганск: Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова. - 2023. – С. 263-264.

49. Ильина Л. П. Исследование очистки зерна от примесей / Л. П. Ильина, А. М. Харламов // Ларионовские чтения-2023 : Сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции: в 2-х частях, Якутск, 17 февраля 2023 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ. - 2023. – С. 185-189.

50. Казаровец Н.В. Производственные технологии заготовки и использования кормов: учеб.-метод. Пособие/ Н.В. Казаровец, П.П. Ракецкий, В.И. Сапего, В.А. Люндышев. – Минск: БГАТУ. – 2009. – 120 с.

51. Киселев Л.Ю. Основы технологии производства и первичной обработки продукции животноводства: учебн. пособие/ Л.Ю. Киселев, Ю.И. Забудский, А.П. Голикова, Н.А. Федосеева, изд-во «ЛАНЬ». – 2021. – 448 с.

52. Князева Т.В. Кормопроизводство: метод. Рекомендации/ Т.В. Князева, В.С. Ульянов. – Краснодар: КубГАУ. – 2016. – 56 с.

53. Коваль В.С. Экспериментальное исследование работы сепаратора зерна с решетками повышенной ориентирующей способности/ В.С. Коваль,

А.В. Черняков, А.П. Шевченко, М.А. Бегунов //Вестник Омского ГАУ. - 2020. - №3 (39). - С. 66-72.

54. Коломейченко В. В. Кормопроизводство. Учебник. М.: Лань. - 2021. - 660 с.

55. Кольга Д.Ф. Машины и оборудование в животноводстве: учеб. пособие/ Д.Ф. Кольга. - Минск : РИПО. - 2020. - 310 с

56. Комбикорма гранулированные. Общие технические условия: ГОСТ Р 51899-2002.

57. Коростелев Д.Н. Пневмосепаратор с вертикальным воздушным потоком / Д. Н. Коростелев, А. В. Черняков, М. А. Бегунов, В. С. Коваль // Современное научное знание в условиях системных изменений : Материалы Шестой Национальной научно-практической конференции, Тара, 08–09 июня 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. - 2022. – С. 77-81.

58. Кузнецов А.Ф. Крупный рогатый скот. Содержание, кормление, разведение: учеб. пособие/ А.Ф. Кузнецов, В.Г. Тюрин, В.Г. Семенов и др.: изд-во «ЛАНЬ». – 2021. – 300 с.

59. Кузнецов В. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров сепаратора предварительной очистки зерна для хозяйств ЦЧР/ В.В. Кузнецов, С.В. Лебедев // Вестник ВГАУ. - 2006. - №13. - С. 102-112.

60. Кулаковский И.В. Машины и оборудование для приготовления кормов: Справочник/ И.В. Кулаковский, Ф.С. Кирпичников, Е.И. Резник. - М.: Россельхозиздат. - 2017. ч.1. - 288 с.

61. Курочкин А. А. Технологическое оборудование для переработки продукции животноводства в 2 ч. Часть 1 : учебник и практикум для вузов 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство Юрайт. - 2024. - 249 с.

62. Курочкин А.А. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств : учебник для вузов 2-е изд., испр. и доп./ А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, А.С. Гордеев, А.И. Завражнов. - Москва : Издательство Юрайт. - 2024. - 586 с.

63. Курочкин А.А. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств. Практикум : учебное пособие для вузов 2-е изд., перераб. и доп./ А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.М. Зимняков, А.В. Поликанов// Москва : Издательство Юрайт. - 2024. - 185 с.

64. Курочкин А.А. Оборудование перерабатывающих производств / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.М. Зимняков: учебник — М. : ИНФРА-М. - 2018. — 363 с.

65. Логачев И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Санкт-Петербург : Химиздат. - 2005. – 659 с.

66. Малюта С. И. Перспективные конструкции пневматических сепараторов для предварительной очистки зерна / С. И. Малюта, К. С. Малюта // Современные проблемы и пути развития перерабатывающей отрасли и сферы услуг : МатериалыII Всероссийской научно-практической конференции, Мелитополь, 06–07 декабря 2023 года. – Мелитополь: Мелитопольский государственный университет. - 2023. – С. 52-54.

67. Матвиенко О.В. Введение в механику многофазных сред/ О.В. Матвиенко. – Томск: Издательский Дом Томского госуд. ун-та. – 2018. – 64 с.

