

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

На правах рукописи



БЛЁСКИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛОНА-РАЗГРУЗИТЕЛЯ ЛИНИИ
ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОМБИКОРМОВ**

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 Пшенов Евгений Александрович

Новосибирск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 5 |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА..... | |
| 1.1 Обзор технологических схем приготовления комбикормов на крупных производствах..... | 11 |
| 1.2 Обзор основных систем аспирации на зерноперерабатывающих предприятиях..... | 15 |
| 1.3 Обзор технологических схем приготовления комбикормов на мини заводах | 21 |
| 1.4 Пути повышения эффективности циклонных пылеуловителей и их эксплуатация..... | 24 |
| 1.5 Анализ существующих конструкций циклонов | 29 |
| 1.6 Элементы теории движения многофазных сред в циклонных сепараторах | 36 |
| 1.7 Выводы по главе..... | 39 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ЦИКЛONE..... | |
| 2.1 Теоретические предпосылки описания движения частиц в циклоне | 40 |
| 2.2 Расчёт гидравлического сопротивления циклонных аппаратов | 47 |
| 2.3 Моделирование движения частиц во второй ступени очистки | 52 |
| 2.4 Обзор современных CFD подходов к моделированию движения частиц в циклоне | 60 |
| 2.5 Математические уравнения решателя программного обеспечения для моделирования процесса движения частиц в циклоне | 62 |
| 2.6 Генерация сетки решателя | 65 |

| | |
|---|-----|
| 2.7 Выводы по главе..... | 66 |
| ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 68 | |
| 3.1 Калибровка расчетной сетки и выбор оптимальной конфигурации | 69 |
| 3.2 Методика CFD-моделирования и определения рациональных параметров двухступенчатого циклона | 72 |
| 3.3 Методика проведения многофакторного эксперимента | 77 |
| 3.4 Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона... | 81 |
| 3.5 Обработка полученных результатов с применением пакета анализа..... | 82 |
| 3.6 Описание экспериментальной установки для исследования двухступенчатого циклона | 85 |
| 3.7 Методика проведения сравнительных испытаний с серийным аналогом 89 | 89 |
| 3.8 Методика проведения производственных испытаний опытного образца двухступенчатого циклона | 90 |
| 3.9 Выводы по главе..... | 95 |
| ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 97 | |
| 4.1 Результаты поисковых численных экспериментов | 97 |
| 4.2 Результаты проведения многофакторного эксперимента численным методом..... | 106 |
| 4.3 Результаты проведения многофакторного эксперимента полученных физическим экспериментом | 112 |
| 4.4 Результаты сравнительных испытаний с серийно выпускаемой моделью циклона БЦР..... | 120 |
| 4.5 Результаты производственных испытаний | 121 |

| | |
|--|-----|
| 4.6 Выводы по главе..... | 123 |
| ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛОНА В ЛИНИИ КОМБИКОРМОВОГО ПРОИЗВОДСТВА | 125 |
| 5.1 Методика оценки эффективности | 125 |
| 5.2 Расчет потерь комбикорма..... | 126 |
| 5.3 Расчет энергопотребления | 127 |
| 5.4 Сравнительный анализ..... | 128 |
| 5.5 Экономическая эффективность | 128 |
| 5.6 Обоснование экологической и производственной безопасности применения двухступенчатого циклона | 129 |
| 5.7 Выводы по главе..... | 130 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 131 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ | 133 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты численного моделирования. | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчетные точки при численном моделировании с полями распределения давлений по всему объему двухступенчатого циклона. | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты проведения многофакторного численного эксперимента с результатами статистической обработки. | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г Данные статистической обработки результатов, полученных в ходе физического эксперимента. | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патенты Российской Федерации | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акты внедрения | |

Введение

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

Степень разработанности темы.

Большой вклад в развитие теории процессов сепарации и выделению примесей из воздушного потока, а также приготовлению кормов внесли: Белов Д.А., Белозеров Л.Г., Беляев О.А., Булатов С.Ю., Волков И.М., Григорьев А.К., Громов Л.И., Жуков К.В., Журавлев Н.П., Злочевский В.Л., Иванов В.А., Климов С.В., Ковалев П.Н., Козлов П.В., Кузнецов М.А., Кущев Л.А., Леканов С.В., Лебедев Н.Е., Максимов В.И., Морозов А.В., Николаев

Е.В., Орлов А.А., Патрин П.А., Павлов В.Г., Петров Д.С., Роже И.П., Романов А.А., Сабиев У.К., Савиных П.А., Сергеев А.Г., Смирнов Г.М., Соколов А.И., Соловьев В.Ф., Степанов В.С., Тихонов С.Н., Тимофеев Р.С., Туров А.К., Федоров С.Д., Федоренко И.Я., Фоминых А.В., Чернов Е.Л., Чалов В.А.

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

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

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

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

2. Разработать математическую модель процесса отделения мелкодисперсных фракций дробленного зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне – разгрузителе.

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

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

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

Предмет исследования: закономерности процесса отделения

мелкодисперсных фракций продуктов дробленого зерна из воздушного потока в двухступенчатом циклоне - разгрузителе.

Научную новизну работы составляют:

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

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

Новизна технических решений, применяемых при проведении исследований, подтверждена пятью патентами Российской Федерации на полезные модели RU 220965, RU 217720, RU 208117, RU 227378, RU 233 659.

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

Материалы и методы исследования.

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса отделения мелкодисперсных фракций дробленного зерна от воздушного потока в двухступенчатом циклоне – разгрузителе разработанная методом численного моделирования (CFD) и верифицированная экспериментальными данными;
- закономерности связывающее технологические и конструктивные параметры двухступенчатого циклона - разгрузителя для отделения мелкодисперсных фракций дробленного зерна от воздушного потока и их рациональные конструктивно-режимные параметры.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

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

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

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 121 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 203 листах машинописного текста, включает

15 таблиц и 49 рисунков.

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

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Обзор технологических схем приготовления комбикормов на крупных производствах

Сельское хозяйство охватывает пять ключевых направлений: растениеводство, животноводство, рыбоводство, агролесоводство и агрокультуру. Для эффективного использования ресурсов и повышения продуктивности всё чаще применяются смешанные модели хозяйствования, где растениеводческие и животноводческие производства объединяются в рамках одного предприятия. Это позволяет формировать замкнутые циклы питания и переработки, повышая устойчивость производства.

Связующим элементом между всеми отраслями сельского хозяйства выступает кормопроизводство [44, 43, 46, 76, 52]. От его эффективности напрямую зависит результативность животноводства и, как следствие, уровень продовольственной безопасности. Именно поэтому особое внимание уделяется разработке и внедрению современных решений в производстве кормов, особенно в сегменте комбикормов.

Кормовая база в сельском хозяйстве условно делится на концентрированные и объемистые корма, каждая из которых включает подгруппы, различающиеся по происхождению и функционалу (рисунок 1.1) [6, 96, 38, 17]. Наиболее универсальным видом кормов считаются комбикорма — сбалансированные смеси различных компонентов, адаптированные под потребности конкретных видов и возрастных групп сельскохозяйственных животных и птиц [2, 6].

Процесс производства комбикормов достаточно сложен и включает в себя несколько последовательных этапов: от приёмки и подготовки сырья до фасовки готовой продукции. Каждая стадия требует строгого контроля, поскольку малейшие отклонения могут сказаться на качестве корма и здоровье животных.

На крупных предприятиях производственные линии обычно

автоматизированы и включают централизованные системы очистки, сушки, измельчения, дозирования и транспортировки сырья. Однако высокая производительность таких комплексов зачастую сочетается с ограниченной гибкостью — в частности, при необходимости адаптировать состав корма под мелкосерийные или нестандартные заказы [11,85,93].

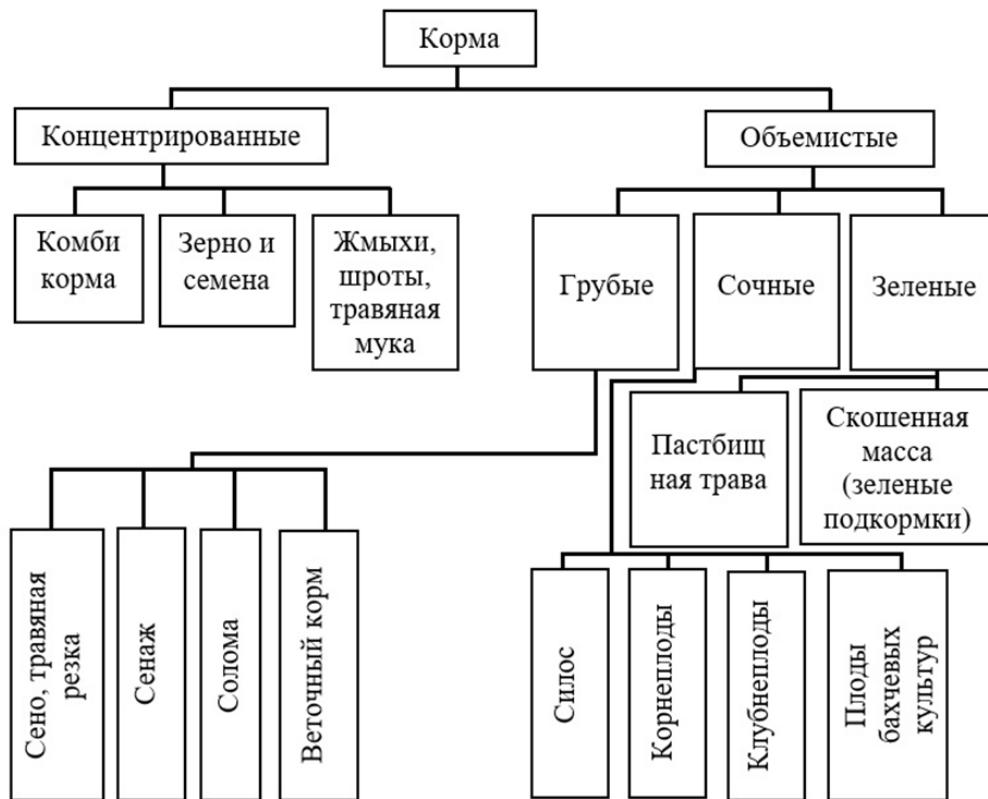


Рисунок 1.1. – Классификация кормов

Существуют различные технологические схемы организации комбикормового производства, различающиеся степенью предварительной подготовки сырья, способом дозирования и уровнем интеграции компонентов. Ниже приведена краткая характеристика пяти распространённых вариантов [26, 85]:

1. Раздельное измельчение и одноэтапное дозирование.
Каждый компонент проходит предварительную подготовку и измельчается отдельно, после чего все ингредиенты дозируются одновременно. Преимущества — простота управления и контроля качества на этапе

измельчения. Недостатки — энергозатраты и ограниченная гибкость рецептур;

2. Раздельная подготовка сырья с двухэтапным дозированием. Зерновое и гранулированное сырьё обрабатываются отдельно, а белково-минеральные компоненты — совместно. Дозирование происходит в два этапа: сначала базовые компоненты, затем добавки. Это улучшает точность смешивания, но требует сложного оборудования;

3. Совместная переработка всех видов сырья с двухэтапным дозированием. Все компоненты подаются в общий поток для смешивания и переработки. Такой подход позволяет оптимизировать загрузку оборудования, но требует строгого соблюдения технологических параметров;

4. Порционная переработка и одноэтапное дозирование. Компоненты перерабатываются партиями. Это упрощает контроль и сокращает время, но может усложнить масштабную переработку и настройку линии;

5. Совместная порционная переработка всех компонентов с одноэтапным дозированием. Смесь формируется из всех ингредиентов сразу, что ускоряет процесс, но требует высокоточного оборудования и не позволяет легко вносить изменения в состав корма.

Организация производства по каждой из этих схем требует специфического оборудования и подхода. Например, в первом варианте предусмотрена очистка и измельчение каждого сырьевого компонента на отдельных линиях. Подготовленные ингредиенты аккумулируются в бункерах, а затем поступают в смеситель. При втором варианте применяется цех предварительных смесей, где часть компонентов обрабатывается заранее и подаётся в общий производственный поток.

Альтернативные схемы предполагают формирование предварительных смесей ещё до основного цикла переработки — как в третьем и четвёртом вариантах. Это позволяет повысить однородность готового продукта и снизить энергозатраты. Пятый вариант является наиболее упрощённым, но требует

высокой точности оборудования, особенно в вопросах дозирования.

В современных условиях широкое распространение получили блочно-модульные цеха, реализующие те или иные принципы из вышеописанных схем [84]. Например, в компактной модульной установке с одноэтапным дозированием (рисунок 1.2) можно автоматизировать все процессы: от подачи и очистки сырья до смешивания. Такой подход снижает затраты и упрощает управление.

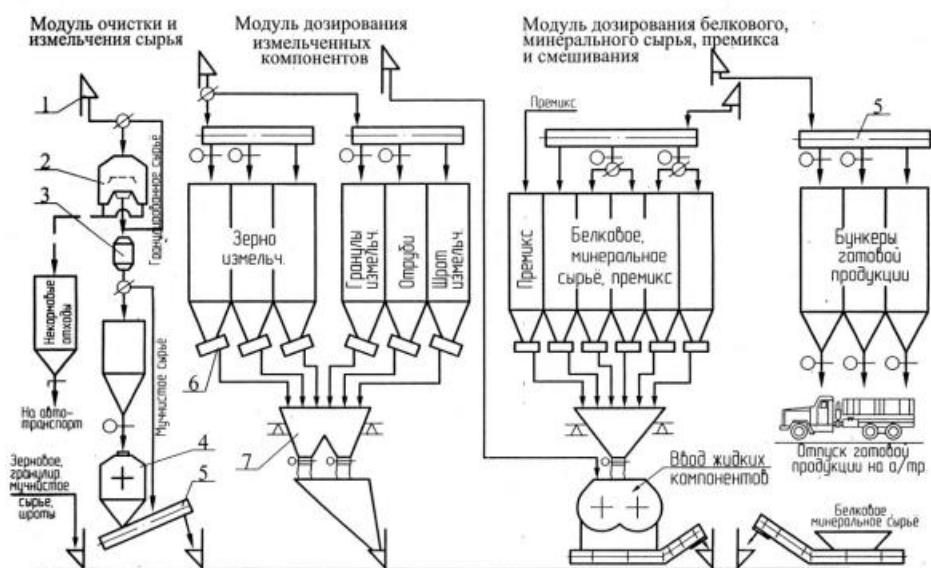


Рисунок 1.2. – Принципиальная схема технологического процесса блочно-модульного комбикормового завода с одноэтапным дозированием:

1 – нория, 2 – сепаратор, 3 – колонка магнитная, 4 – дробилка молотковая, 5 – конвейер, 6 – питатель, 7 – бункер-дозатор тензометрический, 8 – смеситель;

Существуют и более сложные варианты, например, схемы с предварительным просеиванием или многоступенчатым измельчением, позволяющие повысить точность и адаптировать производство под различные рецептуры [84, 90].

Выбор технологической схемы производства комбикормов формируется на основе комплексного анализа таких факторов, как тип используемого сырья, масштабы выпускаемой продукции, особенности рецептур и уровень

автоматизации, а также экономическая обоснованность реализации. Ключевыми технологическими звенями в составе любой линии остаются процессы измельчения и смешивания, от правильной организации которых напрямую зависит качество и однородность готового комбикорма [72, 83, 97]. При этом проектирование и эксплуатация данных узлов требуют тщательного контроля параметров и обеспечения стабильности процессов.

Кроме того, значимым аспектом производственной технологии является обеспечение эффективного управления пылевыми выбросами, которые неизбежно возникают на этапах подготовки, измельчения и транспортировки сырья. Пылевые загрязнения оказывают негативное влияние не только на качество конечного продукта и санитарные условия на предприятии, но и повышают вероятность возникновения аварийных ситуаций, включая пожары и взрывы [88, 79]. В связи с этим, на современных комбикормовых производствах применяются системы аспирации, которые предназначены для сбора и очистки воздуха от пылевых частиц. Использование таких систем способствует повышению безопасности технологического процесса, снижению производственных рисков и улучшению экологической среды в производственных помещениях.

1.2 Обзор основных систем аспирации на зерноперерабатывающих предприятиях

Аспирационные системы на предприятиях комбикормовой промышленности выполняют важную технологическую и санитарно-гигиеническую функцию. Их основное назначение – удаление пыли и мелкодисперсных частиц, образующихся при механической обработке и транспортировке сырья и готовой продукции. Правильно спроектированная и эксплуатируемая система аспирации обеспечивает как защиту окружающей среды, так и надёжность производственного процесса.

Одним из наиболее распространённых технических решений являются всасывающие фильтры типа ФВ, которые включаются в пневмосети

комбикормовых предприятий (рисунок 1.3, а) [30]. Для их функционирования необходимо создавать разряжение, что реализуется с помощью вентилятора среднего давления. Перед фильтром устанавливаются контрольные группы циклонов, оснащённые надёжными шлюзовыми затворами, которые частично улавливают пыль и предотвращают попадание массы продукта в фильтр в случае остановки основного оборудования. Это способствует повышению надёжности и стабильности всей аспирационной системы.

Альтернативный подход представляет собой применение фильтров, работающих под высоким вакуумом (рисунок 1.3, б) [41]. Отказ от вентилятора среднего давления позволяет снизить энергопотребление и упростить конструкцию, однако эксплуатация таких фильтров сопряжена с повышенными нагрузками из-за их размещения на всасывающей стороне воздуходувных машин. Тем не менее, данный вариант широко применяется на современных предприятиях благодаря своей энергоэффективности [62, 74].

Фильтровые системы обеспечивают высокую степень очистки воздуха, что даёт возможность его частичной или полной рециркуляции в рабочие зоны. Это особенно важно в холодный период года, когда теряется большое количество тепла при сбросе воздуха наружу. Однако к недостаткам следует отнести нарастающее гидравлическое сопротивление по мере загрязнения фильтрующего материала, необходимость периодической очистки рукавов, значительные подсосы воздуха, а также пожароопасность и зависимость работы системы от стабильности функционирования вентилятора среднего давления.

Более простыми и надёжными с эксплуатационной точки зрения являются схемы с применением циклонов (рисунок 1.3, в, г) [30]. В таких системах достигается надёжная работа без существенного обслуживания, снижается риск отказов и упрощается конструкция. Однако даже при последовательной установке двух ступеней циклонов не всегда удается обеспечить необходимую чистоту воздуха для его рециркуляции. Вследствие

этого полученный очищенный воздух, как правило, сбрасывается в атмосферу, что допустимо только при соответствии его запылённости, санитарным нормам.

Согласно схеме (рисунок 1.3, д), от воздуховода, идущего к промывной камере, отделен патрубок на отопление, по которому воздух после очистки на батарейных циклонах, минуя промывную камеру, поступает в всасывающие патрубки, подавая продукт из технологического оборудования в пневмо-приемники. Установки для выброса воздуха наружу позволяют отсасывать от оборудования ровно столько воздуха, сколько его нужно для аспирации. Недостающее же для транспортирования количество воздуха поступает из воздуховодов рециркуляции. Подобная схема позволяет на 25 – 30 % уменьшить воздухообмен в помещении и снизить сопротивление оборудования до нормы.

Современные аспирационные системы в комбикормовой промышленности, как правило, строятся по комбинированной схеме. После основных разгрузочных и перерабатывающих участков устанавливаются первичные циклоны, улавливающие основную фракцию пыли. Далее поток воздуха направляется на рукавные фильтры, выполняющие тонкую доочистку. Таким образом, формируется двухступенчатая система очистки, обеспечивающая высокую эффективность задержания пыли. Дополнительно в таких схемах применяются:

- системы автоматического контроля и сигнализации при отказах шлюзовых затворов;
- каналы подвода воздуха извне для компенсации аспирируемого объёма;

Указанные решения позволяют снизить концентрацию пыли в производственных помещениях и обеспечить соответствие экологическим нормативам выбросов.

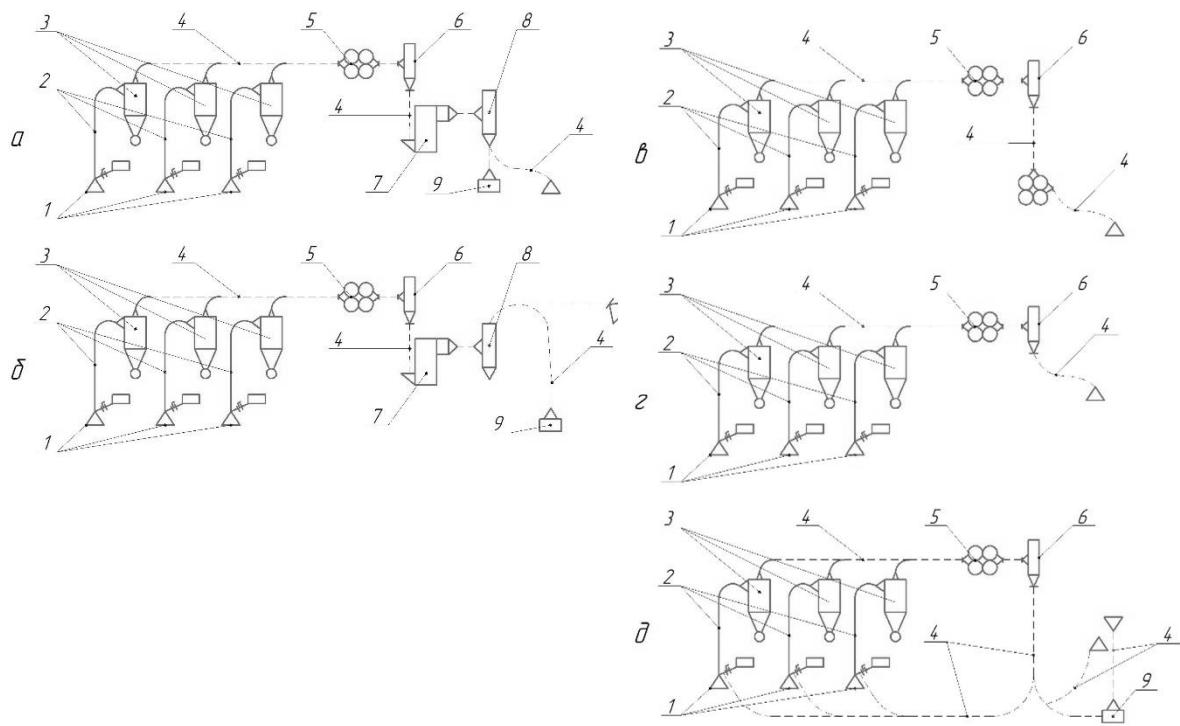


Рисунок 1.3. – Основные схемы пневмоустановок комбикормовых заводов:

1– приемник; 2 – материалопровод; 3– отделитель; 4– воздуховод; 5– контрольная группа циклонов; 6– воздуходувная машина; 7– всасывающий фильтр; 8– вентилятор среднего давления; 9– вторичный пылеотделитель.

Таким образом, системы аспирации на современных предприятиях комбикормовой промышленности являются технически сложными и многоступенчатыми комплексами, обеспечивающими эффективную очистку воздуха от пыли, включая мелкодисперсные фракции. Типовой подход заключается в последовательной установке контрольных циклонов, рукавных фильтров и вторичных отделителей, что позволяет предотвратить выброс вредных веществ в атмосферу, снизить пылевую нагрузку на оборудование и обеспечить безопасные условия труда. Современные аспирационные сети объединяют технологическую надёжность, экологическую безопасность и энергоэффективность.

На основе анализа сложных аспирационных систем, используемых на

крупных предприятиях, занимающихся кормопроизводством, можно выделить основные схемы используемых пневмоустановок (рисунок 1.4), на рисунке представлены только пневмоустановки с горизонтальным расположением материалопровода, при этом нетрудно представить аналогичные установки, но с вертикальным или смешанным расположением труб.