68. Машкова Н.В. Тенденции совершенствования пневматических молотковых дробилок/ Н.В. Машкова, Е.А. Пшенов// Теория и практика современной аграрной науки: сборник IV национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. – Новосибирск. – 2021. – С. 516-521.

69. Мекшун А. Ю. Совершенствование технологического процесса подготовки зерна к помолу / А. Ю. Мекшун // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи : Сборник статей по материалам XII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 125-летию Т.С. Мальцева, Курган, 06 ноября 2020 года / Под общей редакцией И.Н. Миколайчика. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева. – 2020. – С. 50-54.

70. Михайлов Е. В. Усовершенствование пневмосепарационной камеры пневморешётного сепаратора / Е. В. Михайлов, Н. А. Задосная, М. Н. Жолудь // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Мелитополь, 21–22 февраля 2024 года. – Мелитополь: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Мелитопольский государственный университет". - 2024. – С. 375-377.

71. Мишуров Н.П. Технологии и оборудование для производства комбикормов в хозяйствах: справочник/ Н.П. Мишуров, изд-во ФГНУ «Росинформагротех». – 2012. – 204 с.

72. Невзоров В. Н. Разработка нового технологического оборудования для очистки зерна / В. Н. Невзоров, В. А. Самойлов, А. И. Ярум // Мичуринский агрономический вестник. – 2015. – № 1. – С. 71-76.

73. Некрашевич В. Ф. Очистка фуражного зерна / В. Ф. Некрашевич, Д. А. Епифанцев, А. Ф. Слабиков // Сельский механизатор. – 2010. – № 10. – С. 4.

74. Новиков И. О. Особенности аэродинамических сепараторов / И. О. Новиков // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы : Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции, Пенза, 24–25 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. - 2022. – С. 613-616.

75. Носырев Д. Я. Методология инженерной и научной работы : учебное пособие / Д. Я. Носырев, В. А. Четвергов, Е. А. Скачкова. — Самара : СамГУПС. - 2005. — 140 с.

76. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Текст]: указ Президента РФ от 28 февраля 2024 г. №145 // Собр. Законодательства РФ. – 2024. – 28 февр. – С. 28.

77. Павленкова Т.В. Кормопроизводство: учебное пособие по дисциплине «кормопроизводство с основами ботаники» для студентов

направления 35.03.07 «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции» / Т. В.Павленкова, В. В. Чулкова.– Екатеринбург: Издательство Уральского ГАУ. - 2023. – 124 с.

78. Павлюченко К. В. Экспериментальное исследование пневматического сепаратора зерна с наклонным воздушным потоком // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ.2016. - №3(6). - 15 с.

79. Парахин Н. В. Кормопроизводство : учебник / Н. В. Парахин – М. : БИБКОВ, ТРАНСЛОГ. - 2015. – 384 с.

80. Пат. №139816 РФ МПК В07В 4/00 Пневматический сепаратор зерна / П.А. Савинных, В.Н. Нечаев, С.Ю. Булатов. - № 2013146284; заявл. 16.10.2013; опубл. 27.04.2014; Бюл. №12. – 11с.

81. Пат. №211726U1 РФ МПК А01F 12/44 Зерноочистительный магнитный сепаратор/ А.А. Мезенов, А.А. Евдокименко. - №2022108268; заявл. 28.03.2022; опубл. 21.06.2022; Бюл. №18. – 6 с.

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

83. Пат. №2552037 РФ МПК А01F 12/44 Воздушно-шнековое устройство / С.Д. Шепелёв, В.А. Фёдоров, Г.А. Окунев, М.В. Ческидов. - № 2013151781; заявл. 20.11.2013; опубл. 10.06.2015; Бюл. №16. – 6с.

84. Пахомов В.И. Технологии и оборудование для производства комбикормов и премиксов: учеб. пособие / В.И. Пахомов, Д.В. Рудой, С.В. Брагинцев, О.Н. Бахчевников, А.В. Ольшевская; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. – 2019. – 228 с.

85. Пашинова Н. В. Процесс сепарации зерна в вертикальных пневмоканалах воздушных сепараторов. Улан-Удэ: Бурятская ГСХА. - 2023. - 143 с.

86. Пелевин А.Д. Комбикорма и их компоненты / А.Д. Пелевин, Г.А. Пелевина, И.Ю. Венцова. – М.: ДеЛи принт. – 2018. – 519 с.