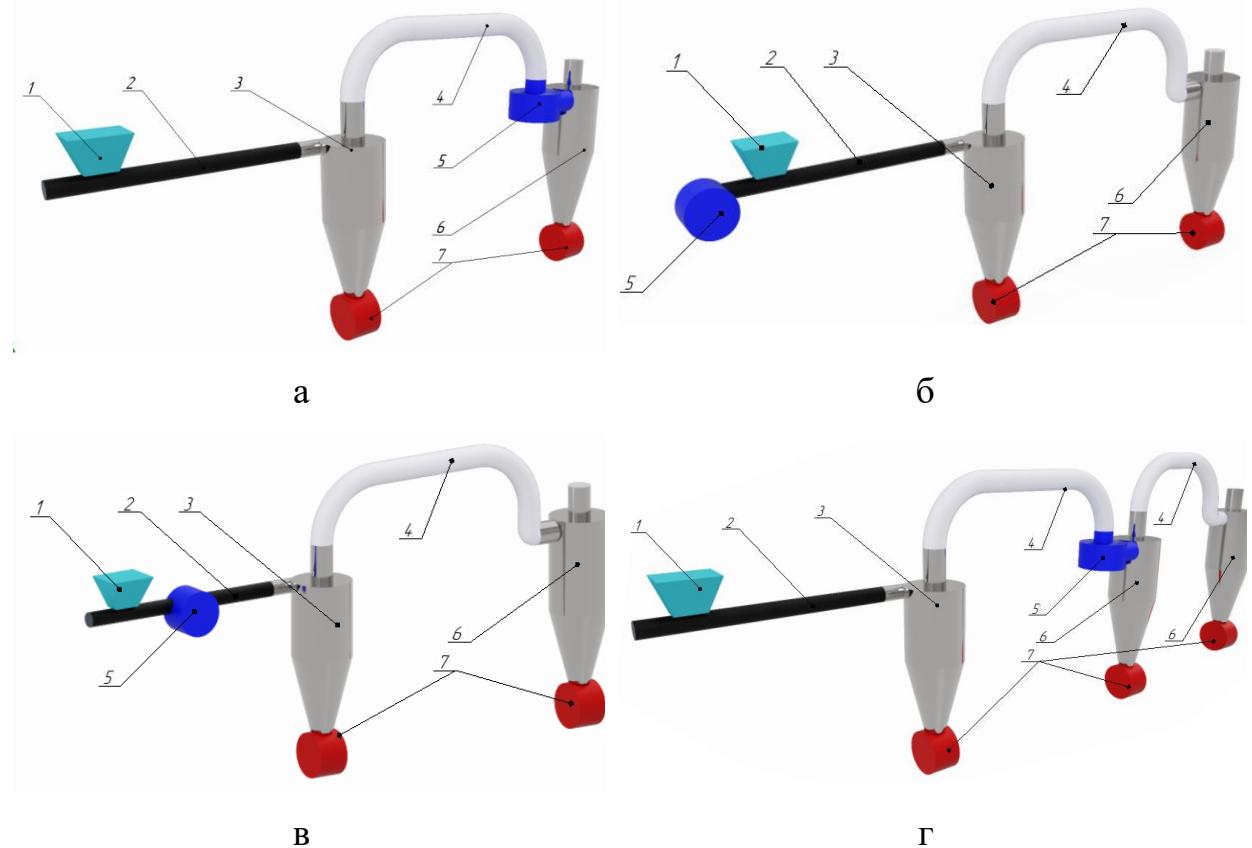


Рисунок 1.4. – Основные схемы пневмотранспорта, реализуемые на комбикормовом производстве:

1– приемник; 2– материалопровод; 3– отделитель; 4– воздуховод; 5– вентилятор; 6– пылеотделитель.

Простые всасывающие (рисунок 1.4, а) и нагнетательные (рисунок 1.4, б) пневмоустановки применяют в случаях, когда требуется перемещать один и тот же продукт либо поочерёдно разные материалы в едином направлении, например, для вывода отходов на склад.

Также используются компактные пневмотранспортные моно-системы,

предназначенные для перемещения различных продуктов. В их составе присутствуют лишь отделитель, шлюзовой затвор, многоступенчатый осевой вентилятор и электродвигатель, смонтированные в простейшую всасывающую пневмоустановку с вертикальным материалопроводом [3].

Комбинированные всасывающе-нагнетательные системы (рисунок 1.4, в, г) сравнительно редко применяют как стационарные, особенно с приёмниками стандартного типа. Это связано с тем, что они объединяют не только плюсы и минусы отдельных всасывающих и нагнетательных установок, но и имеют собственные ограничения.

В схеме (рисунок 1.4, в) весь поток транспортируемого материала проходит через вентилятор, из-за чего частицы измельчаются, а рабочие элементы быстро изнашиваются. Такой вариант непригоден для веществ, способных образовывать с воздухом взрывоопасные смеси или легко разрушающихся при механическом воздействии. Если же эти факторы не критичны, система удобна для перемещения продукции на значительные расстояния, превышающие возможности одного вентилятора. В этом случае пневмосеть строят с последовательной установкой нескольких вентиляторов и размещают общий пылеотделитель уже на выходе. Подобная конфигурация позволяет использовать вентиляторы среднего или даже низкого давления, желательно в специальном исполнении.

В другой схеме (рисунок 1.4, г) материал не проходит через вентилятор, однако требуются дополнительный приёмник и отдельный пылеотделитель в нагнетательном тракте.

Комбинированные варианты особенно подходят для мобильных пневмоустановок, например, различных пневмогрузчиков, которые забирают продукт с помощью всасывающих насадок.

Таким образом, в любой упрощенной схеме аспирации комбикормового завода присутствуют два циклона, один выполняет роль циклона-разгрузителя (осадителя), второй – циклона пылеуловителя, при этом они не являются

последней ступенью очистки отработанного воздуха в системе рециркуляции, либо в системе выбросов в атмосферу, на последних этапах на крупных предприятиях системой очистки воздуха занимаются фильтр – элементы, например, рукавные фильтры.

1.3 Обзор технологических схем приготовления комбикормов на мини заводах

В настоящее время наибольшее распространение получают различные мобильные технологии по обработке зерна [47, 48], в том числе и производства комбикормов непосредственно в хозяйствах [45]. Однако опыт эксплуатации дробилок комбикормовых агрегатов с пневматической загрузкой и выгрузкой исходных компонентов комбикорма выявил их существенные недостатки [55, 8].

При соблюдении определённого качества продукции, отраженного в документе [26], производить комбикорма возможно в помещениях, размер которых не превышает размер грузового контейнера, главным условием которых является вмещение основного оборудования, что весьма актуально для малых хозяйств [14, 18, 45], в связи гибкостью настройки оборудования возможно быстрое изменение состава компонентной смеси для разных групп животных. Также при установке дополнительного оборудования возможно быстрое и легкое изменение конечного продукта, выпускаемого на внутрихозяйственной линии производства, к дополнительному оборудованию можно отнести грануляторы, экструдеры, бункеры-накопители, дозаторы БВМД и т.д., при наличии обязательных этапов производства немалую важность занимает и вспомогательное оборудование, такое как пневмотранспорт.

Существующие линии производства на комбикормовых мини-заводах выпускаются с двумя системами пневмотранспорта. С непосредственной подачей измельченного материала в смеситель (рисунок 1.5, а) и через циклон-

разгрузитель (рисунок 1.5, б). Экспериментально установлено, что в установках с использованием воздушного потока для транспортировки в смеситель измельченной массы, в фильтры попадает большее количество пылевидной фракции с обогатительными добавками.

В первом варианте исполнения, в смесителе происходит функции и аспирационной системы, которая задерживает мелкодисперсный компонент только с помощью мешков-фильтров, состоящих из фильтровальной ткани, очистка газовой смеси в таких случаях малоэффективна. В системах пневмотранспорта с циклоном-разгрузителем, помимо высокоэффективного отделения примесей, так же устанавливаются фильтры на выходе из циклона, что дополнительно очищает воздух от взвешенных примесей, неочищенных посредством центробежных сил.

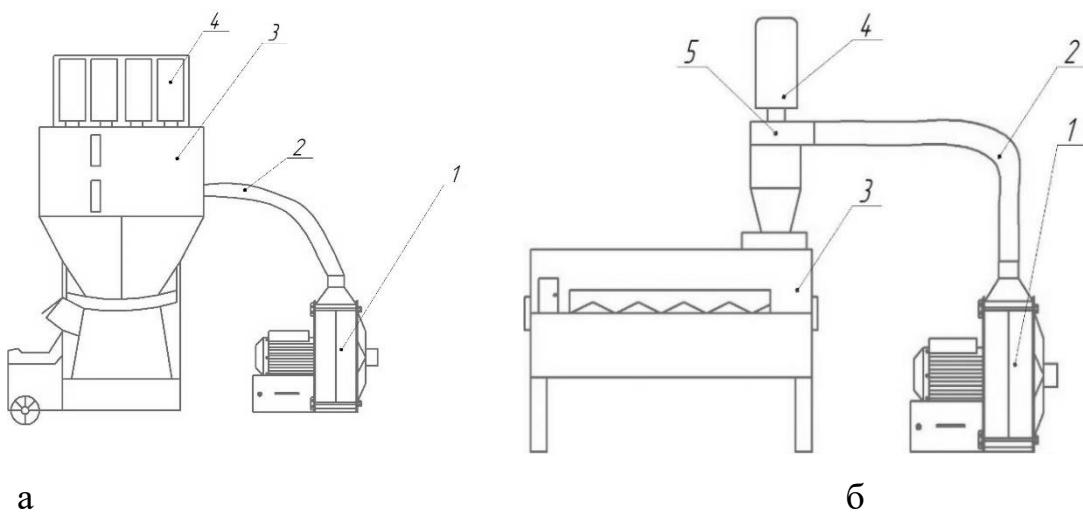


Рисунок 1.5. – Схемы пневмотранспорта:

а – без циклона разгрузителя; б – с циклоном разгрузителем;
1 – дробилка; 2 – пневмоканал; 3 – смеситель; 4 – фильтровая ткань; 5 –
циклон разгрузитель;

Работа комбикормового мини-завода происходит следующим образом: по гибкому рукаву зерно с места складирования поступает через металлокамнеуловитель в дробилку, где происходит измельчение исходного сырья.

Измельченные частицы, из-за решетного пространства дробилки, по пневмо проводу поступают в смеситель, установленного непосредственно за пневмо дробилкой, либо через циклон-разгрузитель, в случае, если система оборудована им, смеситель находится на опорах с весо-измерительными датчиками. В смесителе с учетом рецептов накапливаются компоненты смеси. Накопленная измельченная масса смешивается с белково-витаминно-минеральными добавками [7]. По завершении смешивания готовый продукт выгружается конвейером в мешки или транспортное средство в готовом виде, либо перерабатывается, согласно дальнейшим условиям его приготовления с использованием дополнительного оборудования. Забор исходного материала изготавителями мини- заводов предусмотрен с возможностью засасывать исходные продукты, находящиеся на расстоянии до 10 метров от дробилки.

При этом возможно использование циклона-разгрузителя как на системах с вертикальным, так и горизонтально установленным смесителем, предназначенными для смешивания любых видов измельченного растительного гранулированного сырья. Основными недостатками использования комбикормовых мини- заводов в условиях хозяйства являются неравномерная нагрузка на средства дробления [11, 14, 13] и высокая засоренность цехов и предприятия, что негативно сказывается на здоровье персонала, пожаробезопасности предприятия и экологической обстановки в целом [16, 12, 71].

В ходе анализа технологического процесса получения концентрированных кормов появилась гипотеза: усовершенствовать систему аспирации продуктов дробления, чтобы сохранить мелкодисперсный компонент в получаемых кормах. Это позволит сократить его потери, повысить эффективность кормовой смеси и процесса отделения, а также подобрать и установить оборудование с максимальной эффективностью. Подобное решение особенно актуально для предприятий малой мощности, где ограничен набор и количество применяемого оборудования.

Следует также учитывать, что при сохранении мелкодисперсного компонента в составах сухой, рассыпной кормосмеси, необходимо учитывать влияние её на группу животных, так как использование пыли может вызывать различные болезни дыхательных путей, аллергические реакции и другие виды заболеваний [53, 91, 73, 38]. При этом, если уловленный мелкодисперсный компонент использовать как добавку при приготовлении гранулированных, экструдированных кормов, а также использовании её в качестве добавок в сочные корма, возможно увеличение продуктивности животных и решение вопросов с депонированием мелкодисперсного компонента на производстве [36].

Таким образом, повышение эффективности линии приготовления комбикормов на комбикормовом мини-заводе возможно, за счет использования новых конструкций циклонов-разгрузителей в линии, а также управления подачи материала на дробилку, как вследствие контроля подачи на аппарат.

1.4 Пути повышения эффективности циклонных пылеуловителей и их эксплуатация

Процессы переработки зерна неизбежно сопровождаются образованием пыли, которая загрязняет технологическое оборудование, рабочую зону и попадает в атмосферу вместе с отработавшими газами [2, 31, 33]. В связи с этим необходимо обеспечить пылеулавливание на всех этапах производства, при которых образуется мелкодисперсный компонент. К таким этапам относятся: транспортировка зерна; очистка от примесей; измельчение; смешивание; пневмотранспортирование.

Для обеспечения высокой эффективности пылеулавливания на промышленных предприятиях используют последовательную установку инерционных пылеуловителей в совокупности с различными фильтр-элементами, например, таких как рукавные, что в итоге приводит к

увеличению размеров оборудования, расходу металла и материальных затрат. Важно отметить, что от надежности и эффективности пылеулавливающего оборудования зависят потери ценных тонкодисперсных фракций продукции, а также уровень загрязнения и запыленности воздуха в производственных помещениях. На сегодняшний день большинство аппаратов для отчистки и отделения мелкодисперсных частиц от воздуха морально и физически устарели. Из-за этого постоянно растущие требования по остаточной запыленности не обеспечиваются на большинстве предприятий, что объясняется следующими факторами [89]:

- большинство установленного пылегазоочистного оборудования проектировалось и строилось, исходя из экологических нормативов 70-80-х гг. прошлого века;
- установки очистки не оснащены современными средствами автоматизации и контроля;
- предприятия страдают от недостаточного финансирования ремонтных и восстановительных работ.

Повсеместное снижение вредных выбросов пыли на зерноперерабатывающих предприятиях можно достичь за счет разработки и внедрения технологических процессов и оборудования, соответствующих современным требованиям безопасности и экологичности, а также технического усовершенствования существующих систем пылеулавливания. Основные направления совершенствования центробежных аппаратов представлены в работе [89].

Ключевое направление для улучшения центробежных аппаратов (рисунок 1.6) заключается в модификации основной конструкции. Для уменьшения энергетических затрат на очистку газа в циклонах НИИОГаза типов ЦН-15, ЦН-15У и ЦП-24 часто используются устройства для раскручивания потока, которые позволяют перераспределить составляющие скорости потока и снизить поперечную циркуляцию в выхлопной трубе.

Наиболее благоприятные результаты от применения раскручивающих устройств достигаются в циклонах типа ЦН-15 и ЦН-24. В этих случаях использование раскручивателей не только позволяет снизить энергетические затраты, но и увеличивает степень очистки на 2 – 3%. Однако в высокоэффективных циклонах с малым диаметром выхлопной трубы применение раскручивающих устройств неэффективно. В таких аппаратах основные гидравлические потери на выходе связаны с высокой осевой скоростью потока, и использованием раскручивателей, препятствующих движению потока, что может привести к увеличению гидравлического сопротивления.

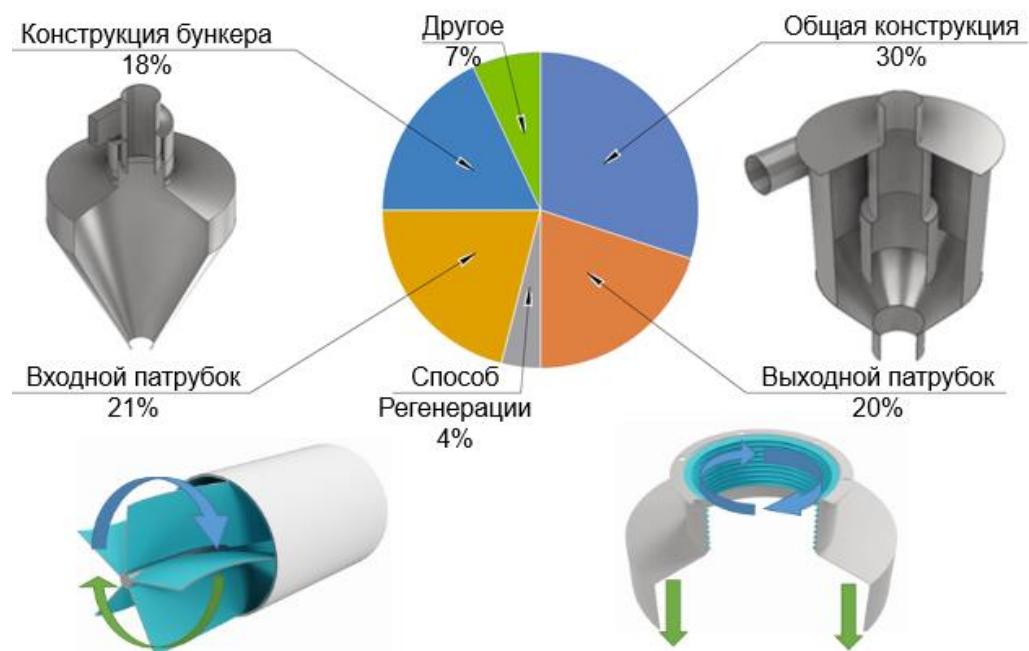


Рисунок 1.6. – Распределение основных направлений совершенствования центробежных аппаратов:
1 – общая конструкция; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – конструкция бункера; 5 – способ регенерации; 6 – другое.

Отмечено, что коэффициент сопротивления и степень очистки циклонов зависят от их формы и в меньшей степени от размеров и нагрузки. При этом увеличение концентрации пыли в газовом потоке на входе в циклон немножко снижает сопротивление. Сопротивление циклонов существенно уменьшается

при снижении скорости вращения в выхлопном патрубке, что достигается установкой перед выхлопными патрубками или непосредственно в них специальных устройств, уменьшающих крутку потока на выходе из циклона [89].

Еще одна тенденция, описанная в устройстве [56], заключается в установке: в корпусе циклона конической вставки с щелевыми улавливающими отверстиями, расположенными под углом к образующей конуса. Похожее решение предложено в работе [46], где корпус циклона имеет продольные щелевые отверстия для отвода частиц, закрытые снаружи защитным кожухом и размещенные в герметичном корпусе. По словам авторов, это решение повышает степень очистки воздуха от мелкодисперсной пыли, не увеличивая при этом гидравлическое сопротивление циклонов.

В работе [21] для снижения выбросов пыли в атмосферу после отделения в циклонах предложены следующие подходы:

- введение в конструкцию циклонов элементов других инерционных аппаратов, что приводит к суммированию различных процессов инерционной сепарации. Примеры включают вертикальный прямоточный циклон ВПЦ, сочетающий качества обычного (противоточного) циклона и циклона прямоточного; пылеуловитель для очистки газовых потоков от мелкодисперсной пыли, конструкция которого, кроме сочетания качеств противоточного и прямоточного циклонов, позволяет осуществлять очистку газа по "мокрому" способу; пылеуловитель для высокоэффективного улавливания мелкодисперсной пыли, в корпусе которого встроены своеобразные "карманы", представляющие собой миниатюрные пылеосадительные камеры;

- сочетание элементов конструкции инерционного аппарата с элементами конструкций аппаратов принципиально другого способа пылеулавливания, таких как электрофильтры и тканевые фильтры. Это усложняет конструкцию и в промышленных масштабах сложно реализуемо

из-за особенностей магнитных свойств различных пылей, и несовместимости скорости потока в циклоне, и скорости фильтрации через ткань [21];

В работе [59] приведен ряд решений, направленных на повышение эффективности циклонов. В выхлопной трубе устанавливается осевая цилиндрическая вставка, которая снижает гидравлическое сопротивление циклона и уменьшает вторичный унос пыли. Эта вставка отделяет полость бункера от полости корпуса, усиливая нисходящие и ослабляя радиальные течения потока в нижней части корпуса циклона, что снижает вторичный унос уловленной пыли из бункера в 3-5 раз и уменьшает выброс пыли в атмосферу в 1,5-2 раза.

Использование эжекции выделенного продукта из бункера циклона с частью несущего газового потока реализовано в пыле-концентраторе [59]. Эта конструкция не требует дополнительного источника тяги, так как отсос газа из бункера осуществляется за счет перепада давления в бункере и в выхлопном патрубке циклона. Очистка отбираемого запылённого потока осуществляется в фильтре, расположенном между корпусами бункера и циклона. По данным авторов, такое решение позволяет вдвое снизить выброс пыли из аппарата и уменьшить гидравлическое сопротивление на 15-20%. В выхлопной трубе циклона установлены направленные лопатки, что обеспечивает снижение потерь давления без снижения эффективности очистки [59].

Одной из важных проблем является защита корпусов циклонов от абразивного износа. Абразивный износ проточной части циклонов усиливается многовитковым вращением газового потока, несущего дисперсные частицы. В результате этого вращения и инерционных сил, твердые абразивные частицы концентрируются у стенок аппарата, что приводит к эрозии, то есть истиранию стенок до образования сквозных отверстий [70, 86]. Скорость такого износа в некоторых случаях может достигать 12 мм в год. Для повышения износостойкости циклонов применяют следующие меры: нанесение износостойкого покрытия на изнашиваемые

поверхности; использование материалов, более стойких к износу в данных условиях; изменение конструкции циклонов для уменьшения износа за счет оптимизации аэродинамического течения газа.

Эффективной работе циклонов также часто мешает отложение сильно слипающихся пылей на внутренних поверхностях. Одним из методов борьбы с этим явлением является применение циклонов с полированной внутренней стенкой. Исключительно эффективным средством предотвращения залипания является обеспечение эластичности стенок циклонов, например, с помощью резины, которая периодически деформируется для очистки [49].

Как уже упоминалось выше, инерционные пылеуловители применяют совместно с фильтрами, причём в качестве фильтрующего элемента может использоваться насыпной слой зернистых сыпучих материалов (зернистые фильтры). Преимущества таких аппаратов заключаются в низкой стоимости, компактности, доступности фильтрующих материалов, а также в способности выдерживать значительные механические нагрузки и резкие перепады температуры.

Таким образом, основным трендом модернизации циклонов является уменьшение энергозатрат при обеспечении высокой эффективности пылеулавливания.

Наиболее перспективным направлением совершенствования и модификации конструкций циклонов является их комбинирование с элементами инерционных пылеуловителей различных типов в одном устройстве, то есть изменение конструкции самого циклонного аппарата.

1.5 Анализ существующих конструкций циклонов

Одним из незаменимых устройств, для очистки газовоздушных смесей и отделение мелкодисперсных компонентов от воздуха при переработке зерна являются центробежные сепараторы [80, 81].

В производствах циклонные аппараты заслужили свою популярность за

счет следующих преимуществ [40]:

- простота конструкции и сравнительно небольшая стоимость;
- возможность функционирования в условиях высоких температур и давлений без каких-либо принципиальных изменений в конструкциях;
- возможность улавливания и классификации абразивных включений при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- высокая производительность и сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации твердой фазы;
- возможность сухого осаждения продукта.

При всем своем многообразии существующих конструкций, циклоны можно разделить на две группы – циклоны-разгрузители, которые выполняют функции первой стадии очистки и выделяют из потока более крупные примеси, и циклоны-пылеуловители, устанавливающиеся в конечную стадию очистки и отделяющие более мелкую пыль перед выходом её в окружающую среду, при этом принцип работы у обоих вариантов одинаковый, которые используются не только на мини-заводах по приготовлению комбикормов, а также в современных машинах для разделение зернового материала [82].

В линиях крупных производителей комбикормов, в системе пневмотранспорта присутствуют сложные системы аспирации, и участвуют оба вида циклонов с рукавными фильтрами, как следствие, отсутствуют проблемы с выбросом частиц в атмосферу, на комбикормовых мини-заводах напротив нет возможности использования многообразных систем очистных аппаратов в итоге используются только циклоны-разгрузители с фильтромешком, установленным на выхлопном патрубке, обеспечивающим более качественную очистку.

В системах комбикормовых мини- заводов наибольшую популярность получили циклоны-разгрузители серии БЦР (рисунок 1.7).