87. Петров В. И. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств : учебное пособие / В. И. Петров, Д. М. Попов. — Кемерово : КемГУ. - 2013. — 127 с.

88. Петров В.А. Совершенствование процесса очистки зерна от неорганических примесей перед дроблением/ В.А. Петров, Широкобоков В.И.// Научное обеспечение инженерно-технической системы АПК: Проблемы и перспективы: Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 60-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин агроинженерного факультета, 90-летию доктора химических наук, профессора, заслуженного деятеля науки УР Г. А. Кораблева и 85-летию кандидата технических наук, профессора, заслуженного работника сельского хозяйства УР, почетного работника высшего профессионального образования РФ Б. Д. Зонова. – Ижевск. – 2020. - С. – 236-242.

89. Пивень В. В. Основные тенденции совершенствования фракционных технологий очистки зерна / В. В. Пивень, О. Л. Уманская // Проблемы современной науки и образования. – 2013. – № 1(15). – С. 39-42.

90. Пилипюк В. Л. Технология хранения зерна и семян : учебное пособие / В. Л. Пилипюк. — Москва : Вузовский учебник. - 2010. — 437 с.

91. Руденко В. В. Анализ конструкций пневмосепарирующих систем / В. В. Руденко, Д. В. Щаев // Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса : Сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 05 июня 2024 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга". - 2024. – С. 97-100.

92. Савиных П. А. Перспективные технологии и технические средства для обработки зерна / П. А. Савиных, Ю. В. Сычугов, В. А. Казаков // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 3(273). – С. 22-26.

93. Савиных П.А. Разработка и исследование машины для воздушной очистки семян трав и зерна / П. А. Савиных, Ю. В. Сычугов, В. А. Казаков, Б. Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16, № 1(61). – С. 84-89.

94. Садов В.В. Производство комбикормов в хозяйственных условиях: учеб. пособие/ В.В. Садов. – Барнаул: изд-во АГАУ. – 2019. – 96 с.

95. Саитов В. Е. Исследование процессов в рабочих органах сепараторов зерна/ В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Международный журнал экспериментального образования. - 2012. - №11. - С. 39-40.

96. Саитов В. Е. Пневмоинерционный малогабаритный сепаратор вторичной очистки зерна / В. Е. Саитов, В. Г. Фарафонов, Е. В. Гукасова // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», Киров, 05 февраля 2024 года. – Киров: Вятский государственный агротехнологический университет. - 2024. – С. 120-125.

97. Самойлов В.А. Новое оборудование для переработки зерновых культур в пищевые продукты./В.А. Самойлов, А.И. Ярум, В.Н. Невзоров, Д.В. Салыхов// Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск. - 2017. - 198 с.

98. Степанов Д. В. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств : учебное пособие / Д. В. Степанов, Р. Е. Олейникова. — Керчь : КГМТУ. - 2021. — 40 с.

99. Счетчик электрической энергии трехфазный статический «Меркурий 230». Руководство по эксплуатации. – Москва. – 2020. – 44 с.

100. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах/ В.И. Сыроватка.– М.: ГНУ ВНИИМЖ. – 2011. – 248 с.

101. Сысуев В. А. Повышение эффективности работы зерноочистительной машины МЗ У-20д / В. А. Сысуев, Ю. В. Сычугов, В. А. Казаков // Сельский механизатор. – 2023. – № 12. – С. 4-7.

102. Телятников С. О. Экспериментальное исследование сепаратора с вертикальным воздушным потоком / С. О. Телятников, В. В. Шишкин // Студенческая наука об актуальных проблемах и перспективах

инновационного развития регионального АПК : Материалы XVII научно-практической конференции обучающихся, Тара, 29 марта 2018 года. – Тара: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. - 2018. – С. 55-59.

103. Трухачев В. И. Техника и технологии в животноводстве : учебное пособие / В. И. Трухачев, И. В. Атанов, И. В. Капустин, Д. И. Грицай. – Ставрополь. – изд-во «АГРУС» Ставропольского гос. аграрного ун-та . - 2015. - 404 с.

104. Туров А. К. Обоснование параметров центробежного пневмосепаратора/ А.К. Туров, А.А. Мезенов//Актуальные проблемы научно-технического обеспечения процессов и производств в АПК. - Новосибирск. - 2016. - С. 146-149.

105. Уваров Г. И. Кормопроизводство : практикум / Г. И. Уваров, А. Г. Демидова. – М. : БИБКОВ. - 2014. – 304 с.

106. Урханов Н. А. О результатах НИР, разработки и применения технологии и средств обработки зерна в Забайкалье / Н. А. Урханов, А. А. Абидуев, А. С. Бужгеев // Вестник ВСГУТУ. – 2017. – № 2(65). – С. 59-63.

107. Федоренко А. А. Пневматический сепаратор с кулачковым активатором потока зернового вороха / А. А. Федоренко, М. Д. Кононов, Б. Г. Зиганшин // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Пенза, 24–26 марта 2021 года. Том IV. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. - 2021. – С. 282-285.

108. Федоренко А. С. Параметры сепаратора для очистки фуражного зерна от крупных примесей: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Барнаул. - 2014. - 23 с.

109. Федоренко И. Я. Компьютерное моделирование процесса сепарирования зернового вороха в вертикальном воздушном потоке / И. Я. Федоренко // Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы,

достижения, перспективы : Материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию освоения целинных и залежных земель в Алтайском крае, Барнаул, 22–23 октября 2024 года. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. - 2024. – С. 28-33.

110. Федоров О. С. Повышение эффективности функционирования молотковой дробилки путем совершенствования способа сепарации: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары. - 2010. - 23 с

111. Федотов А. И. Основы научных исследований : учебное пособие / А. И. Федотов. — Иркутск : ИРНИТУ. - 2017. — 142 с.

112. Хололенко А. А. Исследование пневматического сепаратора зерна с Х-образным воздушным каналом / А. А. Хололенко // Студенческая наука об актуальных проблемах и перспективах инновационного развития регионального АПК : Материалы XVIII научно-практической конференции обучающихся, Омск, 28 марта 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. - 2019. – С. 44-49.

113. Чеботарев В. П. Обоснование и расчет параметров универсальной зерноочистительной машины / В. П. Чеботарев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 135-139.

114. Черняев Н. П. Технология комбикормового производства. – М.: Агропромиздат. - 2015. – 256 с.

115. Черняков А.В. Исследование работы пневматической машины для очистки зерна / А. В. Черняков, М. А. Бегунов, В. С. Коваль, Д. Н. Коростелев // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2(46). – С. 167-174.

116. Черняков А.В. Исследование сепаратора с горизонтальным воздушным потоком / А. В. Черняков, В. С. Коваль, М. А. Бегунов, А. В. Евченко // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2021. – № 3(43). – С. 145-154.

117. Ческидов М. В. Обоснование параметров конструкции и режима работы воздушно-шнекового сепаратора для очистки зерна: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Троицк. - 2020. - 24 с.

118. Шиндяпин Г.П. Математическое моделирование в задачах динамики многофазных сред : для студентов механико-математического факультета / Г. П. Шиндяпин, А. Д. Ковалев// Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского. Краевые задачи взаимодействия ударных волн. — Саратов : Изд-во Саратовского ун-та. - 1990. — 106 с.

119. Щурин К. В. Планирование и организация эксперимента : учебное пособие для вузов / К. В. Щурин, Е. К. Волкова. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань. - 2025. — 336 с.

120. Яблоков А. Е. Научные основы проектирования и конструирования машин и аппаратов зерноперерабатывающих предприятий : монография / А. Е. Яблоков. — Москва : МГУПП. - 2021. — 164 с.

121. A. Petre, A.I. Grigore, N. Vanghele, B. Mihalache. Research on grain seed impurities cleaning equipment, Lozenec, Bulgaria, 12-15 June 2019 // Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences, Proceedings of the Sixth International Conference. – 2019. – 1. – P. 416-421.

122. AFOLABIO. A., EMEKA O. C., GIFT O. A., FAITH A., ADENIYI O. T.. Design, development & evaluation of a pneumatic cum eccentric drive grain cleaning machine: a response surface analysis // In Asian Journal of Scientific Research. – 2019. – 12. – P. 462–471.

123. Aluko O. B., Sanni L. A., Akingbade T. O., Ogundahunsi Oluwafemi. Effects of impurity on the efficiency of a legume threshing machine // Agricultural research. – 2020. – 16(12). – P. 1700-1709.

124. Bowser TJ. Mechanical separation design. In: Handbook of Food Process Design. Ahmed J, Rahman MS (Eds). - Wiley-Blackwell. - Oxford UK. - 2012.