Циклоны серии БЦР работают следующим образом: запыленный газ

подается во входной патрубок циклона. Тангенциально закрученный поток попадает в цилиндроконический корпус, в котором крупные частицы во время соприкосновений с внутренними стенками циклона выпадают из потока и через разгрузочное окно попадают в бункер, очищенный воздух от части мелкодисперсного компонента, резко меняет свое направление и с восходящим закрученным потоком устремляется в выходной патрубок откуда попадает в атмосферу.

Главным недостатком данного циклона является низкая эффективность улавливания мелкодисперсного компонента продуктов дробления зерна, из-за чего мелкая пылевая фракция с потоком воздуха устремляется в атмосферу.

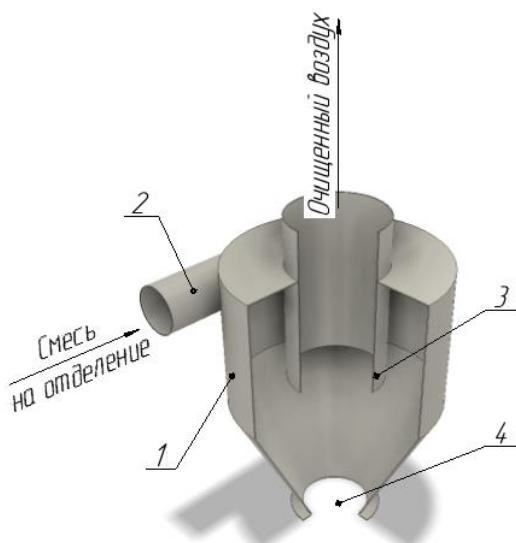


Рисунок 1.7. – Циклон серии БЦР:

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – разгрузочное окно.

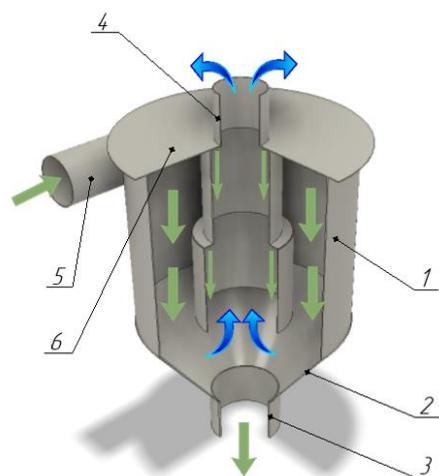
На ряду с серийно выпускаемыми циклонами, также существует ряд патентных решений для повышения эффективности работы систем отделения.

Патент RU 223762 U1. Циклон для очистки газов. Изобретение для отчистки газов от твердых частиц. Циклон для очистки газов включает в себя (рисунок 1.8) вертикальный цилиндрический корпус с коническим днищем, снабженный штуцером для удаления пыли, штуцер для подачи в аппарат запыленного газового потока, расположенный тангенциально к корпусу,

крышку, выхлопную трубу, выполненную в виде цилиндра, ступенчато уменьшающимся в диаметре по высоте [42].

Принцип работы циклона, следующий: через штуцер подачи пылегазовый поток, поступает в цилиндроконический корпус циклона, где формируется закрученный нисходящий поток, огибающий выхлопную трубу. За счёт центробежных сил крупнодисперсные частицы интенсивно отделяются от газовой фазы. В нижней зоне корпуса скорость вращения потока падает, происходит реверс направления движения, что приводит к осаждению и удалению тяжёлых фракций через штуцер для отвода пыли.

Очищенный от крупных и среднедисперсных частиц газовый поток переходит во внутреннюю восходящую спираль и направляется к выхлопной трубе. Двигаясь через каскад цилиндрических участков, постепенно уменьшающихся по диаметру, поток дополнительно освобождается от средних и мелких фракций, после чего очищенный газ выбрасывается в атмосферу [42].



↗ - движение чистого воздуха; → - частицы;

Рисунок 1.8. – Циклон для очистки газов:

1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер для удаления пыли; 4 – выхлопная труба; 5 – штуцер для подачи; 6 – крышка.

Одним из преимуществ данного циклонного аппарата, как утверждает автор, является повышенная степень очистки пылегазового потока от твердых

частиц, в сравнении с циклоном серии ЦН-15, при этом следует учесть, что при использовании данного решения в комбикормовой промышленности, мелкодисперсные частицы образованные в результате дробления зерна и попавшие в ступенчато уменьшающиеся цилиндры, не выпадают из восходящего потока, а напротив, устремляются вверх по образующему вихрю, в связи с забиванием ступеней образованных в результате изменения сечений, а также в результате резкого изменения сечения цилиндров образуется сопротивление воздушному потоку, что оказывается на коэффициенте гидравлического сопротивления, тем самым, увеличивая энергетические показатели нагнетающего или всасывающего оборудования (вентиляторов).

Для предотвращения ступенчатого изменения сечения цилиндров в патенте RU 225506 U1, выходной патрубок предусмотрен в виде конфузора.

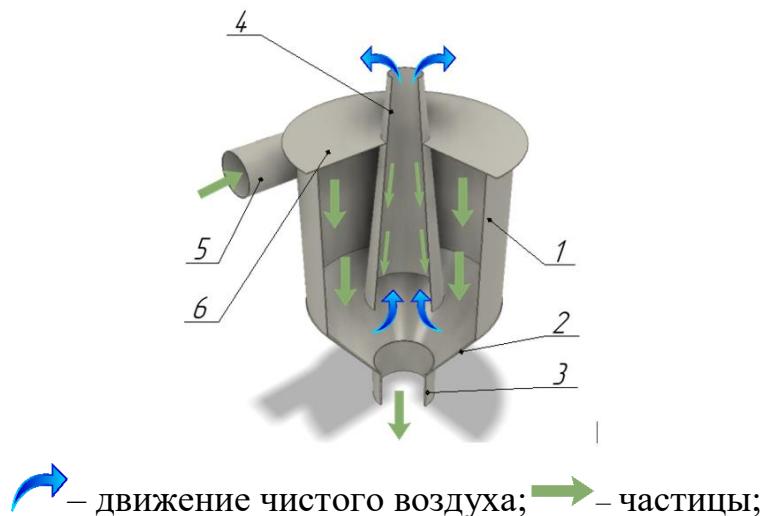


Рисунок 1.9. – Циклон для очистки газов:

1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер для удаления пыли; 4 – выхлопная труба; 5 – штуцер для подачи; 6 – крышка.

Циклон (рисунок 1.9) предназначен для очистки запылённых газов и включает вертикальный цилиндрический корпус с коническим днищем, оснащённый штуцером для отвода пыли и тангенциально расположенным штуцером для подачи пылегазового потока, а также крышку и выхлопную

трубу-конфузор с шероховатой внутренней поверхностью.

Принцип работы следующий. Пылегазовая смесь через подающий штуцер поступает в корпус, закручивается вокруг выхлопной трубы и опускается по спирали вниз. В процессе закрученного движения под действием центробежных сил крупные частицы отделяются от газовой фазы. В нижней зоне корпуса скорость потока снижается и направление меняется, что приводит к осаждению и удалению крупных фракций через штуцер для пыли. Газ, освобождённый от частиц крупной дисперсности, далее поднимается по восходящей спирали внутри выхлопной трубы, где шероховатая поверхность способствует дополнительному удержанию средне- и мелкодисперсных частиц, после чего очищенный поток выбрасывается в атмосферу [41].

К недостатку данного устройства можно отнести, неэффективное отделение мелкодисперсного компонента продуктов дробления зерна от воздуха из-за переменного сечения выхлопной трубы по всей длине выхлопного патрубка, что в свою очередь приведет к налипанию пыли на внутренние стенки конфузора, за счет электростатического напряжения. При достижении определённого слоя в местах наименьшего сечения, произойдет отлипание данных частиц, как следствие, вынос их из выхлопного патрубка циклона.

При уменьшении сечения выхлопного патрубка, частицы все больше и больше будут налипать на внутренние его стенки, тем самым, уменьшая сечение выхлопного патрубка вплоть до полного перекрытия выпускного сечения, что повлияет на общее сопротивление циклона и его энергоэффективность.

Таким образом, в ходе анализа существующих решений по повышению эффективности отделения отмечается тенденция к уменьшению сечения выходного патрубка и его модернизации с целью увеличения соприкосновения воздушного потока со стенками циклона.

Перспективным устройством является конструкция двухступенчатого циклона, имеющая в одном устройстве две стадии очистки [68, 66, 65, 57] (рисунок 1.10).

Циклон состоит из входного тангенциального патрубка прямоугольного сечения; спиральной улитки, внутри которой установлен осевой патрубок; конической части корпуса; выходного патрубка, в котором выходной диаметр больше диаметра большей части вихревой воронки. На верхнем торце осевого патрубка установлена коническая вихревая воронка. На входе в осевой патрубок установлен отбойный конус, образующий кольцевой канал.

Такое сочетание конструктивных элементов позволяет эффективно отделять мелкодисперсные компоненты размером от 10 мкм до более крупных.

Это достигается благодаря переменному сечению вихревой воронки и отбойному конусу, разбивающему вращающийся вдоль направляющей поток.

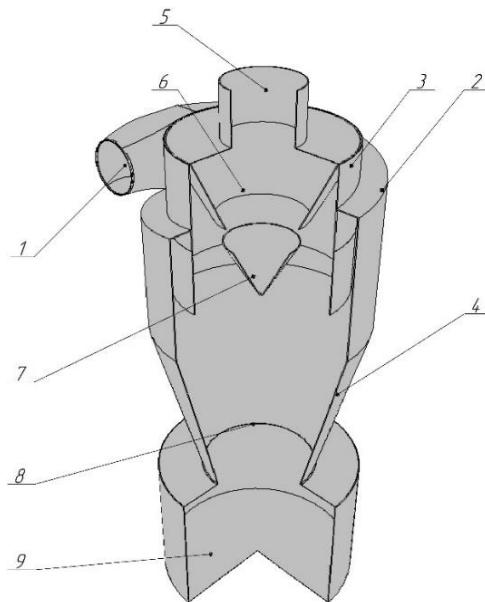


Рисунок 1.10. – Двухступенчатый циклон:

1 – входной патрубок; 2 – спиральная улитка; 3 – осевой патрубок; 4 – коническая часть бункера; 5 – выходной патрубок; 6 – вихревая воронка; 7 – отбойный конус; 8 – разгрузочное окно; 9 – бункер.

Таким образом, частицы, стремящиеся прижаться к внутренним стенкам

воронки за счет центробежной силы, дополнительно прижимаются к этим стенкам за счет рассечения потока смеси.

1.6 Элементы теории движения многофазных сред в циклонных сепараторах

Циклонные сепараторы используют центробежные силы для отделения твердых частиц из газовых потоков. Основные элементы теории движения многофазных сред в циклоне включают в себя математические модели для описания движения частиц и газа, а также механизмы отделения частиц.

Основные уравнения:

1. Уравнение Навье-Стокса для движения газа:

Уравнения Навье-Стокса описывают движение вязкой жидкости (или газа). В случае несжимаемого газа в циклонном сепараторе уравнение (1.1) имеет вид [26]:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U, \quad (1.1)$$

где ρ – плотность газа;

U – вектор скорости газа;

p – давление;

μ – динамическая вязкость газа.

2. Уравнение движения частицы:

Движение частицы под действием центробежной силы можно описать уравнением (1.2) [104]:

$$m \frac{dV_p}{dt} = mg + F_d + F_c, \quad (1.2)$$

где m – масса частицы;

V_p – скорость частицы;

g – ускорение свободного падения;

F_d – сила сопротивления среды;

F_c – центробежная сила.

Центробежная сила F_c (1.3) определяется как:

$$F_c = m \frac{U_0^2}{r}, \quad (1.3)$$

где U_0 – тангенциальная скорость частицы;

r – радиус окружности по которой движется частица [104].

3. Сила сопротивления среды.

Сила сопротивления для сферической частицы в ламинарном потоке описывается законом Стокса (1.4) [104]:

$$F_d = 6\pi\mu r_p(u - v_p), \quad (1.4)$$

где r_p – радиус частицы;

u – скорость газа;

v_p – скорость частицы.

В турбулентном потоке используется более сложная модель, такая как закон сопротивления Ньютона.

4. Эффективность сепарации:

Эффективность циклонного сепаратора (1.5) определяется коэффициентом коллекции η , который зависит от размеров частиц и конструкции циклона [111]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{U_s}{U_g} \cdot \frac{L}{H}\right), \quad (1.5)$$

где U_s – скорость седиментации частиц;

U_g – скорость газа;

L – длина вихревого пути;

H – высота циклона.

Скорость седиментации частиц (также известная как скорость осаждения) — это скорость, с которой частицы осаждаются из газового или жидкого потока под действием гравитационных или других внешних сил, таких как центробежная сила в циклоне [112]. Эта скорость важна для определения эффективности отделения частиц в сепараторах. Для

определения скорости седиментации используются: закон Стокса для ламинарного течения (при малых числах Рейнольдса, Re); Модель для турбулентного режима (при больших числах Рейнольдса, Re); Модель переходного режима (между ламинарным и турбулентным).

В циклонах основная сила, вызывающая седиментацию частиц, – это центробежная сила, которая значительно превышает гравитационную силу. Скорость седиментации частиц выражается через центробежную силу.

Эта центробежная сила заставляет частицы двигаться к стенкам циклона, где они осаждаются и удаляются. Скорость седиментации в циклоне будет зависеть от радиуса циклона, тангенциальной скорости и других параметров [111].

Таким образом, для частиц радиусом r_p плотностью p_p и движущихся в газе с плотностью p_g седиментации в ламинарном режиме можно рассчитать по закону Стокса (1.6):

$$U_s = \frac{2r_p^2(p_p - p_g)g}{9\mu}. \quad (1.6)$$

Теоретическая модель позволяет рассчитать скорость осаждения частиц в различных условиях и определять с её помощью эффективность отделения частиц, используя формулу эффективности сепарации [111]. При этом коэффициент коллекции циклона сильно зависит от размеров частиц и параметров потока. Приведенные выше уравнения и примеры показывают, как рассчитать этот коэффициент, что позволяет оптимизировать конструкции циклонов для повышения их эффективности.

Современные решения в виде различного программного обеспечения помогают автоматизировать процесс расчёта определённых значений, тем самым, ускорив и упростив процесс конструирования и выбора оптимальных параметров конструкции под определенные условия.

Таким образом, использование теоретических и эмпирических моделей позволяет проектировать и оптимизировать работу циклонных аппаратов для

различных условий эксплуатации [99].

1.7 Выводы по главе

1. В ходе анализа технологических схем и линий приготовления концентрированных кормов на крупных предприятиях, установлено, что они имеют достаточно развитую систему аспирации, последними ступенями которых являются циклон-пылеуловитель, а затем фильтр-элемент, обеспечивающие достаточно высокую степень обеспыливания отработанного воздуха.

2. Установлено, что на комбикормовых мини-заводах с системой пневмотранспорта, с использованием циклона-разгрузителя, количество частиц, выбрасываемых в рабочую зону, меньше, что является перспективным направлением повышения эффективности аспирации данных систем.

3. Выявлены тенденции повышения эффективности существующих циклонных пылеуловителей, посредством внесений изменений в их конструкцию.

4. В ходе анализа существующих конструкторских решений для повышения эффективности процесса отделения, предложена принципиальная схема, включающая две стадии очистки в одном устройстве.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ЦИКЛONE

Одной из сложных и до конца не решённых задач остаётся детальное описание движения сплошной газовой среды, содержащей мелкодисперсный компонент, в прямоточном пылеуловителе циклонного типа.

В классической научной литературе для анализа таких процессов используют фундаментальные уравнения Навье-Стокса и Эйлера, которые, как отмечают многие авторы, позволяют достаточно точно передавать динамику газовых потоков в различных аппаратах и установках.

Применение различных преобразований этих уравнений и введение дополнительных коэффициентов в ряде случаев обеспечивает более точное воспроизведение физических процессов, протекающих в циклонных устройствах.

2.1 Теоретические предпосылки описания движения частиц в циклоне

В исследовании [77] авторы исходили из предположения, что результативность воздушной сепарации в наибольшей степени определяется действием на частицу двух основных сил — центробежной и инерционной. При формировании математической модели разделения твёрдых частиц, поступающих в зону сепарации, были приняты следующие допущения:

1. Объёмное содержание твёрдой фазы в рассматриваемом процессе незначительно, поэтому столкновения частиц между собой можно не учитывать.

2. Гидродинамическое действие на частицу описывается коэффициентом аэродинамического сопротивления C_d , зависящим от её размера и геометрической формы. Поскольку частицы различаются по этим параметрам, их предварительно распределяют на фракции.

3. При выводе системы базовых уравнений, описывающих движение двухфазной рабочей среды (уравнение неразрывности, уравнение сохранения

количества движения, уравнение энергии и уравнение состояния), поток частиц рассматривается как сплошная фаза, взаимодействующая с газовой средой по законам газо-частичных взаимодействий.

Соответственно, в работе [77] для описания газовой фазы получена система уравнений следующего вида:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{dp}{dt} + p \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rV}{\partial r} \right) = 0; \quad (2.1)$$

–уравнение количества движения:

$$p \frac{dU}{dt} = pF_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right] - F_{fz}; \quad (2.2)$$

$$p \frac{dV}{dt} = pF_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \left[\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rz}) \right] - F_{fr}; \quad (2.3)$$

–уравнение энергии:

$$\begin{aligned} p \frac{dE}{dt} &= p(F_z U + F_r V) - \left(\frac{\partial PU}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial rPV}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_z U + \tau_{rz} V) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\tau_{tz} U + \sigma_r V)] - e_f; \end{aligned} \quad (2.4)$$

– уравнения состояния $P = \rho RT$, где R - универсальная газовая постоянная

Соответствующие уравнения для концентрированной фазы имеют вид [77]:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{dp_k}{dt} + p_k \left(\frac{\partial U_k}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rV_k}{\partial r} \right) = 0; \quad (2.5)$$

–уравнение количества движения:

$$p_k \frac{dU_k}{dt} = p_k \cdot F_{zk} + F_{tz}; \quad (2.6)$$

$$p_k \frac{dV_k}{dt} = p_k F_{rk} + F_{tr}; \quad (2.7)$$

-уравнение энергии:

$$p_k \frac{dE_k}{dt} = p_k (F_{zk} U_k + F_{rk} V_k) + e_f, \quad (2.8)$$

$$E = \frac{c_v T + (U^2 + V^2)}{2}; U; V$$

где – составляющие скорости по осям z и r;

F_f, F_z – компоненты массовой силы;

σ – напряжение вязкости;

$\vec{F}_f = \frac{1}{8} C_\delta \rho \pi \delta^2 |W - W_k| \times (\vec{W} - \vec{W}_k)$ – приведенные силы межфазового взаимодействия;

$C_\delta = C_x \cdot C_{ef}$ – коэффициенты аэродинамического сопротивления частицы сложной формы;

C_{ef} и C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы идеальной сферической формы и коэффициент отклонения формы от сферической;

$e_f = F_f \cdot |W - W_k|$ – энергия межфазного взаимодействия.

В работе [9] была предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать вихревое движение и оценивать эффективность действия закрученных турбулентных потоков. Для этого реальные значения скорости и давления (V, P) представлены как сумма усреднённых (\bar{V}, \bar{P}) и пульсационных (V', P') компонентов: $V = \bar{V} + V', P = \bar{P} + P'$.

На основе такого разложения и исходя из уравнений Навье–Стокса формируется уравнение Рейнольдса, которое, помимо средних компонент скорости и давления, содержит дополнительные неизвестные величины – напряжения Рейнольдса $\sigma_{ij} = -\rho \bar{V}_i \bar{V}'_j$.

Путём соответствующих преобразований уравнений Рейнольдса можно

вывести систему уравнений, описывающих непосредственно эволюцию этих напряжений. В таком виде уравнения для напряжений Рейнольдса принимают вид:

$$\begin{aligned} p \bar{V}_k \frac{\partial \bar{V}_i \bar{V}'_j}{\partial X_k} = & -p \left(V_i V'_k \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial X_k} + \bar{V}'_j V'_k \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial X_k} \right) + \bar{P}' \left(\frac{\partial \bar{V}'_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{V}'_j}{\partial X_i} \right) - \\ & - p \frac{\partial}{\partial X_k} (\bar{V}_i \bar{V}'_j \bar{V}'_k) - \left[\frac{\partial}{\partial X_i} (\bar{P}' \bar{V}'_j) + \frac{\partial}{\partial X_j} (\bar{P}' \bar{V}'_i) \right] + \mu \left(V_i' \frac{\partial^2 V'_j}{\partial X_k^2} + V'_j \frac{\partial^2 V'_i}{\partial X_k^2} \right). \end{aligned} \quad (2.9)$$

При формировании системы уравнений для турбулентных напряжений рассматривают все возможные комбинации индексов i и j , что приводит к получению шести уравнений для шести независимых компонент. Каждый член этих уравнений отражает определённый физический механизм переноса и преобразования турбулентной энергии σ_{ij} .

Так, члены, отвечающие за перенос напряжений средним потоком, показывают, как турбулентные колебания перемещаются вместе с основной скоростью газа. Влияние пульсаций скорости и давления учитывается отдельными членами уравнения, которые характеризуют локальные флуктуации потока и их воздействие на перераспределение турбулентной энергии. Вязкие напряжения, включённые в модель, описывают затухание турбулентности под действием внутреннего трения среды. Порождение или рассеяние турбулентных напряжений за счёт взаимодействия пульсаций давления и вязких сил отражает механизмы генерации или диссипации турбулентной энергии на микроуровне. Наконец, члены, связанные с взаимодействием турбулентного движения и поля средней скорости деформации, демонстрируют, как градиенты основного потока усиливают или подавляют отдельные компоненты турбулентного напряжения.

При этом уравнения включают новые неизвестные величины $\bar{P}' \bar{V}_i \bar{V}'_j \bar{V}'_k$ – корреляционные моменты третьего порядка, которые описывают взаимосвязь трёх компонент скорости и вносят дополнительную сложность в систему. Для

замыкания и практического решения системы необходимо вводить ряд дополнительных гипотез и аппроксимаций, позволяющих выразить эти моменты через известные величины и обеспечить математическую замкнутость модели. Подробное изложение этих подходов приведено в работе [9].

Для замыкания уравнений Рейнольдса было предложено рассмотреть две группы моделей турбулентности. Первая группа моделей турбулентности основана на так называемых двухпараметрических моделях. Например, k - ε модель, описывает турбулентные напряжения в уравнениях Рейнольдса через кинетическую энергию турбулентности k и диссипацию турбулентности ε . В этой модели напряжения Рейнольдса рассчитывались на основе концепции эффективной вязкости:

$$-\sigma_{ij} = (\nu_t) \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot k \delta_{ij}, \quad (2.10)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера,

k – энергия пульсационного движения. Эффективная вязкость связана с указанными параметрами уравнением Колмогорова [19]:

$$\nu_t = c_\mu \cdot (k^2 / \varepsilon), \quad (2.11)$$

где c_μ – эмпирическая константа. Для расчета k и ε , в случае осесимметричных течений, для больших чисел Рейнольдса, получаем следующие уравнения переноса:

$$\begin{cases} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial k}{\partial y} \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial k}{\partial z} \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) + G - \varepsilon; \\ U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + c_1 \cdot \varepsilon / k \cdot G - c_2 \cdot \varepsilon^2 / k; \end{cases} \quad (2.12)$$

$$G = v_t \cdot \left[\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (2.13)$$

здесь G – величина, характеризующая генерацию кинетической энергии турбулентности.

Вторую группу работ можно назвать моделями турбулентности второго порядка. В них компоненты напряжений Рейнольдса описываются системой приближенных уравнений переноса, которые решаются вместе с уравнениями для осредненного течения. Например, замыкание для напряжений Рейнольдса в модели LRR [29] выводится из следующей системы уравнений переноса:

$$\overline{\left(\frac{DV_i V_j}{Dt} \right)} = P_{ij} + \Phi_{ij} - \frac{2}{3} \cdot \varepsilon \delta_{ij} + D_{ij}. \quad (2.14)$$

В данной системе четыре члена правой части уравнения описывают соответственно порождение, перераспределение напряжений и т.п. Для этих членов формируются и моделируются соответствующие уравнения переноса.