125. Carmen Brăcăcescu, Ioan Țenu, Costin Mircea, George Bunduchi. Experimental research on influence of functional parameters of combined

installations designed at separating the impurities out of cereal seeds // 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development. – 112. – 2019. – P. 9.

126. Carmen Bracacescu, Paul Gageanu, George Bunduchi, Alexandru Zaica. Considerations on technical equipment used for cleaning and sorting seed mixtures based on aerodynamic principle // Engineering for rural development. – 2018. – 23. – P. 39-44.

127. Costin Mircea, Florin Nenciu, Constantin Stan, Lavinia Berca. Considerations for the use of magnetic properties to separate grains // Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest, Romania, 6-8 October 2022. – 2022. – 25. – P. 510-515.

128. Dariusz Jan Choszcz ,Patrycjusz Sebastian Reszczyński, Ewelina Kolankowska,Stanisław Konopka, Adam Lipiński. The Effect of Selected Factors on Separation Efficiency in a Pneumatic Conical Separator // Sustainability. – 2020. – 12(7). – P. 12.

129. Fahad A. H. Alwagie, Yasir H. S. Mohamed, Elnougomi A. O. Mussad. Design, Fabrication and Performance Evaluation of Wheat Grain Cleaner for Small-Scale Farmers // Humanities & Natural Sciences Journal. – 5(9). – 2024. – P. 19-26.

130. Farid G. Sayyad, Harish Kumar Sharma, Navneet Kumar. Cleaning and Separation // Agro-Processing and Food Engineering. – 2022. – P. 307-352.

131. Healy B.J. Optimum particle size of corn and hard soft sorghum for nursery pigs/ B.J. Healy, J.D. Hancock, G.A. Kennedy. – Journal of Animal Science, №72 (9). – 2014. – 2227-2236 p.

132. Ibragim Umbarov, Furqat Karimov, Zarip Karimov, Mamatqosim Bekkamov, Anvar Ubaydullayev, Erkin Eshkuvatov, Dildora Israilova. Gravity grain cleaning machine and its importance in grain logistics and sustainable agriculture // IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development. – 2024. – 105. – P. 7.

133. Kazakbaev S. Z. Progressive machines for pre-cleaning of grain / S. Z. Kazakbaev, N. S. Karymsakov // Theoretical & Applied Science. – 2022. – No. 5(109). – P. 870-879.
134. Krzysiak Z. Evaluation of Rye Grain Cleaning in a New. Rotary Cleaning Device // Mechanik. – 2013. - 2. – P. 143.
135. Lyu F. Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. Animal Feed Science and Technology/ F. Lyu, M. Thomas, W.H. Hendriks, A.F.B. Van der Poel. - 2020. – 261 p.
136. Mircea C., Nenciu F., Voicu Gh., Dumitru I., Oprescu M. Review of the main equipment used for separating contaminants from wheat seeds, classification according to their functional role // Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre Series. – L. – 2020. – P. 380-385.
137. Mircea Costin, Nenciu Florin, Vlăduț Valentin, Voicu Gheorghe, Gageanu Iuliana, Cujbescu Dan. Increasing the performance of cylindrical separators for cereal cleaning, by using an inner helical coil // Agricultural Engineering. – 62(3). – 2020. – P. 249-258.
138. Mohamed ABU ALI, Eid ABD EL-RAHMAN , Gamal El-Deen NASR. Design and assessment of a small-scale machine for cleaning wheat grains // Acta Technologica Agriculturae. – 2022. – 1. – P. 13-19.
139. Muhammad Dzulkifli, Rozzaq Habib Amrullah, Makbul Hajad. Multiobjective Optimization of Vibro-Pneumatic Separator Using Full Factorial Design // Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021). – 2022. – 19. – P. 380-386.
140. P.F. Mathad, R. Yasmeen, G. Ambrish, U. Nidoni, G. Sudha Devi. Unit Operations in Food Grain Processing // Cleaning and grading. – 2024. – P. 93-128.
141. Paul Greyvensteyn, Ockert Koekemoer, LJ Grobler, Danie Vorster. Design and Testing of a Pneumatic Grain Aspirator for Efficient Separation of

Impurities //Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering. – 2023. – 141. – P. 8.

142. Qiang-long He, Li-juan Cheng, Yong-fu Wu, Xin Guan, Jian-ming Liu. Research progress on grain clearing technology based on aerodynamics // Journal of Shanxi Agricultural Sciences. – 2023. – 51(5). – P. 590-598.

143. Shivaprasad Doddabematti
Prakash, Jared Rivera, Kaliramesh Siliveru. Unit operations in wheat processing // Unit Operations in Food Grain Processing. – 2024. – P. 289-329.

144. Tomasz Gawenda, Agnieszka Surowiak, Agata Stempkowska, Aldona Krawczykowska, Daniel Saramak. Effective Removing of Light Impurities from an Aggregate in SEL Separator // Inżynieria Mineralna — Styczeń – Czerwiec 2021 January – July — Journal of the Polish Mineral Engineering Society. – 2021. – 1(1). – P. 53-60.

145. Uhlarik A., Popov S., Karagić Đ., Ponjičan O., Turan J. Alfalfa Seed Cleaning Using a Magnetic Separator // Process. Energy Agric. – 2018. – 22. – P. 192–195.

146. Zbigniew Krzysiak, Waldemar Samociuk, Janusz Zarajczyk, Karolina Beer-Lech, Grzegorz Bartnik, Zdzisław Kaliniewicz, Dariusz Dziki. Effect of Sieve Unit Inclination Angle in a Rotary Cleaning Device for Barley Grain // American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph. – 63(3). – 2020. – P. 609-618.

147. Zbigniew Krzysiak, Waldemar Samociuk, Janusz Zarajczyk, Zdzisław Kaliniewicz, Daniel Pieniak, Marcin Bogucki. Analysis of the Sieve Unit Inclination Angle in the Cleaning Process of Oat Grain in a Rotary Cleaning Device // Processes. – 346(8). – 2020. – P. 16.

148. Zhao X.M. Research on the new combined type crusher hammer. Applied Mechanics and Materials/ X.M. Zhao, H.T. Zhou, S.F. Rong, B.G. Yang. - 2014. - 1160-1164 pp.

Патент Российской Федерации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 229971

Молотковая дробилка

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)**

Авторы: **Голиков Алексей Игоревич (RU), Мезенов Артем Анатольевич (RU), Голикова Анастасия Алексеевна (RU), Григорев Николай Николаевич (RU)**

Заявка № **2024114690**

Приоритет полезной модели **30 мая 2024 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **06 ноября 2024 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **30 мая 2034 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Координаты точек частиц воздушного потока на винтовой траектории их движения

Координаты движения частиц воздушного потока по винтовому рабочему органу:

3 витка						
	X_T	Y_T	X_ϕ	Y_ϕ	$\Delta X = X_T - X_\phi$	$\Delta, \%$
А	69,62	82,85	68,26	82,85	1,36	1,99
Б	76,82	40,02	74,7	40,02	2,12	2,83
В	105,14	54,37	103,68	54,37	1,46	1,4
Г	137,18	70,65	135,54	70,65	1,64	1,21
Д	164,32	32,74	162,44	32,74	1,88	1,16
Е	197,8	14,97	195,76	14,97	2,04	1,04

4 витка						
	X_T	Y_T	X_ϕ	Y_ϕ	$\Delta X = X_T - X_\phi$	$\Delta, \%$
А	62,88	40,02	60,4	40,02	2,48	4,1
Б	79,34	82,85	77,78	82,85	1,56	2,01
В	108,32	32,74	106,12	32,74	2,2	2,07
Г	118,2	54,37	116,4	54,37	1,8	1,55
Д	148,82	70,65	147,5	70,65	1,32	0,89
Е	196,4	14,97	194,26	14,97	2,14	1,1

6 витков						
	X_T	Y_T	X_ϕ	Y_ϕ	$\Delta X = X_T - X_\phi$	$\Delta, \%$
А	44,42	40,02	42,64	40,02	1,78	4,17
Б	68,68	82,85	66	82,85	2,68	4,06
В	95,72	54,37	93,4	54,37	2,32	2,48
Г	130,36	32,74	126,46	32,74	3,9	3,08
Д	156,66	70,65	152,62	70,65	4,04	2,65
Е	185,3	14,97	181,58	14,97	3,72	2,05

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Экспериментальные значения скорости воздушного потока при помощи анемометра Testo 405i

Результаты измерений скорости воздушного потока на входном патрубке:

	0,5 м	1 м	1,5 м	2 м	2,5 м	3 м	3,5 м	4 м
Базовый	35,6	35,2	34,92	34,73	34,4	34,32	34	33,82
3 витка	21,23	21,03	20,83	20,66	20,46	20,19	19,92	19,47
4 витка	19,94	19,66	19,48	19,13	18,95	18,78	18,54	18,14
6 витков	16,58	16,53	16,19	15,94	15,67	15,45	15,13	14,79

Результаты измерений скорости воздушного потока на выходном патрубке
пневматической молотковой дробилки.