При этом уравнения для замыкания основной системы Рейнольдса в базовых моделях, в большей своей части содержат ряд неизвестных членов, которые моделируются полуэмпирическими уравнениями. В результате чего появляется ряд неизвестных параметров, которые уточняются по экспериментальным исследованиям канонических развитых турбулентных течений [9].

Для более точного представления теоретического исследования процесса движения осажденной частицы по цилиндрической и конической поверхностям циклона, Каргашилов Д.В. предлагает следующие уравнения движения частиц. Для этого он об условился рядом допущений, а именно пыль имеет форму шара диаметром d ; размеры и форма частиц не изменяются, дробление и коагуляция частиц не учитываются. Так же, частицы движутся изолированно, не контактируя друг с другом [39].

В результате, дифференциальное уравнение движения центра масс

частицы учитывает наиболее значимые силы, в том числе, подъемную силу, обусловленную эффектом Магнуса и способствующую отрыву частицы от поверхности стенки циклона:

$$m\bar{a}_c = \bar{P} + \bar{N} + \bar{T} + \bar{F}_c + \bar{F}_n. \quad (2.15)$$

Величина подъемной силы получена в результате интегрирования формулы Релея $F = \pi d \rho_e v_0^2$ по диаметру d частиц: $F_n = 0,25 \pi \rho_e v_0^2 d^2$.

В случае движения по цилиндрической поверхности уравнение рассматривается в проекции на оси $[r]$, $[\varphi]$, $[z]$ цилиндрической системы координат:

$$N = mr\varphi^2 + \eta u_r - 0.25\pi\rho_e v_0^2 d^2; \quad (2.16)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{N}{m} f \frac{\dot{\varphi}}{v} + \frac{\eta}{mr} (u_\varphi - r\dot{\varphi}); \quad (2.17)$$

$$\ddot{z} = g - \frac{N}{m} f \frac{\dot{z}}{v} + \frac{\eta}{m} (u_z - \dot{z}), \quad (2.18)$$

где $\eta = 3\pi d \mu_e$; $v = \sqrt{r^2 \varphi^2 + \dot{z}^2}$ — абсолютная скорость частицы;

$v_0 = \sqrt{u_r^2 + (u_\varphi - r\dot{\varphi})^2 + (u_z - \dot{z})^2}$ — скорость частицы по отношению к воздушному потоку в цилиндрической системе координат.

При изучении движения по конической поверхности, уравнение записывается в проекции на оси $[r]$, $[\theta]$, $[\varphi]$ сферической системы координат [39]:

$$N = m \sin \theta (g + r\dot{\varphi}^2 \cos \theta) + \eta u_\theta - 0.25\pi\rho_e v_0^2 d^2; \quad (2.19)$$

$$\ddot{r} = -g \cos \theta - f \frac{N \dot{r}}{m v} + \frac{\eta}{m} (u_r - \dot{r}) + r\dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta; \quad (2.20)$$

$$\ddot{\varphi} = -f \frac{N \dot{\varphi}}{m v} + \frac{\eta}{m} \left(\frac{u_\varphi}{r \sin \theta} - \dot{\varphi} \right) - \frac{2}{r} \dot{r} \dot{\varphi}, \quad (2.21)$$

где $v = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi} \sin \theta)^2}$ — абсолютная скорость частицы;

$v_o = \sqrt{(u_r - \dot{r})^2 + u_0^2 + (u_\phi - r\dot{\phi}\sin\theta)^2}$ – скорость частицы по отношению к воздушному потоку в сферической системе координат.

При движении по конической поверхности, реакция N увеличивается для тонкодисперсных частиц и снижается для грубодисперсных. Для каждого размера частиц существует граничное значение в Θ , при котором значения N в начале и конце рабочей зоны равны. Для предотвращения обратного уноса предпочтительнее использование углов в диапазоне $\Theta^* < \Theta < \Theta^{**}$, где Θ^{**} – угол, рассчитанный из условия $R_k = d_{\text{вых}}/2$. Выбор Θ следует производить для наименьшего размера улавливаемых частиц.

При движении по цилиндрической поверхности частица находится в состоянии близком к квазистационарному: $u_\phi \approx v_\phi$. Угол β наклона к горизонту касательной к траектории определяется выражением [39]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\dot{z}}{r\dot{\phi}} = \frac{\eta u_z + mg}{\eta u_\phi}. \quad (2.22)$$

Таким образом, при разработке математических моделей движения пылегазового потока в вихревых аппаратах необходимо введение ряда допущений, определяющих начальные граничные условия, а также проведение экспериментальных исследований для получения полуэмпирических зависимостей, дополняющих и уточняющих теоретические уравнения. Поскольку полученные системы теоретических уравнений, зачастую не имеют аналитического решения, и решаются численными методами. В работах [23, 32, 35, 87], рассматривается движение частиц, подробные уравнения для расчетов эффективности, а также учитывается мультифазность потоков внутри циклонных аппаратов [108].

2.2 Расчёт гидравлического сопротивления циклонных аппаратов

Гидравлическое сопротивление циклонных аппаратов необходимо рассчитывать для оптимизации их работы и обеспечения экономичности

эксплуатации. Во-первых, гидравлическое сопротивление напрямую влияет на энергозатраты: более высокое сопротивление требует большей мощности вентиляторов или насосов, что увеличивает эксплуатационные расходы. Расчет гидравлического сопротивления позволяет оптимизировать конструкцию циклона, снижая потребление энергии и повышая экономичность процесса [104]. Во-вторых, гидравлическое сопротивление связано с турбулентностью потока внутри циклона, что может влиять на эффективность отделения частиц. Оптимизация сопротивления помогает достигать лучшего баланса между низкими энергозатратами и высокой эффективностью сепарации [111]. Кроме того, высокое гидравлическое сопротивление может приводить к повышенному износу оборудования, особенно вентиляторов и насосов. Предотвращение чрезмерного сопротивления помогает продлить срок службы оборудования и снизить затраты на его обслуживание [99]. Наконец, неравномерное распределение сопротивления может привести к нестабильной работе циклона, что снижает общую производительность системы. Расчеты позволяют обеспечить равномерное распределение потока и стабильную работу [101].

В пункте 1.3 проведён анализ двух ключевых схем пневмотранспортного перемещения сырья из пневмодробилки в смеситель: непосредственно через нагнетательное устройство и с использованием циклона-разгрузителя. Применение схемы с циклоном-разгрузителем обеспечивает существенное снижение потерь материала в окружающую среду за счёт высокой эффективности пылеулавливания, которая, согласно данным [14], достигает 95-98 %.

При проектировании и расчёте таких систем необходимо учитывать значительное гидравлическое сопротивление, оказывающее влияние на среднюю скорость транспортируемого потока на всём протяжении пневматической линии. Общее сопротивление системы пневмотранспорта формируется суммой сопротивлений всех элементов, участвующих в

перемещении продукта, включая трубопроводы, колена, тройники и другие пневмоэлементы, что непосредственно определяет энергетические затраты установки.

В частности, для определения гидравлического сопротивления нагнетательной части установки комбикормового мини-завода с циклоном-разгрузителем требуется вычислить сопротивление как самого циклонного аппарата, так и трубопровода, соединяющего пневмодробилку – выступающую в данной схеме в роли нагнетательного устройства – с циклоном [67].

Расчёт характеристик нагнетательного и вакуумного пневмотранспорта для движения чистого, не содержащего пыли воздуха выполняется по формуле (2.23).

Сопоставление результатов теоретических вычислений с экспериментальными данными показало их высокую согласованность, что подтверждает применимость используемой методики для проектирования и оптимизации пневмотранспортных линий [22].

$$\Delta P_B = \lambda_B \frac{L_{\text{пр}}}{d_t} \frac{V_B^2 \gamma_B}{2g}, \quad (2.23)$$

где λ_B – коэффициент сопротивления, который зависит от числа Рейнольдса и от состояния внутренней поверхности трубопровода;

$L_{\text{пр}}$ – приведенная длина транспортирования, м;

d_t – диаметр трубопровода, м;

V_B – скорость движения воздуха, м/с;

γ_B – объемная масса воздуха, кг/м³.

В качестве гибких трубопроводов на комбикормовых мини-заводах применяются пластиковые трубы с армирующим слоем. По результатам исследований, проведённых в научных и исследовательских институтах Германии, Швейцарии, Италии, Франции, Англии, США и других стран, установлено, что пластиковые трубы обладают гидравлически гладкой

поверхностью [94].

Для гладких труб коэффициент сопротивления определяется выражением (2.24):

$$\lambda_b = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (2.24)$$

где Re – число Рейнольдса, определяемое в зависимости от характеристик движения воздуха.

Для учета потерь давления, вызываемых местными сопротивлениями, определяют по формуле (2.25):

$$\Delta P_{MC} = \xi \frac{V_b^2 \gamma_b}{2g}, \quad (2.25)$$

где ξ – коэффициент сопротивления, зависящий от углов изгиба трубопровода.

$$\xi = \xi_0 AB, \quad (2.26)$$

здесь ξ_0 – табличный коэффициент;

A – коэффициент, определяемый из таблицы в зависимости от числа Рейнольдса;

B – коэффициент, определяемый в зависимости от угла поворота трубопровода.

Приведенная длина транспортирования определяется из выражения:

$$L_{\text{пр}} = \sum l_r + \sum l_b + \sum l_{\text{эмс}}, \quad (2.27)$$

где $\sum l_r$ – сумма длин горизонтальных участков, м;

$\sum l_b$ – сумма длин вертикальных участков, м;

$\sum l_{\text{эмс}}$ – сумма длин элементов местных сопротивлений;

По расчетам формул 2.23–2.27 возможно рассчитать потери давления при движении чистого воздуха в пневмопроводе идущего от дробилки до циклона разгрузителя в Па.

Основная формула для определения гидравлического сопротивления циклона Δp , Па [51]:

$$\Delta p = \zeta \frac{pw^2}{2}, \quad (2.28)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона;

p – плотность газа, кг/м³;

w – условная скорость газа в циклоне, м/с.

При этом коэффициенты циклонов различных типов существенно отличаются, возрастая вместе с эффективностью пылеулавливания.

Существует два типа коэффициента гидравлического сопротивления циклона (приведенных к условной скорости потока ζ (2.28) и к средней скорости газа во входном патрубке $\zeta_{\text{вх}}$ (2.29) [51]):

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{pw^2}; \quad (2.29)$$

$$\zeta_{\text{вх}} = \frac{2\Delta p}{pw_{\text{вх}}^2}, \quad (2.30)$$

где w – условная скорость газа в циклоне, (скорость в плане), м/с ;

$w_{\text{вх}}$ – средняя скорость во входном патрубке соответственно, м/с.

Коэффициент сопротивления для каждого типа циклонного аппарата, как правило, определяется экспериментально на чистом, не содержащем пылевых частиц, газе и принимается постоянной величиной для дальнейших расчётов. Кроме того, данный коэффициент может быть вычислен с использованием методов численного моделирования движения потока внутри циклона, что позволяет учитывать сложные эффекты распределения скорости и турбулентности, характерные для закрученных вихревых потоков.

Одним из программных средств, применяемых для подобных расчётов, является SolidWorks Flow Simulation, в котором гидравлическое сопротивление циклонного аппарата определяется на основе результатов моделирования динамики потока. Такой подход позволяет не только оценить сопротивление в процессе проектирования, но и оптимизировать конструкцию и режим работы пневмотранспортной линии без необходимости проведения дорогостоящих физических экспериментов, коэффициент гидравлического сопротивления определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_{01} - P_{02}}{\frac{\rho V^2}{2}}, \quad (2.31)$$

где P_{01} – давление на выходе, Па;

P_{02} – давление на входе, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

V – средняя скорость, м/с.

Отсюда можно определить гидравлическое сопротивление $P_{01} - P_{02}$, Па: $P_{01} - P_{02} = \Delta p$, (из формулы 2.31).

Таким образом, расчет гидравлического сопротивления через основные формулы гидродинамики и расчет с помощью современного программного обеспечения являются идентичными действиями. При этом возможность использования современного ПО для расчета гидравлических потерь, повышает скорость и точность расчётов.

2.3 Моделирование движения частиц во второй ступени очистки

Для оценки эффективности двухступенчатого циклона и выбора оптимальных конструктивно-режимных параметров требуется теоретическое описание процессов движения и сепарации частиц во второй ступени аппарата. Ниже приводится математическая модель, учитывающая геометрию вихревой воронки, характеристики воздушного потока и действующие на частицу силы, что позволяет выполнить последующее численное моделирование и анализ полученных траекторий.

Модель отделения мелкодисперсных частиц продуктов дробления зерна от воздушного потока представлена на Рисунке 2.1.

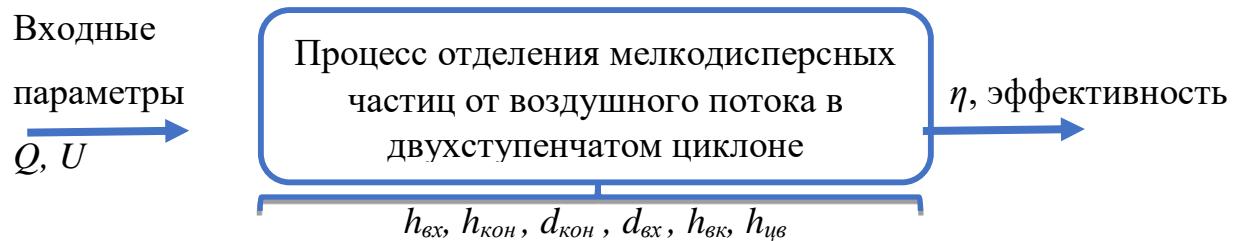


Рисунок 2.1 – Модель процесса отделения мелкодисперсных частиц продуктов дробления зерна в двухступенчатом циклоне.

В качестве входных параметров принято: Q – концентрация материала, кг/с; U – скорость воздушного потока, м/с. Управляющими воздействиями

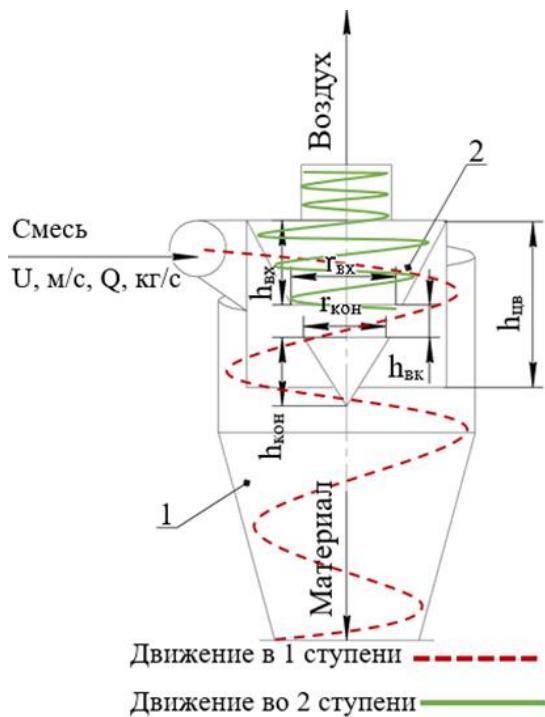


Рисунок 2.2. – Схема работы предлагаемого двухступенчатого циклона:

- 1 – цилиндроконический корпус;
- 2 – вихревая воронка (вторая ступень очистки)

2.2) требует теоретических описаний и предпосылок. Таким образом, работа второй ступени основывается на теоретическом анализе движения частиц в изменяющем поле распределенного давления, и как следствие изменения скорости потока в вихревые воронки. В качестве вихревой воронки (рисунок 2.3) рассматривается геометрия усеченного конуса с высотой H , с радиусом основания r_{min} и радиусом верхнего сечения r_{max} , в верхней части которого установлен выходной патрубок в виде цилиндра с постоянным радиусом $r_{ц}$ по оси z и высотой $H_{ц}$. Координатная ось направлена вдоль оси аппарата, вверх. Для описания системы движения

являются: $h_{вх}$ – высота вихревой воронки, мм; $h_{кон}$ – высота конического отбойника, мм; $d_{кон}$ – диаметр конического отбойника, мм; $d_{вх}$ – диаметр вихревой воронки, мм; $h_{вк}$ – расстояние от конического отбойника до воронки, мм; $h_{цв}$ – высота цилиндрической вставки, мм. Выходным параметром является η – эффективность циклона %. Для описания движения частицы в циклоне с тангенциальным – осевым входом учитывается комплексное воздействие гравитационных и центробежных сил, движение в стандартном циклонном аппарате, без использования второй ступени очистки, ранее уже описаны в множествах работах, при этом использование второй ступени (рисунок

частицы во второй ступени, необходимо внести ограничения, основываясь на геометрии второй ступени аппарата. Радиус конуса в сечении на высоте z задается линейной функцией:

$$r_k(z) = r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{H} z, 0 \leq z \leq H. \quad (2.32)$$

Цилиндр расположенный над конусом в области $H < z \leq H + H_{\text{ц}}$ с постоянным радиусом $r_u(z) = \text{const}$. Область пространства, где находится частица, ограничена:

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq \begin{cases} r_k(z), & 0 \leq z \leq H, \\ r_u, & H < z \leq H + H_{\text{ц}}, \end{cases} \quad (2.33)$$

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

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

$$A(z):U_z(z) = \frac{Q}{A(z)}, \quad A(z) = \begin{cases} \pi r_k^2(z), & 0 \leq z \leq H \\ \pi r_u^2, & H < z \leq H + H_{\text{ц}}. \end{cases} \quad (2.34)$$

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

$$\begin{cases} U_x = -U_\theta(r) \sin \theta, \\ U_y = U_\theta(r) \cos \theta, \quad \theta = \text{arctan2}(y, x) \\ U_z = U_z(z), \end{cases} \quad (2.35)$$

где $\text{arctan2}(y, x)$ – это обобщённая арктангенс-функция, возвращающая значение угла θ в диапазоне $(-\pi, \pi]$ с учётом знаков x и y , в отличие от обычной функции $\text{arctan2}(y, x)$ не определённой при

Рисунок 2.3. – Схема определения геометрических ограничений.

$x=0$ и не различающей направления в разных квадрантах.

Такой подход обеспечивает корректное преобразование координат при описании вихревого движения и исключает неоднозначности при расчётах в численной модели. Для определения положения пылегазовой частицы в вихревой воронки, примем что частица представляется как материальная точка с идеальной сферической формой, диаметром d_q , плотностью ρ_q , находящаяся под действием вихревого воздушного потока с плотностью ρ_Γ , динамической вязкостью μ . На частицу действуют следующие силы (рисунок 2.4): сила сопротивления, $\vec{F}_c = \frac{m_q}{\tau_q} (U_\Gamma - U_q)$, сила тяжести, $\vec{F}_t = m_q g$, сила Архимеда, $\vec{F}_a = -V_q p_\Gamma g$, центробежная сила $\vec{F}_\text{ц} = m_q a_\text{ц}$. В системе движения частицы в проекциях на $x, y, zr = (x, y, z)$ – положение частицы, $U = (U_x, U_y, U_z) = \frac{dr}{dt}$ – скорость частицы, $V_\Gamma = (V_x, V_y, V_z)$ – скорость газа в точке частицы. Масса частицы: $m_q = \frac{\pi}{6} \rho_q d_q^3$, время релаксации частицы $\tau_p = \frac{\rho_q d_q^2 C_c}{18 \mu}$, где C_c – поправка Каннингема. Движение частицы по второму закону Ньютона для данной системы примет вид:

$$m_q \frac{dU}{dt} = \vec{F}_c + \vec{F}_t + \vec{F}_a + \vec{F}_\text{ц} . \quad (2.36)$$

В инерциальной системе координат центробежная сила формально не действует, но чтобы учесть эффект вращения, вводится центробежное ускорение $a_\text{ц}$ (2.39), которое добавляется в правую часть уравнения движения (2.37) и (2.38). Это эквивалентно рассмотрению движения в локально врачающейся системе отсчета.

Подставив выражение сил и разделив на m_q получаем:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (V_\Gamma - U) + g \left(1 - \frac{p_\Gamma}{p_q} \right) + a_{\text{ц},x,y} . \quad (2.37)$$

При проецировании приложенных сил на оси с учетом координат получим выражение:

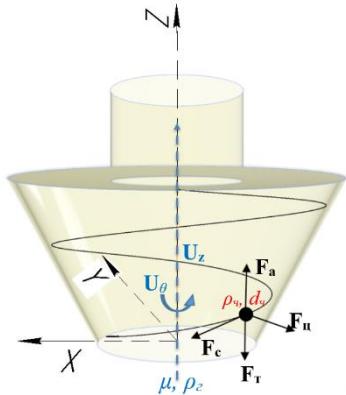


Рисунок 2. 4. – Схема сил, действующих на частицу пыли в вихревой воронке.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_x, \frac{dy}{dt} = U_y, \frac{dz}{dt} = U_z \\ \frac{dU_x}{dt} = \frac{V_x - U_x}{\tau_p} + a_{\text{ц},x} \\ \frac{dU_y}{dt} = \frac{V_y - U_y}{\tau_p} + a_{\text{ц},y}, \\ \frac{dU_z}{dt} = \frac{V_z - U_z}{\tau_p} - g(1 - \frac{p_r}{p_q}) \end{cases} . \quad (2.38)$$

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

Тогда центробежное ускорение, направленное радиально наружу, определяется выражением:

$$\begin{cases} a_{\text{ц},x} = \frac{U_\theta^2}{r^2} x \\ a_{\text{ц},y} = \frac{U_\theta^2}{r^2} y \end{cases} . \quad (2.39)$$

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

При решении системы уравнений необходимо учитывать граничные условия и ограничения, которые ограничиваются геометрией (2.32). А также при достижении стенок вихревой воронки, либо выхода за пределы по оси z , движение считается завершённым и необходимо завершить интегрирование.

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

При расчёте траектории движения частицы необходимо учитывать неравномерную структуру ядра потока, формирующуюся в вихревой воронке, поток проходит через усечённый конус и цилиндрическую вставку с меньшим радиусом. Это вызывает сжатие центральной части потока и перераспределение осевой и радиальной составляющих скорости (рисунок 2.5). В результате формируется неравномерное вихревое ядро с усиленной централизацией, что оказывает заметное влияние на траекторию движения

частиц.

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

- расширение усеченного конуса, k_1 (2.40);
- переход потока в цилиндрическую вставку с меньшим радиусом, k_2 (2.41).

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

$$k_1 = \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}}\right)^2 ; \quad (2.40)$$

$$k_2 = \left(\frac{r_{\Pi}}{r_{\max}}\right)^2 . \quad (2.41)$$

Однако учитывая, что центробежное ускорение уже пропорционально радиусу (2.39), окончательный вид коэффициента необходимо задать в линейной форме и определять, как среднегеометрическое значение:

$$k = \sqrt{k_1 \cdot k_2} = \frac{r_{\min} \cdot r_{\Pi}}{r_{\max}^2} . \quad (2.42)$$

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

Данный коэффициент применяется исключительно к центробежному ускорению, так как именно оно зависит от радиального распределения скоростей. Тогда система уравнений движения частиц (2.38) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_x, \frac{dy}{dt} = U_y, \frac{dz}{dt} = U_z \\ \frac{dU_x}{dt} = \frac{V_x - U_x}{\tau_p} + k \cdot a_{u,x} \\ \frac{dU_y}{dt} = \frac{V_y - U_y}{\tau_p} + k \cdot a_{u,y}, \\ \frac{dU_z}{dt} = \frac{V_z - U_z}{\tau_p} - g(1 - \frac{p_r}{p_q}) \end{cases} . \quad (2.43)$$

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

$$\begin{cases} x(\Delta t) = x + U_x \Delta t + \frac{1}{2}((V_x - U_x) \cdot \frac{18\mu}{p_q \cdot d_q^2 \cdot C_c} + k a_{u,x}) \cdot (\Delta t)^2 \\ y(\Delta t) = y + U_y \Delta t + \frac{1}{2}((V_y - U_y) \cdot \frac{18\mu}{p_q \cdot d_q^2 \cdot C_c} + k a_{u,y}) \cdot (\Delta t)^2 \\ z(\Delta t) = z + U_z \Delta t + \frac{1}{2}((V_z - U_z) \cdot \frac{18\mu}{p_q \cdot d_q^2 \cdot C_c} - g(1 - \frac{p_r}{p_q})) \cdot (\Delta t)^2 \end{cases} . \quad (2.44)$$

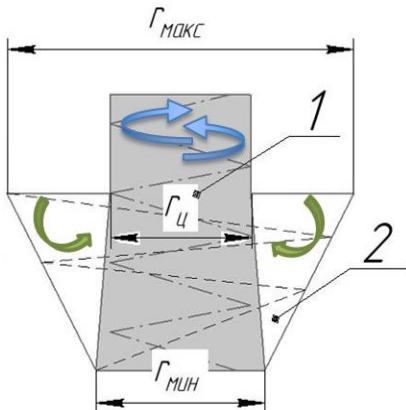


Рисунок 2.5. – Схема распределения потоков:
1 – ядро потока; 2 – радиальный поток.

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

На основе системы уравнений (2.43), численно решённой в среде Python с использованием библиотеки SciPy (функция solve_ivp) методом Рунге–Кутты 8-го порядка (DOP853), при принятых размерах $r_u = 75$ мм и $r_{max} = 175$ мм, с рассчитанным коэффициентом $k = 0,22$, построены траектории движения частиц размерностью от 10, 80, 150 мкм. Результаты моделирования

траекторий представлены на рисунке 2.6.

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

Представленная система уравнений (2.32–2.44), описывающая газодинамику и траекторию движения частиц в двухступенчатом циклоне, служит теоретической основой для численного моделирования процессов в CFD-пакетах.

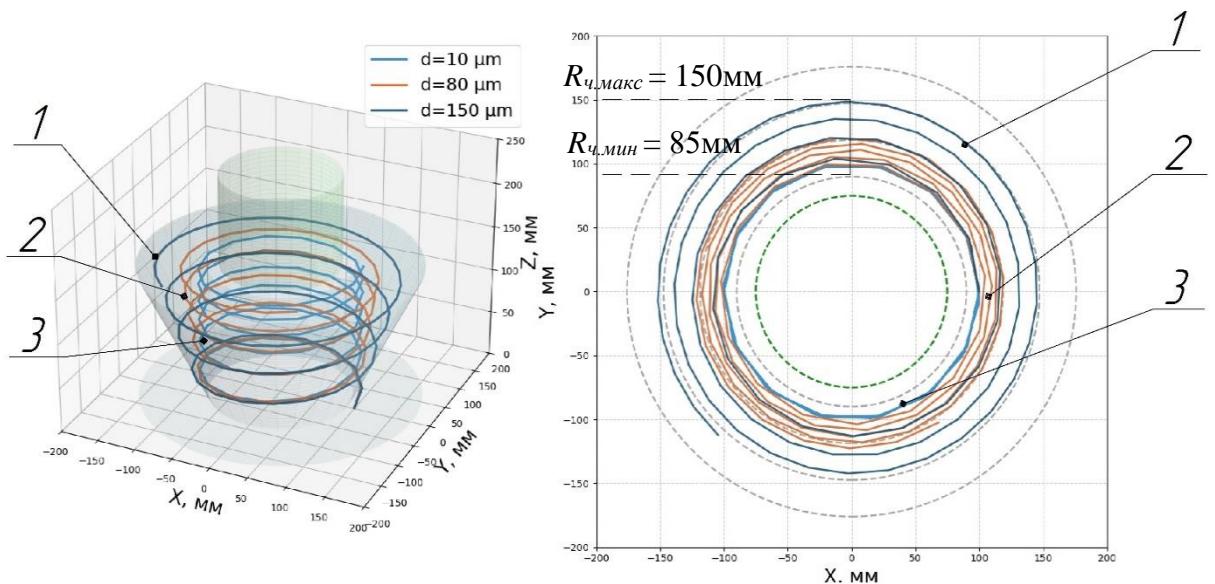


Рисунок 2.6. – Схема траекторий движения частиц:

1 – траектория частицы размером 150 мкм; 2 – траектория частицы размером 80 мкм; 3 – траектория частицы размером 10 мкм.

На основе данной модели, реализуется процесс моделирования в SolidWorks FlowSimulation, методом конечных объёмов.

2.4 Обзор современных CFD подходов к моделированию движения частиц в циклоне

В последние десятилетия моделирование движения твердых и газовых фаз в устройствах пылеулавливания, включая циклонные сепараторы, стало важной составляющей в инженерной практике при проектировании и оптимизации оборудования [34, 10, 84]. Одним из наиболее эффективных и широко используемых методов является вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD), позволяющая получать детализированную картину распределения скоростей, давления и траекторий частиц в объемах сложной геометрии [103, 98, 95].

Применение CFD позволяет не только сократить количество дорогостоящих натурных экспериментов, но и получить данные о явлениях, недоступных для прямого измерения, таких как турбулентные вихри, области застойных зон или рециркуляции. Для решения таких задач разрабатываются и активно используются численные методы, включая конечно-объемный (FVM), конечно-элементный (FEM), метод конечных разностей (FDM) и их модификации, основанные на уравнениях Навье–Стокса и моделях турбулентности [98].

Среди наиболее авторитетных и распространённых программных решений можно выделить такие пакеты, как ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics, STAR-CCM+, а также специализированные решения, адаптированные под узкие классы задач. Эти программы позволяют реализовывать модели Эйлер–Лагранжа, многокомпонентные течения, фазовые переходы и учитывать сложные физико-химические взаимодействия [103, 98].

Особое внимание в области моделирования уделяется исследованию эффективности циклонов и определению их гидравлического сопротивления, влияющего на энергопотребление и производительность. Исследования последних лет показывают высокую точность CFD-подходов при воссоздании

реальных условий эксплуатации циклонов, включая учет формы корпуса, высоты и угла наклона конуса, а также характеристик вводимой пылевоздушной смеси [119, 120, 113].

Так, в работе [119] проведено моделирование газо-твёрдого потока в циклонах при различных температурах, что позволило оценить влияние тепловых условий на эффективность разделения. Wasilewski и Duda [120] исследовали геометрию циклона и её влияние на сопротивление и пылеулавливание при помощи параметрических CFD-моделей. Liang [113] реализовал сопряжённую модель CFD-DEM для изучения процесса самоосушения частиц в циклоне, что особенно важно при работе с влажными смесями.

Среди существующих инструментов, обладающих доступным интерфейсом и интеграцией в САПР, следует выделить SOLIDWORKS Flow Simulation, который применяется для визуализации движения газа и твёрдых включений в инженерной практике. Он поддерживает моделирование турбулентных течений, использование граничных условий, задание материалов и расчет давления, скоростей, температуры и траекторий частиц [100, 107].

С учетом вышеуказанных возможностей и необходимости интеграции расчетов в существующие конструкторские схемы, для выполнения моделирования в данной работе была выбрана среда SOLIDWORKS Flow Simulation, которое является удобным решателем гидродинамики для моделирования потоковых процессов в текучей среде, программного комплекса SolidWorks [115]. Работа программного обеспечения основана на методе конечных объемах [117].

Оценку оптимальных конструктивных и энергетических особенностей двухступенчатого циклона следует начинать с выбора текучей среды, протекающей в циклонном аппарате. Текущая среда в циклонных аппаратах – газовая.

2.5 Математические уравнения решателя программного обеспечения для моделирования процесса движения частиц в циклоне

В SolidWorks Flow Simulation движение текучей среды моделируется с использованием уравнений Навье–Стокса, которые в нестационарной постановке описывают законы сохранения массы, импульса и энергии среды [115, 20].

Система уравнений, выражающая законы сохранения массы, импульса и энергии, формулируется в рамках Эйлерова подхода и рассматривается в декартовой системе координат ($x_i, i = 1,2,3$), вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через начало координат.

Такой выбор системы координат позволяет корректно учитывать влияние вращения на распределение скоростей, давления и турбулентной энергии, что особенно важно при моделировании закрученных потоков в циклонных аппаратах и пневмотранспортных линиях.

В рамках указанной декартовой системы координат законы сохранения массы, импульса и энергии для текучей среды могут быть представлены в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k) &= 0, \\ \frac{\partial (p u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\ \frac{\partial (p E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((p E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) &= S_{iporous} u_k + Q_H, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где t – время; u – скорость текучей среды; p – плотность текучей среды; P – давление текучей среды; S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды; $S_{iporous}$ – действие сопротивления пористого тела; $S_{igravity}$ – действие гравитации; $S_{irotation}$ – действие вращения системы координат т.е.

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation}. \quad (2.46)$$

E – полная энергия единичной массы текучей среды; Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды; τ_{ik} – тензор вязких сдвигов напряжений; q_k – диффузионный тепловой поток.

Тензор вязких сдвиговых напряжений определяется:

$$\tau_{ik} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} p k \delta_{ij}, \quad (2.47)$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t \mu_l$ – коэффициент динамической вязкости; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$); k – кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с k – ε моделью турбулентности; μ_t – определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu p k^2}{\varepsilon},$$

$$\text{где } f_\mu = [1 - \exp(-0,025R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right); R_y = \frac{p\sqrt{k}y}{\mu_l}; R_T = \frac{pk^2}{\mu_l \varepsilon}, y - \text{расстояние от поверхности стенки, } C_\mu = 0,09. \quad (2.48)$$

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k k) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \\ \frac{\partial p \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (2.49)$$

здесь

$$\begin{aligned} S_k &= \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - p \varepsilon + \mu_l P_B, \\ S_\varepsilon &= C_{\varepsilon l} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{p \varepsilon^2}{k}, \\ \tau_{ij}^R &= \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} p k \delta_{ij}; P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (2.50)$$

g_i – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i , $\sigma_B = 0,9, C_B = 1$ при $P_B > 0$ и $C_B = 0$ при $P_B \leq 0, f_1 = 1 + (\frac{0,05}{f_\mu})^3, f_2 = 1 - \exp(-R_T^2), C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_\varepsilon = 1,3, \sigma_k = 1$.

Для газов используется уравнение состояния идеального газа $p = P/(RT)$, здесь R – газовая постоянная модулируемого газа: $R = R_{\text{унив}} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{M_i}$, где M_i – молекулярная масса i -го компонента смеси.

Влияние гравитации моделируется с помощью члена $S_{i, gravity}$, входящий в состав суммарной массовой силы [115].

$$S_{i, gravity} = -pg_i, \quad (2.51)$$

где g_i – i -я составляющая (вдоль i -й оси системы координат) вектора гравитационного ускорения.

Двухфазные потоки, содержащие твердые частицы, рассматриваются как движение частиц в установившемся газовом потоке с определёнными допущениями: влияние частиц на газовую фазу по силовым и тепловым параметрам считается пренебрежимо малым, а форма всех частиц независимо от их размеров принимается идеально сферической. Для расчёта аэродинамического сопротивления частиц используется подход Хендерсона [75].

Составляющая скорости частицы, направленная по нормали к поверхности перед столкновением, обозначается как $V_{1,n}$, а по касательной к поверхности — как $V_{1,\tau}$. После соударения эти компоненты скорости принимают значения $V_{2,n}$ и $V_{2,\tau}$ соответственно. На основе этих величин вводятся безразмерные коэффициенты восстановления нормальной и касательной составляющих скорости, которые вычисляются по формулам:

$$e_n = \left| \frac{V_{2,n}}{V_{1,n}} \right|; e_\tau = \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}}. \quad (2.52)$$

Эти коэффициенты позволяют учсть упругость и скольжение частиц

при взаимодействии со стенками аппарата, что важно для точного моделирования движения твёрдой фазы в пневмотранспортной системе.

В случае идеального отражения частицы без потерь кинетической энергии нормальная и касательная составляющие скорости остаются неизменными, то есть $e_n = e_{n\tau} = 1$. При реальных, неидеальных столкновениях значения этих коэффициентов меньше единицы, то есть $e_n < 1$ и $e_\tau < 1$ [75].

В рамках континуальной модели двухфазного потока, где газовая фаза и частицы различных фракций рассматриваются как взаимопроникающие сплошные среды, частицы подразделяются на фракции по признаку, позволяющему однозначно задавать их начальные условия движения в контрольном сечении, от которого ведется расчёт траектории. При взаимодействии частиц со стенкой определяется суммарная интенсивность налипания частиц на поверхности, на которые они осели, по выражению:

$$R_{\Sigma accretion} = \sum_{i=1}^N M_{pi}, \quad (2.53)$$

где N – количество фракций частиц, M_{pi} – расход частиц i -ой фракции, осевших на соответствующие поверхности.

2.6 Генерация сетки решателя

Наряду с выбором уравнений решателя для расчетной модели и постановки граничных условий, немалую роль так же играет задача построения расчетной сетки. После постановки задачи численного моделирования расчёт ведётся на сетке, состоящей из объёмных ячеек параллелепипедной формы, обеспечивающей дискретизацию всей области течения. Процесс формирования расчётной сетки в общем случае реализуется в три этапа:

1. Создание базовой расчётной сетки – выполняется непосредственно после задания всех её параметров, включая размеры ячеек и характер деления области, и обеспечивает исходное разбиение расчётной области.

2. Формирование начальной расчётной сетки – строится на основе базовой сетки после запуска задачи и служит для предварительного решения задачи, позволяя оценить распределение скоростей, давления и других физических величин до дальнейшей оптимизации сетки.

3. Модификация расчётной сетки в процессе расчёта – осуществляется с целью повышения разрешающей способности сетки в областях с резкими изменениями параметров потока, например, вблизи стенок, в зонах сильной турбулентности или на участках с высокими градиентами давления. Такая адаптивная корректировка сетки позволяет улучшить точность расчёта локальных полей скорости и давления, а также обеспечивает более достоверное определение гидравлического сопротивления и других ключевых характеристик пневмотранспортной линии.

Применение адаптивной и качественно спроектированной сетки является критически важным для численного моделирования пневмотранспортных систем, так как точность расчёта гидродинамических характеристик и эффективности транспортировки частиц напрямую зависит от разрешающей способности сетки в критических областях потока.

Для обеспечения корректности решения и достоверности получаемых результатов проводится проверка сходимости по сетке. Этот процесс заключается в проведении серии расчётных запусков с постепенным увеличением числа ячеек сетки (уменьшением размеров отдельных ячеек) до тех пор, пока ключевые расчётные показатели не перестанут изменяться при последующих трёх последовательных увеличениях плотности сетки. Достигение такого состояния свидетельствует о том, что решение является независимым от сетки и обеспечивает надежность результатов.

2.7 Выводы по главе

1. Установлено, что в основе описания движения газовых сред в проектируемых устройствах, лежат уравнения Навье-Стокса и Эйлера, на

которые необходимо наложить ряд ограничений и допущений, решение которых осуществляется численным методом.

2. Показано, что гидравлическое сопротивление циклонных аппаратов зависит от геометрии, состояния внутренней поверхности, средней скорости газа, суммарных коэффициентов местных сопротивлений. Существующие эмпирические методы его расчёта не всегда обеспечивают необходимую точность, особенно при проектировании новых геометрически сложных конструкций циклонных аппаратов.

3. Получена система уравнений, описывающая траектории движения частиц в вихревой воронке с учетом поправочного расчетного коэффициента k , отражающего влияние формы второй ступени циклона на характер действия центробежных сил и траекторию движения частиц.

4. Обосновано, что применение численного моделирования (CFD) на основе уравнений Навье–Стокса и моделей турбулентности для оценки параметров внутреннего потока в циклоне, а также определение гидравлического сопротивления, широко используется при проектировании новых аппаратов с достаточной точностью.

5. Установлено, что использование программного обеспечения SolidWorks FlowSimulation позволяет детально анализировать аэродинамические характеристики циклона, визуализировать структуру потока и определить зоны наибольших потерь давления, что способствует повышению точности расчётов и оптимизации конструкции.

6. Выявлено, что для обеспечения требуемой точности расчета, необходимо проводить калибровку сетки решателя для успешной верификации результатов.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения основных теоретических положений работы, а также для определения рациональных режимных и конструктивных параметров двухступенчатого циклона линии производства комбикормов, проведены экспериментальные исследования, программа исследований включала:

1) Численное моделирование:

- проектирование параметрической 3d-модели двухступенчатого циклона-разгрузителя для изменения размеров: вихревой воронки; конического отбойника; цилиндрической вставки; расстояние между отбойником и вихревой воронкой.
- проведение поисковых численных экспериментов с целью выявления влияния отдельных параметров на эффективность отделения и определение рабочего диапазона интервалов варьирования исследуемых параметров.
- составление матрицы многофакторного эксперимента и его проведение в среде численного моделирования в ПО SolidWorks Flow Simulation.

2) Проведение эксперимента

- разработка и изготовление экспериментальной установки для изучения аэродинамических параметров воздушного потока, влияющих на протекание процесса отделения мелкодисперсных компонентов;
- составление матрицы многофакторного эксперимента и проведение лабораторных испытаний;
- проведение сравнительных испытаний с серийно выпускаемой моделью;
- определение рациональных технологических и конструктивных параметров двухступенчатого циклона-разгрузителя;
- проведение производственных испытаний экспериментального

образца двухступенчатого циклона-разгрузителя.

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

3.1 Калибровка расчетной сетки и выбор оптимальной конфигурации

Для обеспечения численной устойчивости и достоверности результатов моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation была проведена калибровка расчетной сетки — процедура оценки влияния степени дискретизации расчетной области на значения ключевых параметров. Согласно рекомендациям [107, 116], обязательным этапом CFD-анализа является исследование сходимости по сетке (Grid Convergence Study), при котором вариируются параметры сеточного разбиения, а ключевые выходные данные сравниваются между расчетами.

В рамках данной работы расчётная сетка формировалась вручную с учётом геометрических особенностей циклона. В качестве контрольного параметра для оценки адекватности сетки использовалось значение эффективности процесса отделения частиц в турбулентном потоке, рассчитанное методом конечных объёмов [114].

Сравнительный анализ проводился на основе шести последовательных расчетов с различными параметрами сетки. Результаты представлены в таблице 3.1.

Размеры, указанные в таблице, относятся к базовой (начальной) расчетной сетке (Base Mesh). Итоговая расчетная сетка формируется в SolidWorks Flow Simulation посредством автоматического локального сгущения (Local Mesh Refinement), на основе геометрии с параметрами: характерное число ячеек поперек канала – 7, максимальный уровень

дробления – 2.

В результате применения локального сгущения, общее количество ячеек в области текущей среды достигает 1102455, а на границе раздела твердого тела и текущей среды — 140835. Такое увеличение количества ячеек обеспечивает высокую детализацию расчетной области в критических зонах течения.

Анализ результатов показывает, что, начиная с четвертого опыта, изменения контрольного параметра между расчетами не превышают 2–3 %, что соответствует критериям сходимости расчетной сетки [107, 114] и подтверждает устойчивость численного решения в рамках метода конечных объемов [118, 106].

Таблица 3.1 Сравнительный анализ калибровочной сетки

| № п/п | Размер сетки (X×Y×Z) | Примерное число ячеек | Контрольное значение, η , % |
|-------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 10×28×12 дроб.2 | 3360 | 61 |
| 2 | 10×28×13 дроб.3 | 3640 | 59 |
| 3 | 10×28×13 дроб.4 | 3640 | 46 |
| 4 | 10×28×12 дроб.5 | 3360 | 56 |
| 5 | 10×28×12 дроб.6 | 3360 | 57 |
| 6 | 10×28×12 дроб.7 | 3360 | 60 |

Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение плотности сетки не приводит к существенным изменениям результата, но значительно повышает вычислительную нагрузку.

Следует выделить аномалию, выявленную в опыте №3: при идентичных параметрах сетки и настройках расчета результат (46%) существенно отличается от опыта №2 (59%). При этом настройки физической модели, граничных условий и параметров решателя во всех расчетах совпадают, а сходимость решения достигнута. Такое расхождение объясняется высокой чувствительностью результата к дискретизации на грубых базовых сетках, обусловленной алгоритмом автоматической адаптации сетки SolidWorks

FlowSimulation. Незначительные изменения базового размера по одной координате приводят к перераспределению узлов сетки и локальной детализации, что влияет на итоговые значения.

Таким образом, разброс результатов на грубых базовых сетках ($\sim 3\ 360 - 3\ 640$ ячеек) является ожидаемым и подчеркивает необходимость использования более детализированных сеток для получения сетко-независимого решения. Стабилизация значения эффективности в диапазоне 57–60 %, начиная с четвертого опыта, а также совпадение с результатом самой детальной сетки (опыт №6), подтверждают адекватность выбранной итоговой сетки.

Согласно подходу, описанному в работах Ferziger & Perić [107] и рекомендациям из документации SolidWorks FlowSimulation [116], в подобных случаях рационально выбрать следующую по плотности конфигурацию сетки (Рисунок 3.1), которая обеспечивает минимальные колебания результатов при максимальной детализации геометрии.

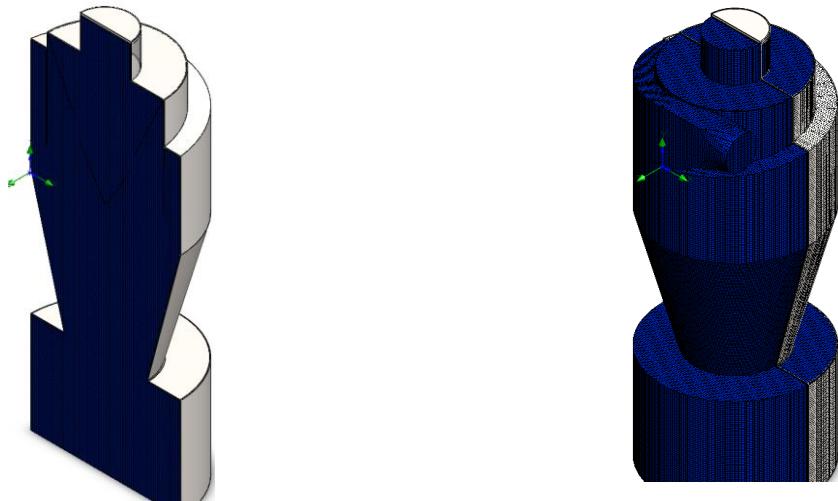


Рисунок 3.1. – Уровень дробления сетки решателя.

Исходя из вышеизложенного, конфигурация базовой сетки по дроблению, $20 \times 56 \times 24$ с последующим автоматическим локальным сгущением (характерное число ячеек поперек канала = 7, максимальный уровень дробления = 2), признана рациональной и оптимальной. Она обеспечивает:

- достижение сеточной сходимости с отклонениями контрольного параметра не более 2–3 %;
- достаточную детализацию геометрии;
- баланс между точностью и вычислительными затратами, поскольку дальнейшее сгущение базовой сетки не приводит к значимому улучшению результатов.

3.2 Методика CFD-моделирования и определения рациональных параметров двухступенчатого циклона

Применение программного модуля к задаче по определению энерго-эффективности и эффективности работы двухступенчатого циклона позволит определить гидравлические потери и эффективность процесса отделения, что существенно сокращает объем работ, связанных с определением структуры течения газовой среды в циклоне, и уменьшить математические операции для описания и расчёта движения среды [5, 105].

Для определения наиболее влияющих конструктивных параметров, оказывающих влияние на процесс отделения мелкодисперсных частиц от газового потока, проведен ряд испытаний в программной среде SolidWorks FlowSimulation с изменением конструктивных размеров [63, 64]. Для этого смоделирован двухступенчатый циклон с габаритами, приближенными к циклону БЦР-450 установленном на комбикормовом заводе производства «АгроПоставка», в лаборатории Инженерного института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирского государственного аграрного университета».

Предлагаемая методика проведения вычислительного эксперимента в программном обеспечении FlowSimulation предусматривает разработку геометрической модели, состоящей из непосредственно исследуемого двухступенчатого циклона и бункера. На (рисунке 3.2, а) представлена геометрическая модель циклона, включающая в себя конически-

цилиндрический корпус, вихревую воронку, конический отбойник и бункер. В разработанной модели предусмотрен бункер для сбора фракций, с учетом того, что циклонные аппараты наиболее эффективны, когда окно для собравшихся фракций герметизировано. Разработанная геометрическая модель (рисунок 3.2, б) дает возможность использовать методы расчета для определения количества унесённых фракций.