	Скорость воздушного потока на выходном патрубке, V м/с										V _{ср} м/с
Базовый	20,07	20,15	20,2	20,25	20,18	20,17	20,1	20,15	20,18	20,18	20,16
3 витка	20,23	20,28	20,19	20,25	20,26	20,24	20,26	20,28	20,27	20,25	20,25
4 витка	20,18	20,21	20,19	20,22	20	20,15	20,18	20,16	20,15	20,19	20,17
6 витков	20,11	20,12	20,15	20,1	20,09	20,14	20,13	20,12	20,13	20,14	20,12

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований:

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	$\bar{Y}$	$S^2(Y_u)$
1	-1	-1	-1	99,2	98,85	99,14	99,06	0,035
2	-1	-1	+1	98,02	98,15	98,24	98,14	0,012
3	-1	+1	-1	99,2	98,9	98,86	98,99	0,035
4	-1	+1	+1	98,41	98,38	98,52	98,44	0,005
5	+1	-1	-1	98,4	98,2	97,8	98,13	0,093
6	+1	-1	+1	96,8	97,2	96,9	96,97	0,043
7	+1	+1	-1	95,62	95,81	95,66	95,70	0,010
8	+1	+1	+1	95,65	96,9	96,54	96,36	0,414
9	+1	0	0	94,7	95,2	94,8	94,90	0,070
10	-1	0	0	98,81	98,54	98,73	98,69	0,019
11	0	+1	0	97,61	97,43	97,8	97,61	0,034
12	0	-1	0	97,61	97,8	97,84	97,75	0,015
13	0	0	+1	95,6	96,1	95,98	95,89	0,068
14	0	0	-1	98,82	98,75	98,86	98,81	0,003
15	0	0	0	98,04	97,8	97,95	97,93	0,015
$\sum S^2(Y_u)$								0,8727

Рассчитаем дисперсию коэффициентов регрессии, используя формулу:

$$S^2(b_i) = 0,0058/45 = 0,001293$$

Затем определим ошибку коэффициентов регрессии по следующей формуле:

$$S(b_i) = \sqrt{0,001293}=0,0359$$

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии проводится по формуле:

$$\Delta b_i = 2,042*0,0359=0,0734$$

где $t=2,042$ – коэффициент Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 при числе степеней свободы $f=N*(n-1) =30$.

На основе полученного значения вычислим критерий Кохрена по формуле:

$$G_p = \frac{0,093}{0,8727} = 0,107$$

$$\text{Максимальная дисперсия: } S^2_{\max} = S^2_5 = 0,093$$

Определим табличное значение критерия Кохрена. Установим доверительную вероятность $P_G=0,95$. С числом степеней свободы числителя $f_1=2$ и знаменателя $f_2=15$ по таблицам критических значений критерия Кохрена находим: $G_T=0,33$.

Видно, что расчётное значение критерия ($G_p=0,107$) меньше табличного ($G_T=0,33$), значит, дисперсии однородны, а эксперименты воспроизводимы.

Далее рассчитаем коэффициенты уравнения регрессии, используя данные из таблицы

:

$$b_0=97,558$$

$$b_1= -1,126$$

$$b_2=-0,295$$

$$b_3=-0,489$$

$$b_{12} = -0,4088$$

$$b_{13} = 0,1213$$

$$b_{23} = 0,2738$$

$$b_{123} = 0,1813$$

Для оценки статистической значимости коэффициентов уравнения установим доверительную вероятность $P_t=0,95$ и определим число степеней свободы $f = 15 \cdot (3 - 1) = 30$. По таблицам критических значений критерия Стьюдента при заданных параметрах находим критическое значение: $t_T = 2,04$.