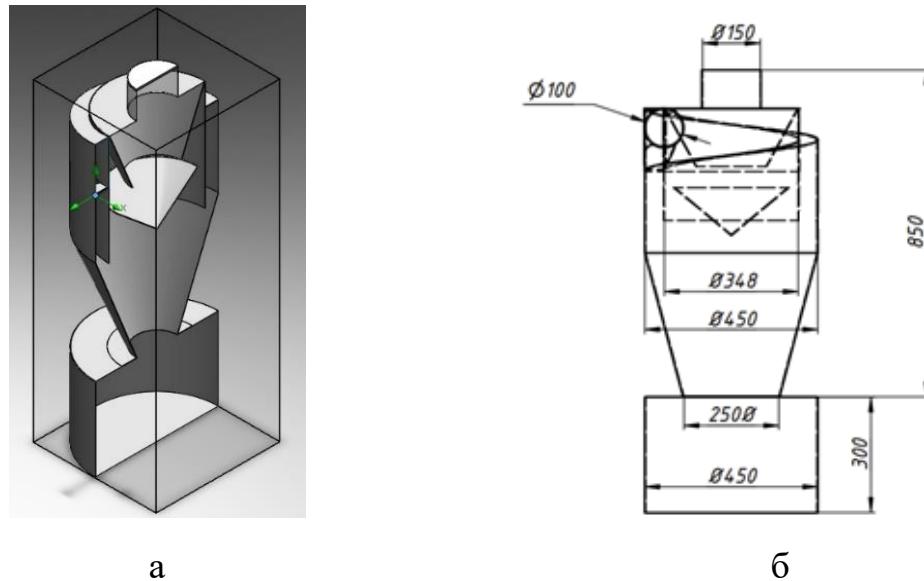


Рисунок 3.2. – Общий вид геометрической модели циклона:

а – циклон в разрезе; б – неизменяемые геометрические размеры.

В программном комплексе FlowSimulation предусмотрена возможность постановки граничных условий на поверхностях, заданных ограничениями, что позволяет задавать параметры транспортируемой смеси на входе и выходе из циклонного аппарата. На выхлопном патрубке двухступенчатого циклона установлено атмосферное давление 101325 Па, а на поверхности, соответствующей входному сечению, задана скорость потока 20 м/с, что соответствует скорости воздушной смеси в циклонном аппарате БЦР-450, установленном на комбикормовом мини-заводе «АгроПоставка».

Скорость воздушного потока на входе в циклон определялась экспериментально с использованием прибора Testo 405i в соответствии с методикой [75]. Исследования проводились на установленном на

комбикормовом заводе аппарате БЦР-450 производства «АгроПоставка».

Для проведения измерений в входной патрубок циклона подавалось восемь фракций частиц различного: I (10 мкм); II (30 мкм); III (50 мкм); IV (70 мкм); V(90мкм); VI(110мкм); VII(130мкм); VIII(150мкм). Плотность частиц пыли комбикормов по различным рецептограммам находилась в диапазоне 1,51 – 1,56 кг/м³ [69], при расчётах для единообразия была принята усреднённая величина 1,55 кг/м³.

Количество запущенных частиц в циклон для всех измерений в изменяемых конструкциях оставалось неизменным в количестве 1000 шт.

В качестве текучей среды выбран воздух с температурой 293,2 К и плотностью 1,21 кг/м³. Задача рассматривается как внутренняя с учётом гравитационного ускорения вдоль вертикальной оси циклона 9,81 м/с². Поток в циклоне моделируется с учётом сочетания ламинарного и турбулентного режима; интенсивность турбулентности принята равной 2% с масштабом 0,00450284 м. Такой подход позволяет корректно учитывать влияние турбулентных пульсаций на распределение скоростей и давление, а также на эффективность отделения частиц. Шероховатость внутренних стенок проточной части циклона принята равной 0,6 мкм, что позволяет учитывать потери давления, связанные с трением смеси о поверхность корпуса, при расчётах гидравлического сопротивления.

Расчётная сетка (рисунок 3.3) формировалась вручную и включает около 1102455 ячеек для текучей среды и 140835 ячеек на разделе твердого тела с текущей средой, что обеспечивает достаточное разрешение ключевых областей с резкими градиентами потоковых параметров.

Настройки глобальной сетки, следующие:

N_x – Число ячеек по координате $x = 20$ шт.

N_y – Число ячеек по координате $y = 56$ шт.

N_z – Число ячеек по координате $z = 24$ шт.

Характерное число ячеек поперек канала 7 шт., Уровень дробления

сетки 2, уровни дробления ячеек в текучей среде 2, уровень дробления ячеек на границе раздела твердого тела с текучей средой 2.

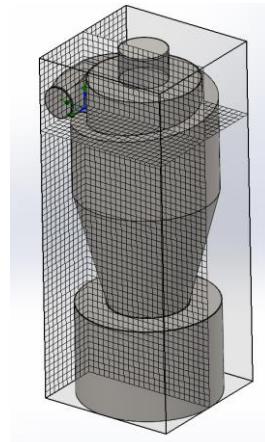


Рисунок 3.3. – Отображение базовой сетки решателя.

В качестве критерия эффективности отделения выбран общий коэффициент улавливания циклоном η . Так, как исходный материал представлен восемью фракциями, то η определялся как среднеарифметический по формуле:

$$\eta = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i}{i}, \%, \quad (3.1)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i$ – коэффициенты улавливания фракции;

i – количество запущенных фракций.

Коэффициент улавливания η_1, \dots, η_8 характеризуется отношением количества фактически уловленных частиц M_{y-i} к его количеству в исходной смеси M_{0-i} и находится по формуле:

$$\eta_i = \frac{M_{y-i}}{M_{0-i}} \cdot 100\% = \frac{1000 - N_{выл}}{1000} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

где M_{y-i} – масса фактически уловленных частиц, кг;

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

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

После запуска моделирования определялся наиболее рациональный показатель геометрической размерности, затем при сохранении этого показателя последовательно изменялись остальные геометрические

параметры.

Для численного моделирования процесса отделения в циклонном аппарате было выбрано восемь фракций частиц с диаметрами от 10 мкм до 150 мкм. Выбор данного диапазона обусловлен тем, что характеристики большинства циклонов указывают возможность улавливания частиц размером от 10 мкм [58, 78, 102, 92]. Частицы диаметром более 150 мкм в ходе численного моделирования не попадали в выхлопной патрубок циклона, что объясняется их эффективным осаждением в бункере для сбора фракций. Таким образом, исследуемый диапазон охватывает размеры частиц, представляющие наибольший интерес для анализа эффективности работы циклона.

Поскольку моделирование, в отличие от натурных экспериментов, ограничено числом фракций, вводится коэффициент, учитывающий оставшуюся долю частиц с диаметром более 150 мкм, эффективность улавливания которых принимается равной 100 % [63]. На основе этого коэффициента общая эффективность отделения частиц, полученная в результате численного моделирования с учётом всех фракций, рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_{\text{мод}i} = n_i \cdot \alpha + (1 - \alpha) \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

где α – доля содержания частиц размерностью < 150 мкм, в исходной смеси.

Доля содержания мелкодисперсных частиц α , определяется экспериментальным путем с помощью ситового анализа продуктов дробления зерна, согласно [25], выполненного на ситах по методике [27] на лабораторном рассеве РЛ-5. Оставшуюся фракцию в поддоне, после просеяли через сито 42/48ПА с размерностью ячеек 150 мкм, для определения оставшихся частиц размерностью < 150 мкм и определения доли их содержания α . В ходе ситового анализа продуктов дробления зерна установлено, что $\alpha = 0,09$.

Изначально определялся оптимальный диаметр вихревой воронки, так как этот параметр существенно влияет на формирование вихревого потока и

распределение центробежных сил. Далее, при сохранении выбранного диаметра, подбиралась высота вихревой воронки, затем последовательно задавались геометрические параметры конической части циклона: её высота, расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, высота и диаметр отбойного конуса. Такая последовательность подбора параметров позволяет поэтапно оптимизировать гидродинамические характеристики аппарата и эффективность отделения частиц.

3.3 Методика проведения многофакторного эксперимента

Математическая модель, описывающая процесс отделения мелкодисперсных частиц от воздушного потока, представляется функцией с достаточно большим числом переменных, влияющих на эффективность процесса. На основе анализа данных, полученных в ходе проведения компьютерного моделирования, выделяются наиболее значимые конструктивные факторы:

- высоты вихревой воронки мм, h_{ex} ;
- высоты отбойного конуса мм, h_{kon} ;

Необходимо также учитывать основные режимные параметры, оказывающие влияние на процесс отделения, а именно:

- скорость на входе в циклон м/сек, U ;
- массовый расход кг/сек, q ;

Исходные уровни факторов выбираются на основе данных, полученных в результате моделирования, а также характеристик комбикормового мини-завода, имеющегося на кафедре МЖиПСХП НГАУ ООО «Агропоставка», в котором скорость воздушного потока, определялась анемометром по методике [60], а массовый расход рассчитывался с учетом производительности пневмодробилки ДПМ-11.

Кодирование факторов проводили по формуле [1]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

где x_i – кодированное значение фактора;
 X_i – натуральное значение фактора;
 X_{0i} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;
 ε – натуральное значение интервала варьирования фактора, определяемый как:

$$\varepsilon = \frac{X_i^s - X_i^n}{2}, \quad (3.5)$$

где X_i^s, X_i^n – значение факторов на верхнем и нижнем уровнях соответственно.

В качестве критерия оптимизации выбран общий коэффициент эффективности η (%). На основе априорной информации предполагалось, что функция отклика описывается полиномом второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j. \quad (3.6)$$

С учётом числа значимых факторов и рекомендаций по выбору планов эксперимента [1] был выбран симметричный трёхуровневый композиционный план Бокса-Бенкена. Основой для его выбора стали рекомендации по применению плана с наилучшими совместными характеристиками. Матрица плана представлена в таблице 3.2.

После проведения экспериментов по матрице плана выполнялась обработка данных и построение математической модели. Определение коэффициентов квадратичной модели проводилось в Microsoft Excel с использованием пакета анализа «Регрессионный анализ».

Обработку экспериментальных результатов выполняли согласно рекомендациям [1, 54] в следующей последовательности: исключались браковочные опыты в каждой строке матрицы; при сомнительных результатах

опыт повторялся. Опыт считался браковочным, если экспериментальное значение критерия Стьюдента по модулю превышало табличное значение, то есть:

$$\frac{(y_i - \bar{y})}{s} \geq t, \quad (3.7)$$

где y – результат опыта, вызывающий сомнение;

\bar{Y} – среднее арифметическое значение параллельных опытов;

s – среднее квадратическое отклонение (стандартная ошибка), определяемая как:

$$s = \sqrt{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m-1}}}, \quad (3.8)$$

где $(m-1)$ – число степеней свободы, равное числу повторности минус единица.

Одна степень свободы использовалась для вычисления среднего значения.

Дисперсия параметра оптимизации вычислялась по формуле:

$$S^2(Y_u)_k = \frac{\sum_{k=1}^{m_u} |(Y_u)_k - \bar{Y}_u|^2}{m-1}, \quad (3.9)$$

А проверка однородности дисперсий выполнялась с использованием критерия Кохрена, при котором максимальная дисперсия делилась на сумму всех дисперсий::

$$G = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2, \quad (3.10)$$

где N – число опытов. Дисперсии считались однородными, если экспериментальное значение критерия G не превышало табличное значение.

Средняя оценка дисперсии воспроизводимости единичного результата для всего эксперимента вычислялась по формуле:

$$\bar{S}^2(Y_u) = \frac{\sum_{u=1}^N S^2(Y_u)_k}{N}, \quad (3.11)$$

Дисперсия среднего значения – как:

$$S^2(\bar{Y}_u) = \frac{\bar{S}^2(Y_u)}{m},$$

$$S^2(b_i) = \frac{S^2(\bar{Y}_u)}{N}, \quad (3.12)$$

Статистическая оценка значимости коэффициентов полученной модели проводилась с помощью критерия Стьюдента. Доверительная ошибка коэффициентов при числе степеней свободы $f = N(m - 1)$ и уровня достоверности 95 %:

$$\varepsilon(b_i) = t \cdot S(b_i), \quad (3.13)$$

где $t=2,01$. Значимость коэффициентов проверяли по условию $|b_i| > \varepsilon |b_i|$.

Адекватность модели оценивалась с использованием критерия Фишера, который представляет собой отношение дисперсии адекватности (S_{ad}^2) к дисперсии воспроизводимости опыта (S_y^2). Значение критерия должно быть меньше табличного при уровне значимости 5%:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}. \quad (3.14)$$

Дисперсия адекватности рассчитывалась по формуле:

$$S_{ad}^2 = \sum \frac{(Y_{\text{эксп}} - Y_{\text{мод}})^2}{f}, \quad (3.15)$$

где $f = N - (k + 1)$

k – число значимых коэффициентов.

После получения адекватной математической модели, описывающей качественные показатели процесса разделения в зависимости от факторов, проводился её анализ с целью изучения свойств поверхности отклика в окрестностях оптимума.

3.4 Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона

После определения конструктивных элементов, оказывающих влияние на эффективность отделения мелкодисперсных частиц продуктов дробления зерна, выполнялось вычисление коэффициента гидравлического сопротивления циклона. При этом расчёт проводился без учёта бункера. Основные граничные условия оставались аналогичными указанным в п. 3.2: скорость потока во входном патрубке составляла 20 м/с, а на выхлопном патрубке циклона поддерживалось атмосферное давление. Глобальная цель задавалась по массовому расходу воздуха, а локальные цели — по среднему давлению на входе и выходе из циклона. Количество заданных интеграций составляло 1000.

Коэффициент гидравлического сопротивления определялся с использованием формулы Юлиуса Вейсбаха [37, 79]:

$$\varepsilon = \frac{P_{01} - P_{02}}{\frac{\rho V^2}{2}}, \quad (3.16)$$

где P_{01} — давление на выходе, Па;

P_{02} — давление на входе, Па;

ρ — плотность среды, кг/м³;

V — средняя скорость, м/с.

Измерение показателей в среде компьютерного моделирования производилось по поверхностям плоскостей на входе в двухступенчатый циклон и на выхлопном патрубке устройства, тем самым возможно проследить изменение скорости в патрубке (средняя скорость, м/с) и изменения образованного давления, при этом плотность газа (воздуха) остаётся постоянной 1,21 кг/м³.

Вычисление коэффициента гидравлического сопротивления позволяет определить оптимальные конструктивные параметры разрабатываемого двухступенчатого циклона с учётом энергозатрат, необходимых для

поддержания требуемого воздушного потока в системе пневмотранспорта комбикормового мини-завода.

Определение эффективности циклонного аппарата η_i и коэффициента гидравлических потерь ε , проецировались на один график, в результате чего выбирается рациональный конструктивный параметр, обеспечивающий баланс между повышением эффективности отделения и гидравлическим сопротивлением циклона.

3.5 Обработка полученных результатов с применением пакета анализа

Регрессионный анализ в Excel проводится для оценки влияния независимых переменных (факторов) на зависимую переменную (отклик). Это часто используется в анализе данных экспериментов, где матрица экспериментов содержит значения факторов, а результаты – это отклики.

Методика проведения регрессионного анализа матрицы экспериментов для модели с четырьмя факторами и уравнением второго порядка в Excel:

1. Подготовка исходных данных

Для проведения регрессионного анализа экспериментальных данных с четырьмя независимыми переменными и построения полиномиальной модели второго порядка, необходимо сформировать матрицу экспериментов. В этой матрице строки будут представлять собой отдельные эксперименты, а столбцы содержать значения факторов X_1, X_2, X_3, X_4 и отклика Y_n . Кроме того, для учёта полиномиальных взаимодействий необходимо включить дополнительные столбцы, соответствующие квадратичным членам (X_1^2, X_2^2 и т.д.) и парным произведениям факторов (X_1X_2, X_1X_3 и т.д.).

Таблица 3.2 Пример структуры матрицы экспериментов:

| № п/п | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | X_4^2 | X_1X_2 | X_1X_3 | X_1X_4 | X_2X_3 | X_2X_4 | X_3X_4 | Y_n |
|----------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
|----------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|

2. Проведение регрессионного анализа

Для выполнения регрессионного анализа в Microsoft Excel с учётом

квадратичных членов и взаимодействий между факторами, необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Запуск модуля анализа данных. Перейди на вкладку «Данные» и выбрать инструмент «Анализ данных». В появившемся окне выбрать опцию «Регрессия».

2. Задание входных данных. В диалоговом окне «Регрессия» указать параметры: Входной интервал Y : Указать диапазон значений зависимой переменной Y_n и Входной интервал X : Указать диапазон значений независимых переменных, включая факторы X_1, X_2, X_3, X_4 и квадратичные члены и взаимодействия, т.е. выделение от X_1 до X_3X_4 . Выходные параметры: указать, куда выводить результаты (например, на новый рабочий лист) и задать уровень значимости, 5% (0,05).

3. Анализ результатов

После выполнения анализа, Excel предоставит результаты, включающие:

Коэффициенты регрессии. Полученные коэффициенты позволяют составить полиномиальное уравнение второго порядка:

$$Y_n = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4$$

где Y_n - зависимая переменная (отклик);

X_1, X_2, X_3, X_4 - независимые переменные факторы;

b_0 - свободный член (константа);

b_1, b_2, b_3, b_4 - коэффициенты при линейных членах X_1, X_2, X_3, X_4 ;

$b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$ - коэффициенты при квадратичных членах X_1^2, X_2^2 и т.д.;

b_{12}, b_{23}, b_{34} - коэффициенты при взаимодействующих членах X_1X_2, X_1X_3 и т.д.;

Коэффициент детерминации (R^2). Этот показатель отражает долю дисперсии зависимой переменной Y_n , объясняемую моделью. Значение R^2 ,

близкое к единице, свидетельствует о хорошем соответствии модели экспериментальным данным.

p – значение для каждого коэффициента позволяют определить его статистическую значимость. Если p – значение меньше заданного уровня значимости (например, 0,05), то соответствующий коэффициент считается значимым.

Анализ остатков. Графики остатков и их статистическое распределение позволяют оценить адекватность модели. Если остатки распределяются нормально и не имеют систематических отклонений, то модель можно считать приемлемой.

4. Построение и интерпретация модели.

На основе полученных коэффициентов составляется уравнение регрессии второго порядка.

5. Раскодирование уравнения

Уравнения полученные в результате проведения многофакторного эксперимента, изначально представляют из себя уравнение в закодированном виде. Раскодирование уравнения необходимо для того, чтобы перевести математическую модель из абстрактных, нормированных единиц ($-1, 0, +1$), в реальные физические величины, применимые к конкретным условиям производственного процесса. Это позволяет интерпретировать и использовать модель на практике, при оптимизации параметров для достижения максимальной эффективности процесса отделения. Раскодированное уравнение помогает понимать, как изменения в реальных параметрах, влияют на результат.

Для преобразования из закодированного вида значения в физическое значение необходимо использовать формулу:

$$X_n = \frac{X_{\text{нат}} - X_{\text{осн}}}{X_{\text{инт}}} \quad (3.17)$$

где $X_{\text{нат}}$ – натуральная величина фактора;

$X_{\text{осн}}$ – основной уровень фактора;

$X_{\text{инт}}$ – уровень интервала варьирования фактора;

Данная методика позволяет не только получить количественные характеристики влияния факторов на отклик, но и выявить сложные нелинейные взаимодействия между ними, что существенно повышает точность и информативность модели.

3.6 Описание экспериментальной установки для исследования двухступенчатого циклона

Для экспериментального изучения процесса отделения продуктов дробления зерна в двухступенчатом циклоне разработка и применение специализированного оборудования является необходимостью. Экспериментальная установка должна обеспечивать возможность регулирования исследуемых параметров и режимов работы циклона в заданных пределах, а её конструкция вместе с контрольно-измерительной аппаратурой – соответствовать методикам исследования и гарантировать требуемую точность измерений. Исходя из этих требований и на основании сформулированной научной гипотезы была спроектирована и изготовлена установка, позволяющая оценивать эффективность процесса отделения в циклонных аппаратах. На (рисунке 3.4) представлен общий вид экспериментальной установки.

Установка содержит: бункер дозатор, регулятор потока, канал регулятора, пневмодробилку, основной канал, фильтр мешок, циклон и ёмкость для сбора фракций.

Выбор основных геометрических параметров двухступенчатого циклона проводился по результатам компьютерного моделирования методика которого описана в п. 3.2.

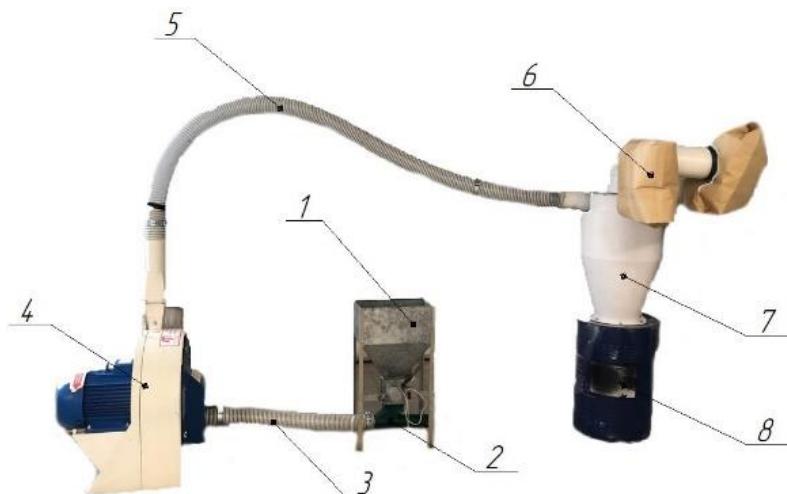


Рисунок 3.4. – Экспериментальная установка:

1 – бункер дозатор; 2 – регулятор потока; 3 – канал регулятора; 4 – пневмо-дробилка; 5 – канал основной; 6 – фильтр-мешок; 7 – циклон; 8 – емкость для сбора фракций.

Для исследования влияния геометрических параметров двухступенчатого циклона на процесс отделения изготовлены три размерности высот вихревой воронки 145,165,185 и отбойного конуса 120,140,160 (рисунок 3.5).



а



б

Рисунок 3.5. – Конструктивные элементы:
а – отбойный конус; б – вихревая воронка;

Регулирование подачи в циклон (кг/с), (рисунок 3.6, а) осуществляется бункером дозатором, который имеет регулируемую заслонку, для предотвращения сводо-образования в бункере перед заслонкой установлено вибро-устройство, так же после регулируемой заслонки на бункере дозаторе имеется регулятор потока, который за счёт изменения сечения подсоса воздуха, может изменять скорость воздушного потока, создаваемую разрежением пневмо-дробилки, тем самым, изменяя скорость нагнетания подаваемой смеси в циклонный аппарат (м/с)(рисунок 3.6, б).

Канал регулятора и основной канал материала-проводов установлены с радиусом кривизны, рекомендованным при проектировании пневмотранспортных сетей [30].

Проведение многофакторного основано на методике, описанной в п. 3.3.

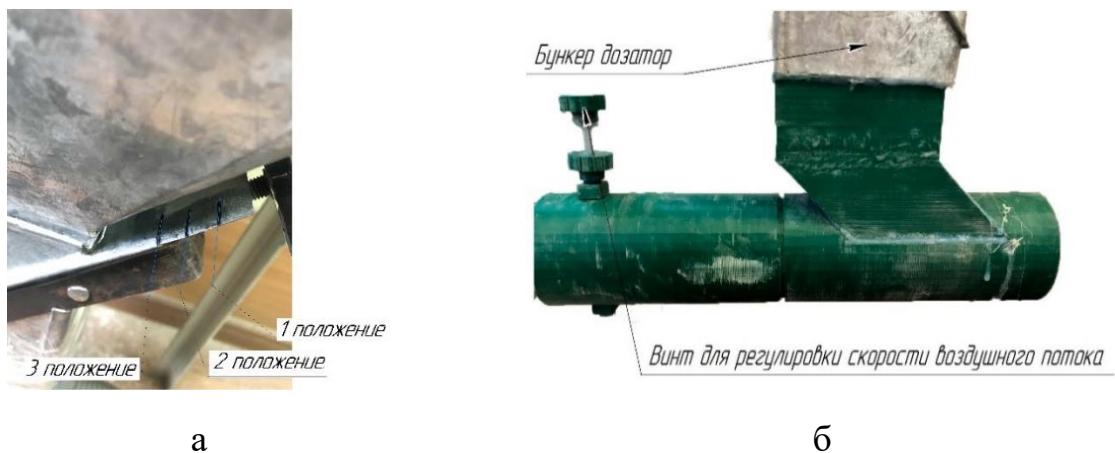


Рисунок 3.6. – Регулирующие устройства:
а – заслонка бункера; б – регулятор потока.

Работа экспериментальной установки организована следующим образом. Исходный материал из бункера-дозатора подается через регулирующую заслонку в регулятор потока, с помощью которого осуществляется настройка скорости воздушного потока, создаваемого разряжением в дробильной камере. Далее смесь материала с воздухом поступает в канал регулятора и, проходя через пневмодробилку, нагнетается

по основному каналопроводу в двухступенчатый циклон. Внутри циклона под действием центробежных сил происходит отделение мелкодисперсных примесей продуктов дробления зерна от воздуха. Отделившиеся фракции собираются в предназначенный для этого емкости, а наиболее мелкие частицы уносятся потоком воздуха к выхлопному патрубку, на котором установлен фильтрующий мешок, задерживающий их [15].

Регулирование процесса отделения осуществляется путем изменения скорости воздушного потока и подачи материала на входе в циклон. После проведения каждой повторности производилось определение массы фильтр мешка путем его взвешивания на лабораторных весах (рисунок 3.7)



Рисунок 3.7. – Взвешивание фильтр мешка

Определение массы унесенной пыли $m_{\text{п}}$ находилось по формуле:

$$m_{\text{п}} = m_{\text{п0}} - m_{\text{до}} , \quad (3.18)$$

где $m_{\text{п0}}$ - масса фильтра после опыта, грамм;

$m_{\text{до}}$ - масса фильтра до опыта, грамм;

Измерение скорости происходило электронным термоанемометром testo 405i (Рисунок 3.8, б) по двум взаимно перпендикулярным плоскостям, непосредственно перед входом в двухступенчатый циклон. Число точек замера зависит от диаметра канала (Рисунок 3.5, а) [58].

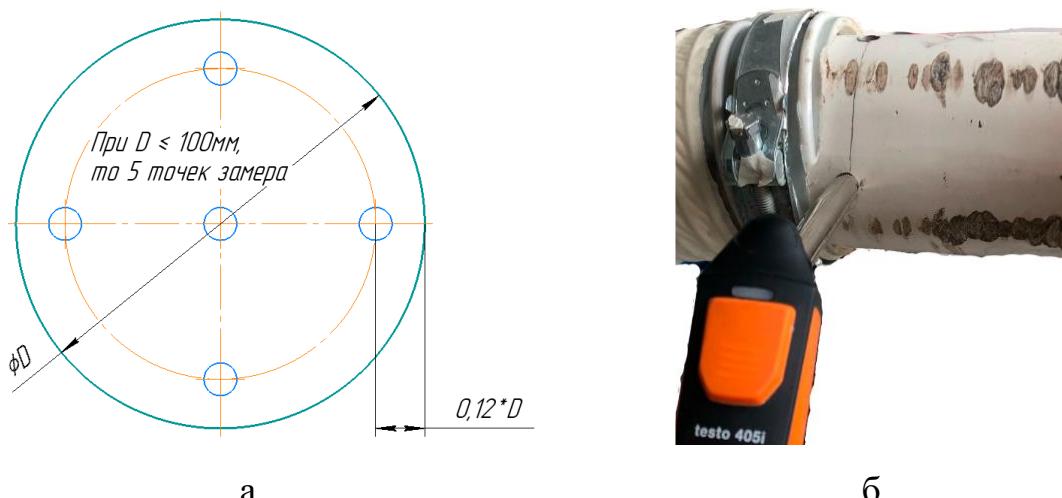


Рисунок 3.8. – Точки измерений скорости во сходном патрубке циклона:
а-точки замера; б- замер.

3.7 Методика проведения сравнительных испытаний с серийным аналогом

На лабораторной установке, описанной в п.3.6, проведен ряд сравнительных испытаний для подтверждения эффективности предлагаемого решения.

В лабораторную установку устанавливается циклон серийного производства БЦР-450 при заданных уровнях варьирования концентрации подаваемого материала и скорости воздушного потока (таблица 3.3) при одинаковых условиях, устанавливается количество унесённого мелкодисперсного компонента продуктов дробления зерна в выхлопной патрубок циклона по формуле в п.3.2.

Таблица 3.3- уровни варьирования БЦР-450

| Факторы | Условные обозначения | Код | Уровни факторов | | | Интервал варьирования |
|--------------------------|----------------------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------------|
| | | | -1 | 0 | +1 | |
| Массовый расход, кг/сек | q_1 | X_1 | 0,105 | 0,205 | 0,305 | 0,1 |
| Скорость на входе, м/сек | U_1 | X_2 | 15 | 20 | 25 | 5 |

Матрица проведенных опытов представляет из себя следующее таблица 3.4.

Таблица 3.4 – Матрица двухфакторного эксперимента

| № опыта | X_1 | X_2 | № опыта | X_1 | X_2 | № опыта | X_1 | X_2 |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 1 опыт | -1 | -1 | 4 опыт | 0 | -1 | 7 опыт | +1 | -1 |
| 2 опыт | -1 | 0 | 5 опыт | 0 | 0 | 8 опыт | +1 | 0 |
| 3 опыт | -1 | +1 | 6 опыт | 0 | +1 | 9 опыт | +1 | +1 |

По результатам данных опытов возможно определение максимального и минимального числа унесенной массы фракций, для последующего сравнения аналогичных параметров предлагаемого решения.

3.8 Методика проведения производственных испытаний опытного образца двухступенчатого циклона

Испытания проводились на предприятии АО «Чкаловское», расположенного по адресу 630530, Новосибирская область, Новосибирский р-н, п Восход, Набережная ул, зд. 15. Данное предприятие имеет животноводческий комплекс, основным видом деятельности, которого является производство молока (кроме сырого) и молочной продукции.

Для подкормки КРС предприятие использует 42 тонны рассыпного корма в месяц, рецептура которого на 3т рассыпного корма включает: 50 кг соли, 25 кг мела, 25 кг соды, 600 кг жмыха, 1150 кг кормосмеси, 1150 ячменя.

На базе предприятия имеется комбикормовый мини-завод компании ООО «Агропоставка», который состоит из молотковой пневмодробилки ДПМ-11, эжектора пневматической дробилки, смесителя горизонтального СГ-4, циклона БЦР-450, поставляемого в комплекте, и шнекового транспортера ТСШ-200 для отвода готового материала из смесителя (рисунок 3.9), для определения количества унесённых фракций в выхлопной патрубок циклона на циклоне установлены воздушный фильтр элемент.



Рисунок 3.9 – Общий вид комбикормового мини-завода компании ООО «Агропоставка»

1 – Пневматическая дробилка ДМП-11; 2 – Циклон разгрузитель; 3 – Фильтр элемент; 4 – Смеситель СГ-4; 5 – Шнековый транспортер ТСШ-200; 6 – эжектор пневматической дробилки.

Контроль загрузки измельченного материала в смеситель регулируется за счет установленного на СГ-4 дозирующего устройства электронного типа ДУЭТ. На ножках смесителя установлены 4 тензо-датчика, благодаря которым на цифровом табло ДУЭТ отображается масса дробленного материала, попадающая в СГ-4 (рисунок 3.10, а).

Определение влажности материала для измельчения производилось с помощью влагомера зерна Wile 65 (рисунок 3.10, б). Масса пыли, унесенной в выхлопной патрубок, определялась путем разницы массы фильтра до опытов (чистого) и после опытов (засоренного), на весах с точностью $\pm 0,1$ г. (рисунок 3.11, а), параметры нагрузки на электродвигатель дробилки снимались через лабораторный амперметр и вольтметр (Рисунок 3.11, б)



а

б

Рисунок 3.10. – Устройства дозирования и определения влажности:

а) дозирующего устройства электронного типа ДУЭТ; б) Замер влажности зерна на Wile 65.

Целью испытаний является оценка эффективности работы двухступенчатого циклона, в сравнении с серийно поставляемым в комплекте с мини- заводом циклоном БЦР-450, при одинаковых условиях.

- 1) Определение степени эффективности улавливания частиц циклонами.
- 2) Измерение энергопотребления при замене серийного циклона на предлагаемую конструкцию.
- 3) Сравнение производительности при использовании предлагаемого решения.

Оборудование и материалы:

Испытуемые циклоны:

- 1.Двухступенчатый циклон (опытный образец)
2. Циклон БЦР-450 (Базовая поставка в комплекте)

Дополнительное оборудование: Пневматическая дробилка с регулируемым эжектором, фильтрующий элемент (установленный на выхлопном патрубке), весы с точностью $\pm 0,1$, Амперметр и вольтметр для замера электроэнергии, таймер, влагомер.

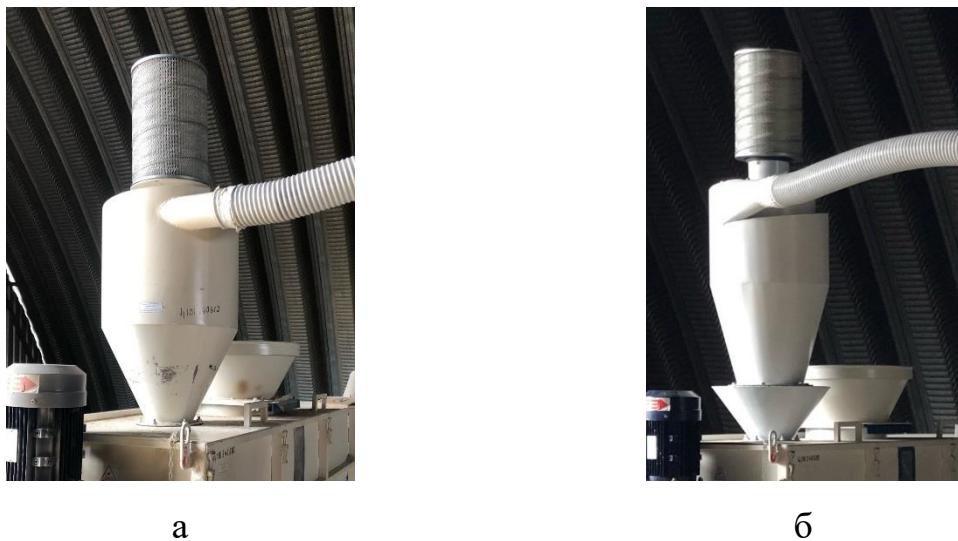


Рисунок 3.11. – Измерительные приборы:

а) взвешивание фильтр элемента; б) показание электросети на двигателе пневматической дробилке.

Материал для испытания: зерносмесь, согласно рецептуре (360 кг на каждый циклон при использовании фильтр элементов и 640 кг на каждый циклон при использовании стандартных методов фильтрации фильтр-мешков).

Работа установки осуществляется следующим образом: материал подается через эжектор в пневматическую молотковую дробилку, в которой измельчается, далее дробленный материал по пневмосистеме подается в циклон, в котором происходит отделения фракций от воздуха, дробленый материал попадает в смеситель, в котором фиксируется благодаря ДУЭТ и отслеживается масса материала, а воздух с неочищенными фракциями устремляется в выхлопной патрубок, на котором установлен фильтр элемент. При этом положении заслонки эжектора фиксируются в одном положении, в следствии чего подача материала в дробильную камеру и концентрации смеси в циклонном аппарате остается одинаковая. После дробления заданной массы материала, стандартный циклон БЦР-450 (Рисунок 3.12, а) заменяется, и монтируется двухступенчатый циклон (Рисунок 3.12, б).



а

б

Рисунок 3.12. – Циклон на смесители:

а) БЦР-450; б) Двухступенчатый циклон.

Ход проведения испытаний:

1. Фиксация эжектора в одном положении.
2. Запуск системы и подача 360 кг зерносмеси на фильтр элементах.
3. Замеры во время работы установки (Напряжение (В), сила тока(А), время обработки партии 100 кг).
4. Оценка улавливания пылевой фракции (После пропуска материала в 360 кг фильтр снимается взвешивается, разница в массе есть количество вынесенных частиц по 3.18).
5. Замена циклона на двухступенчатый (повтор шагов 1-4).

Замеряемые параметры рассчитывались по следующим формулам:

Масса вынесенных частиц, замерялась путем взвешивания фильтр элемента на весах.

Производительность согласно формуле (3.14), кг/ч:

$$Q = m_{\text{мат}} / t_{\text{замер}} \cdot 3600, \quad (3.19)$$

где $m_{\text{мат}}$ - масса пропущенного материала, кг,

$t_{\text{замер}}$ - время прохода пропущенного материала, с.

Потребляемая мощность, кВт:

$$P = U \cdot I, \quad (3.20)$$

где U - напряжение на фазе, В.

I - сила тока на фазе, А.

Критерий эффективности определялся согласно формуле 3.2.



Рисунок 3.13. – Установленный фильтр мешок на двухступенчатый циклон и на БЦР-450 (Слева на право соответственно).

3.9 Выводы по главе

1. Установлено, что конфигурация базовой сетки по дроблению – $20 \times 56 \times 24$ с последующим автоматическим локальным сгущением (характерное число ячеек поперек канала = 7, максимальный уровень дробления = 2), обеспечивает рациональную производительность и точность расчета.

2. Разработана методика проведения CFD-моделирования и определения рациональных параметров двухступенчатого циклона численным методом.

3. Выбран план проведения многофакторного эксперимента, на основе которого разработаны методики проведения компьютерного моделирования и физических опытов, описана методика обработки полученных данных через пакет анализа в MS Excel.

4. Выбрана математическая модель второго порядка, позволяющая адекватно описать зависимость эффективности отделения от исследуемых факторов, с проверкой статистической значимости и адекватности модели по

критериям Стьюдента и Фишера.

5. Обоснована, методика расчета и замера гидравлического сопротивления при численном моделировании и физическом эксперименте.

6. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая обеспечить экспериментальную проверку требуемых режимных параметров и измерений.

7. Разработана методика проведения сравнительных испытаний с промышленным штатным циклоном БЦР-450.

8. Определена методика проведения производственных испытаний двухступенчатого циклона-разгрузителя.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты поисковых численных экспериментов

По методике, описанной в п. 3.2, проведен ряд численных испытаний с изменяемыми геометрическими размерами и общим шагом изменений в 5 мм, указанных в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – изменяемые параметры

| № п/п | Изменяемый размер | Минимальный размер, мм | Максимальный размер, мм |
|----------|--|---------------------------|----------------------------|
| 1 | Диаметр вихревой воронки, $d_{вх}$ | 100 | 270 |
| 2 | Высота вихревой воронки, $h_{вх}$ | 100 | 235 |
| 3 | Высота цилиндрической вставки, $h_{цв}$ | 250 | 400 |
| 4 | Расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, $h_{вк}$ | 45 | 145 |
| 5 | Высота отбойного конуса, $h_{кон}$ | 50 | 170 |
| 6 | Диаметр отбойного конуса, $d_{кон}$ | 50 | 150 |

При определении эффективности отделения и коэффициента гидравлического сопротивления с использованием формул, приведённых в п. 3.2 и п. 3.4, были получены следующие зависимости.

1) Для диаметра вихревой воронки (рисунок 4.10)

На графике (рисунок 4.1) представлено количество вылетевших частиц (по фракциям) в выхлопной патрубок циклона при изменении величины диаметра вихревой воронки.

По данным, представленным на графике, установлено, что при входном диаметре воронки в интервалах от 100 до 150 мм и от 175 до 200 мм,

количество унесенных частиц в выхлопной патрубок наименьшее для всех фракций в исследуемом диапазоне.

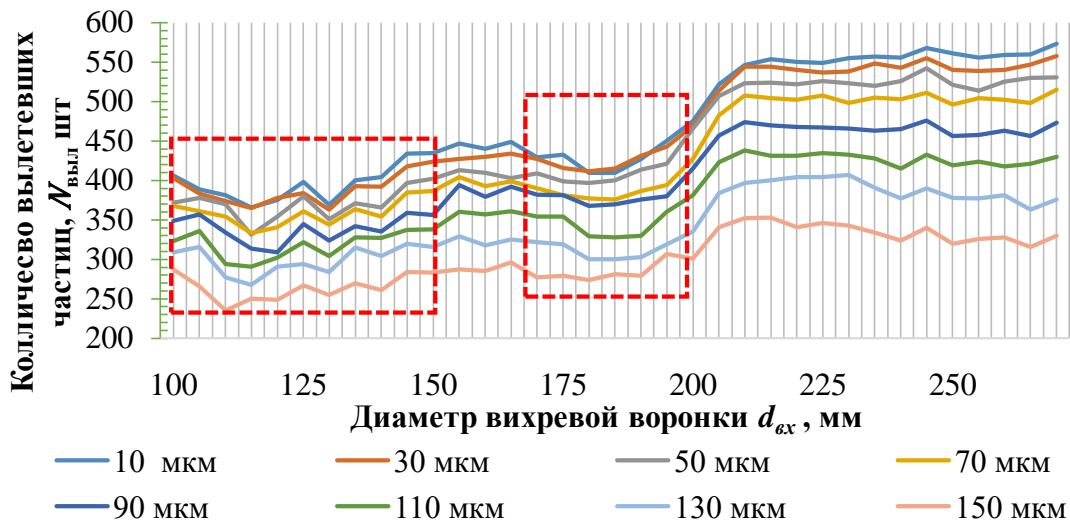


Рисунок 4.1. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от величины диаметра вихревой воронки.

На рисунке 4.2 представлена средняя эффективность по всем фракциям и коэффициент гидравлического сопротивления двухступенчатого циклона при изменении диаметра вихревой воронки.

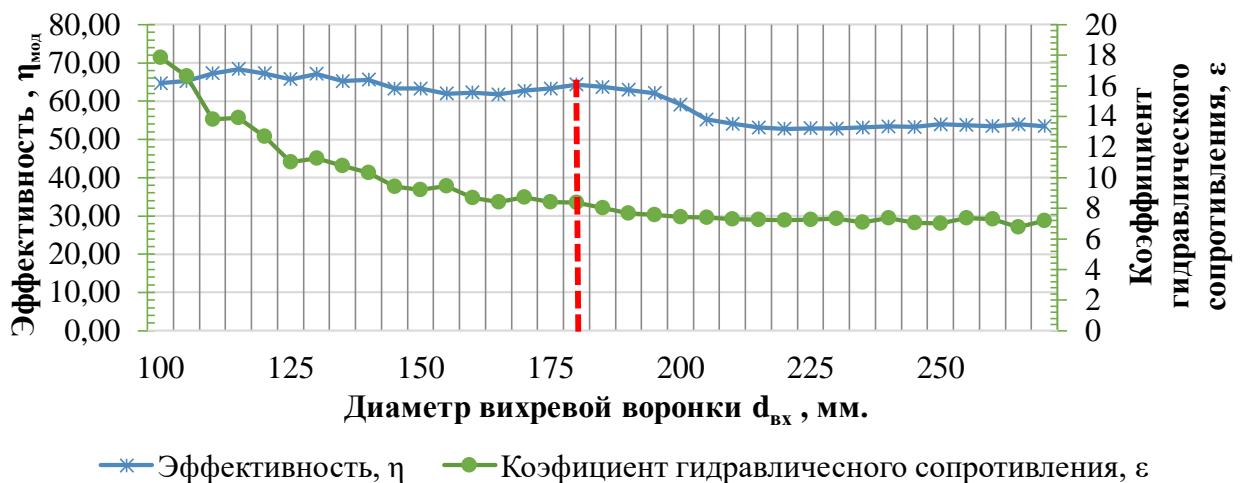


Рисунок 4.2. – Эффективность и коэффициент гидравлического сопротивления в зависимости от величины диаметра вихревой воронки.

Следует отметить снижение коэффициента гидравлического

сопротивления циклона в интервале диаметров от 100 мм до 200 мм (рисунок 4.2) с 18 до 8, а после 200 мм стабилизируется на уровне 7-7,5.

По полученным данным можно выделить область в интервале от 165 до 180 мм, где прослеживается увеличение эффективности отделения частиц до 64 – 65 % и уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления до 8, что довольно близко к стабилизированному значению 7-7,5.

По конструктивным соображениям, для дальнейших исследований, входной диаметр вихревой воронки принят $d_{\text{вх}} = 180$ мм, при котором коэффициент эффективности равен 64,3%, а коэффициент гидравлического сопротивления 8,37.

2) Высота вихревой воронки $h_{\text{вх}}$

При фиксированном диаметре воронки 180 мм, полученные зависимости количества вынесенных частиц по фракциям в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от высоты воронки (рисунок 4.3).

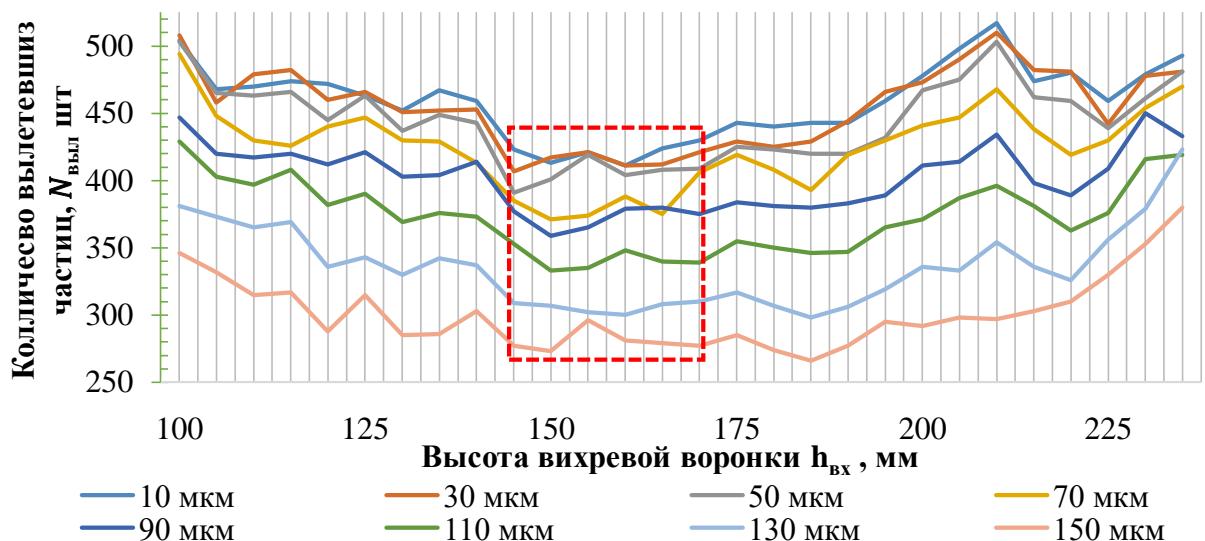


Рисунок 4.3. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения величины высоты воронки.

На графике прослеживается уменьшение количества вылетевших фракций в выхлопной патрубок циклона, в диапазоне от 140 до 170

до 210 мм, напротив, наблюдается увеличение количества вылетевших фракций.

На рисунке 4.4 представлен усреднённый график эффективности отделения при изменении высоты вихревой воронки, на котором прослеживается увеличение эффективности отделения частиц от воздушного потока в диапазоне от 145 до 165 мм, пиковая эффективность отделения составила 64% при высоте вихревой воронки 150 мм, при этом коэффициент гидравлического сопротивления равен 8,31.