Далее рассчитаем значения критерия Стьюдента для каждого фактора по соответствующей формуле и сравним их с табличным значением t_T :

$$t_{p0}=10508,49>2,04$$

$$t_{p1}=121,29>2,04$$

$$t_{p2}=31,78>2,04$$

$$t_{p3}=52,67>2,04$$

$$t_{p12}=44,03>2,04$$

$$t_{p13}=13,06>2,04$$

$$t_{p23}=29,49>2,04$$

$$t_{p123}=19,52>2,04$$

Рассчитанные значения отклика раскодированного уравнения процесса очистки зерна от примесей перед измельчением в пневмосепараторе молотковой дробилки.

№ опыта	Шаг витков винтового рабочего органа, t, мм	Глубина осадительной камеры, Н мм	Подача материала, q кг/с	Количество выделенных примесей, β, %
1	40	40	0,28	99,27
2	40	40	0,78	97,92
3	40	120	0,28	99,09
4	40	120	0,78	98,43
5	80	40	0,28	98,03

6	80	40	0,78	96,54
7	80	120	0,28	95,57
8	80	120	0,78	96,29
9	80	80	0,53	95,03
10	40	80	0,53	98,73
11	60	120	0,53	97,30
12	60	40	0,53	97,86
13	60	80	0,78	96,15
14	60	80	0,28	98,71
15	60	80	0,53	97,88

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Новосибирский ГАУ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

канд. техн. наук, доцент

В.Н. Бабин

« » 2025 г.

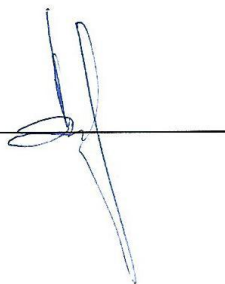
АКТ

о внедрении в образовательный процесс ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ результатов исследования

Результаты диссертационного исследования на соискание учёной степени кандидата технических наук Голикова Алексея Игоревича по теме «Обоснование конструктивно-режимных параметров пневмосепарирующего устройства молотковой дробилки для измельчения зерна» внедрены в учебный процесс для студентов Инженерного института, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия при чтении лекций и проведении лабораторно-практических занятий по курсу «Машины и оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» по темам «Машины и оборудование в животноводстве», «Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» и «Проектирование технологического оборудования для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции».

Настоящий акт составлен на основании рабочих программ и тематических планов лекций и лабораторно-практических занятий по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

Директор Инженерного института
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ,
Д-р техн. наук, доцент



Ю.А. Гуськов

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Акт внедрения в производственный процесс АО «Чкаловское»

УТВЕРЖДАЮ
Директор АО «ЧКАЛОВСКОЕ»
В.Ю. Спицын
1 мая 2025 года
630530, обл. Новосибирская, р-н
Новосибирский,
п. Восход, ул. Набережная, зд. 15.

Акт внедрения результатов исследования

Мы, нижеподписавшиеся, представители АО «ЧКАЛОВСКОЕ» директор Спицын В.Ю., зоотехник Ганн Л.В., с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ канд. техн. наук доцент Мезенов А.А., ассистент Голиков А.И., с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов исследования по теме:

Обоснование конструктивно-режимных параметров пневмосепарирующего устройства молотковой дробилки для измельчения зерна

В процессе внедрения осуществлены следующие работы:

1) Проведены хозяйственные испытания представленного ФГБОУ ВО Новосибирским ГАУ пневмосепаратора молотковой дробилки ДПМ-11, с установленным винтовым рабочим органом, на кормовом ячмене влажностью 9%, и кормосмеси влажностью 10%.

2) Результаты испытаний и опытов:

Производительность пневматической молотковой дробилки ДПМ-11	800-1100 кг/час
Производительность пневмосепаратора с винтовым рабочим органом	700-900 кг/ч
Эффективность очистки зерна от минеральных примесей	До 98%
Эффективность очистки зерна от металломагнитных примесей	До 98%

Использование молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратором с винтовым рабочим органом в линии приготовления кормов позволило повысить эффективность очистки зерна за счет замены заводского магнита и уловителя камней на 5% минеральных примесей и металломагнитных примесей на 3%.

Считаем целесообразным применение молотковой дробилки со встроенным пневмосепаратора с винтовым рабочим органом, обеспечивающим получение готового продукта в соответствии с зоотехническими требованиями.

Представители ФГБОУ ВО Новосибирский
НГАУ

Мезенов А.А.

Голиков А.И.

Представители АО «ЧКАЛОВСКОЕ»

Спицын В.Ю.

Ганн Л.В.