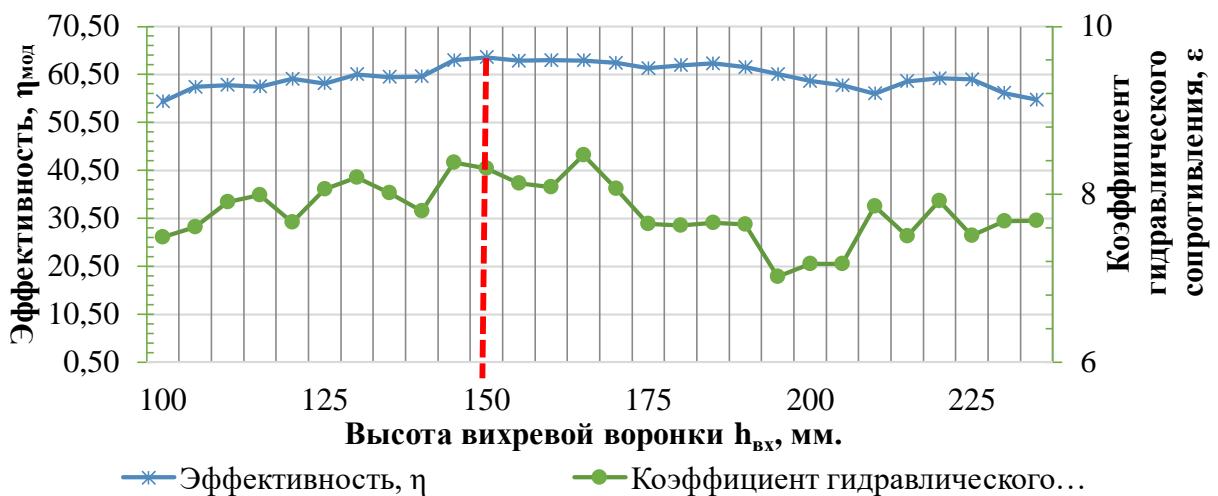


Рисунок 4.4. – Эффективность и коэффициент гидравлического сопротивления в зависимости от высоты вихревой воронки.

Принимаем высоту воронки 150 мм, при которой получено относительно наименьшее количество унесенных фракций с принятой размерностью и составило для: I (10 мкм) – 413 шт.; II (30 мкм) – 417 шт.; III (50 мкм) – 401 шт.; IV (70 мкм) – 371 шт.; V (90 мкм) – 359 шт.; VI (110) – 333 шт.; VII (130) – 307 шт.; VIII (150) – 273 шт. А эффективность составила 64% при этом коэффициент гидравлического сопротивления равен 8,31.

В ходе анализа полученных зависимостей, для дальнейших исследований установлены наиболее рациональные конструктивные параметры вихревой воронки, а именно диаметр на входе $d_{\text{вх}} = 180$ мм и высота $h_{\text{вх}} = 150$ мм.

3) Высота конической части $h_{\text{кв}}$.

На графике зависимости количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона, от изменения величины высоты цилиндрической вставки (рисунок 4.5) прослеживается уменьшение вылета мелкодисперсного компонента в диапазоне от 275 мм до 305 мм, далее наблюдается стабильное повышение количества вылетевших частиц в выхлопной патрубок в диапазоне от 310 до 380 мм.

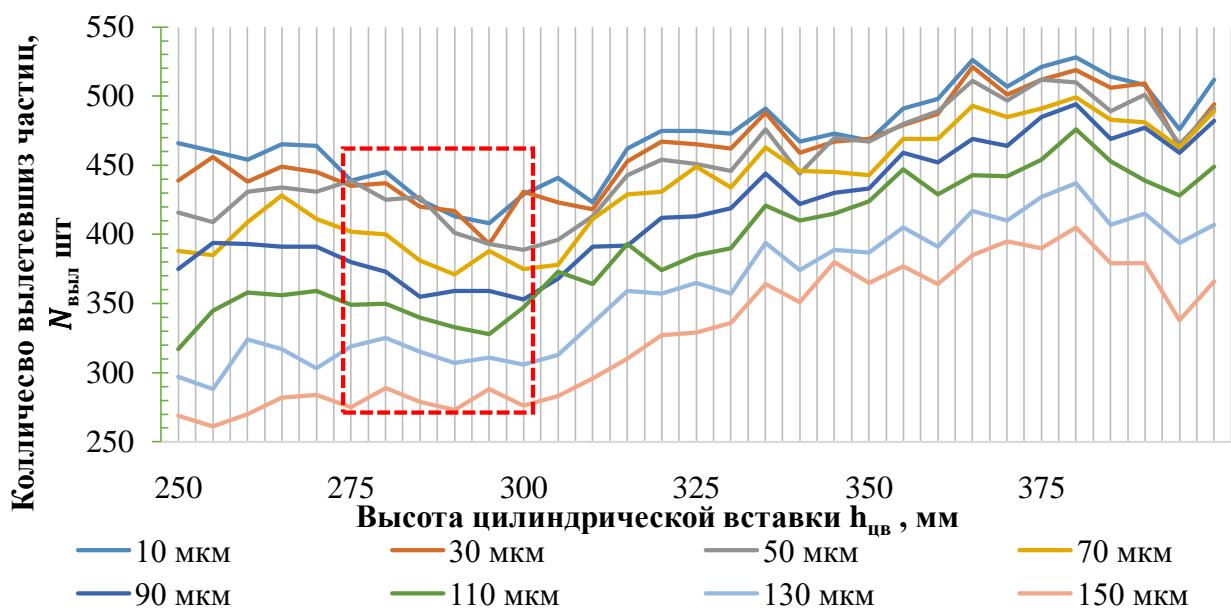


Рисунок 4.5. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения величины высоты цилиндрической вставки.

Для определения оптимальной высоты по расчетным данным из п.3.2 и п. 3.4, получен график зависимости (рисунок 4.6) эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от высоты конической вставки.

По данным из графика 4.6 наблюдается максимальная эффективность при высоте цилиндрической части равной 295 мм, при данном значении коэффициент гидравлического сопротивления равен 7,91, при этом хочется отметить, что при дальнейшем увеличении высоты цилиндрической вставки, эффективность отделения падает с 64% в точке 295 мм, до 51% в точке 380 мм,

при этом коэффициент гидравлического сопротивления почти не изменяется и держится в районе 7,7-7,9.

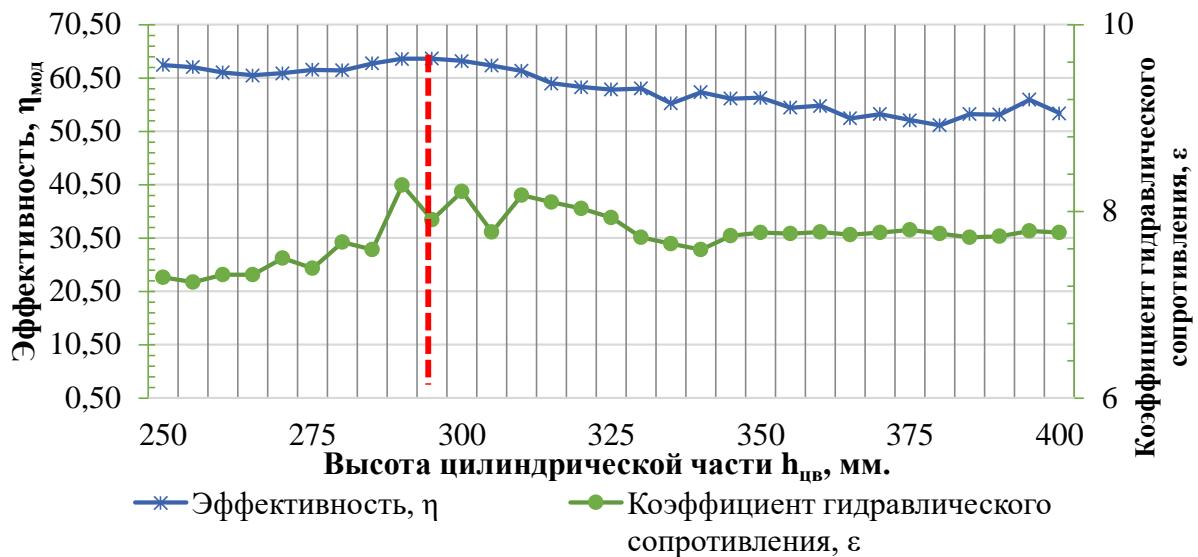


Рисунок 4.6. – Зависимость эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления от высоты конической вставки.

Таким образом, рациональным параметром для высоты цилиндрической вставки является принятым $h_{\text{цв}} = 295$ мм.

4) Расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, $h_{\text{вк}}$.

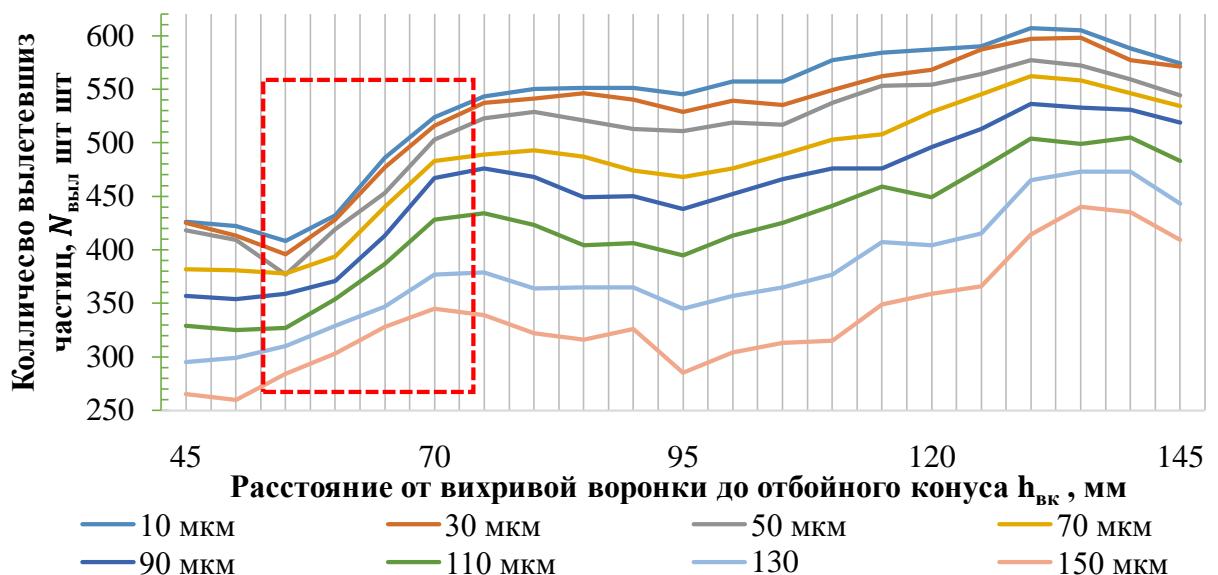


Рисунок 4.7. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения расстояния от вихревой воронки до отбойного конуса;

При зафиксированных параметрах вихревой воронки и цилиндрической вставки, зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения расстояния от вихревой воронки до отбойного конуса (рисунок 4.7) наблюдается линейная зависимость вылета частиц с диапазона от 55 мм до 130, так при увеличении расстояния более чем 55 мм, эффективность процесса отделения уменьшается (рисунок 4.8), при этом коэффициент гидравлического сопротивления равен 7.81, а при увеличении расстояния между компонентами уменьшается до 6,88 при эффективности 54%.

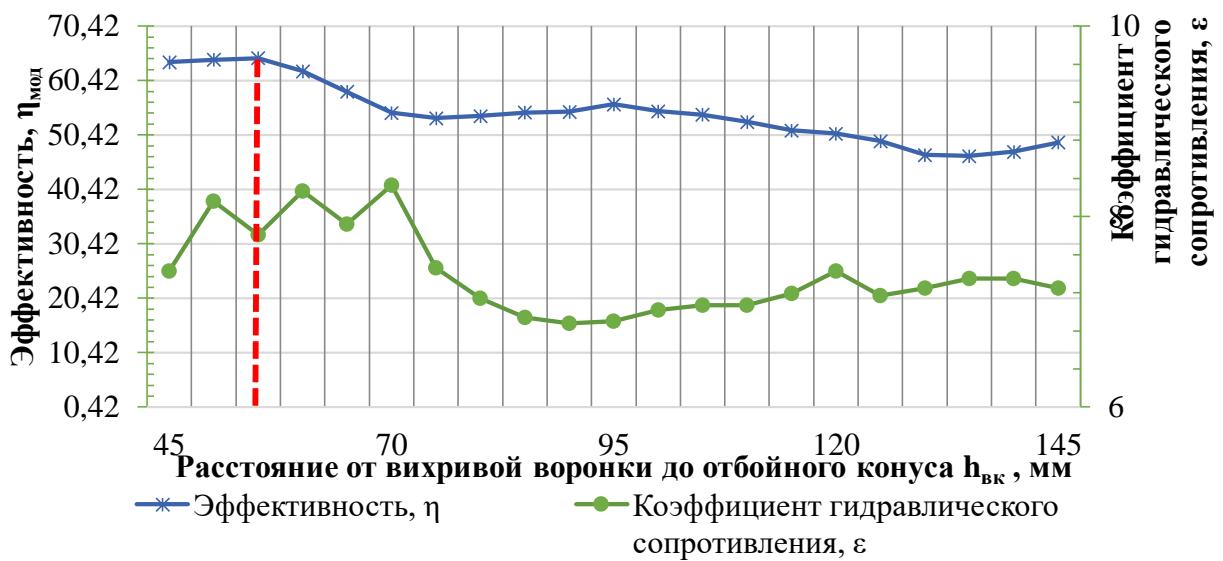


Рисунок 4.8. – Зависимость эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления от изменения расстояния от вихревой воронки до отбойного конуса.

Принимаем расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса равному 55 мм, при котором получено относительно наименьшее количество унесенных фракций с принятой размерностью и составило для: I (10 мкм) – 408 шт.; II (30 мкм) – 396 шт.; III (50 мкм) – 377 шт.; IV (70 мкм) – 378 шт.; V (90 мкм) – 359 шт.; VI (110) – 327 шт.; VII (130) – 310 шт.; VIII (150) – 284 шт. А эффективность составляет 64,5%, при этом коэффициент гидравлического сопротивления равен 7,81.

5) Высота отбойного конуса, $h_{\text{кон}}$

На графике (рисунок 4.9) прослеживается относительно стабильный однородный унос фракций в диапазоне от 50 мм до 90 мм, затем следует отметить изменение в диапазоне от 95 мм до 170 мм, при этом наименьший унос фракций всех размерностей наблюдается при размере вихревой воронки 130 мм, при котором количество унесенных фракций: I (10 мкм) – 407 шт.; II (30 мкм) – 393 шт. ; III (50 мкм) – 80 шт. ; IV (70 мкм) – 358 шт. ; V (90 мкм) – 341 шт. ; VI (110) – 324 шт. ; VII (130) – 294 шт. ; VIII (150) – 269 шт.

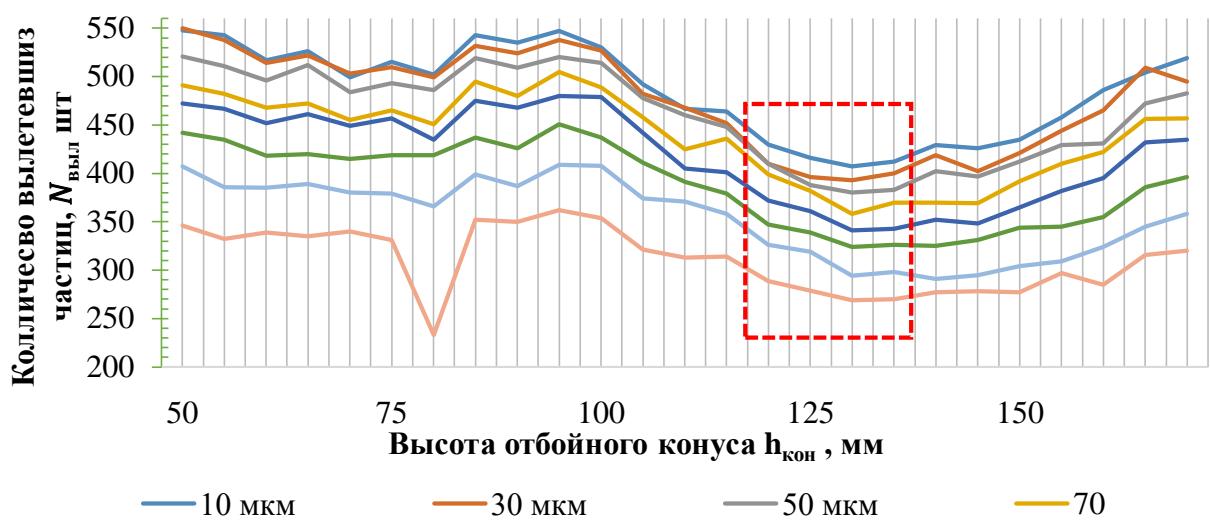


Рисунок 4.9. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения высоты отбойного конуса;.

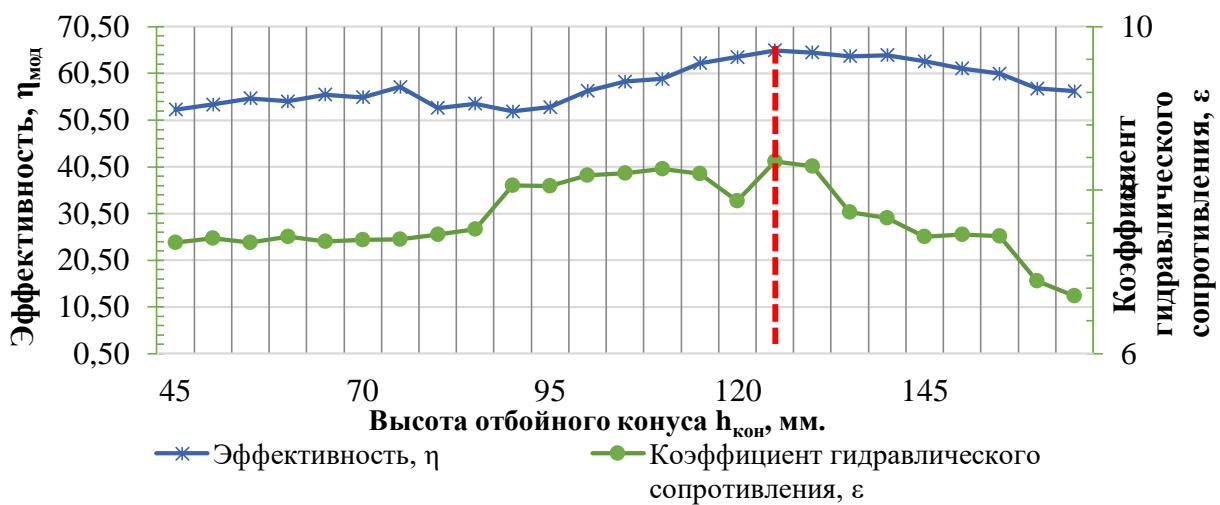


Рисунок 4.10. – Зависимость эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления от изменения высоты отбойного конуса.

На рисунке 4.10 прослеживается увеличение эффективности от 52% до 65% в диапазоне 90 – 125 мм, при этом коэффициент гидравлического сопротивления остается в пределах 8. Для дальнейших измерений принимаем высоту отбойного конуса 125 мм.

6) Диаметр отбойного конуса, $d_{\text{кон}}$

На графике, изображенном на рисунке 4.11, прослеживается увеличение числа вынесенных частиц всех размерностей в промежутке от 90 до 145 мм, на участке от 55 до 75 мм прослеживается относительно не высокий разбег по вылетевшим частицам всех размерностей.

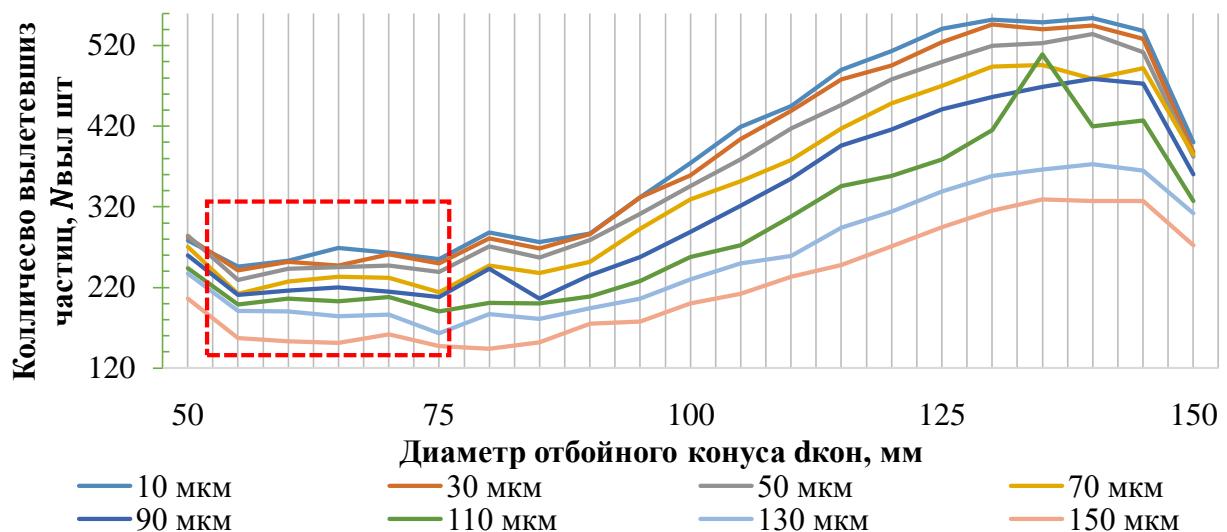


Рисунок 4.11. – Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения диаметра отбойного конуса;

На графике (Рисунок 4.12) наивысшая эффективность достигается при диаметре отбойного конуса в 75 мм, коэффициент гидравлического сопротивления в данной точке 5,64, так же следует отметить, что, при достижении диаметра воронки от 85 до 135 мм, наблюдается линейная зависимость снижения эффективности отделения от 77% до 52%. При этом, коэффициент гидравлического сопротивления имеет разброс значений в диапазоне 5,67–7,54.

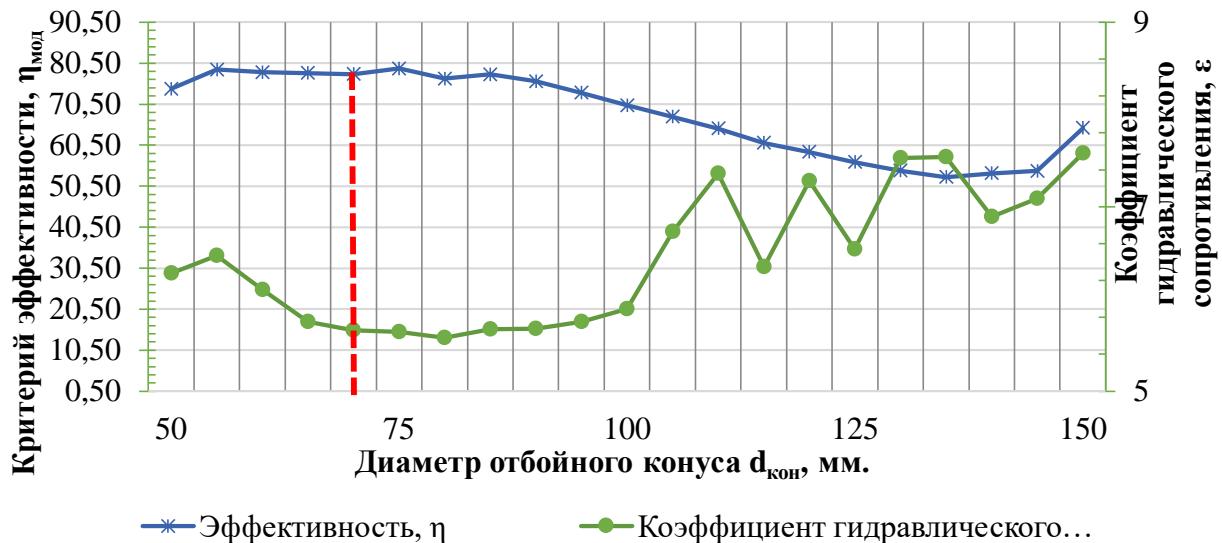


Рисунок 4.12. – Зависимость эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления от изменения диаметра отбойного конуса.

Результаты вычислений и полученных зависимостей эффективности от конструктивных параметров двухступенчатого циклона представлены в Приложении А. Расчетные точки с полями распределения давлений по всему объему циклона в сечении по оси XY представлены в Приложении Б.

4.2 Результаты проведения многофакторного эксперимента численным методом

Для учета влияния факторов друг на друга проведен многофакторный эксперимент в среде моделирования. На основании теоретических положений центробежной сепарации в качестве значимых факторов выделены – скорость потока на входе в циклон и массовый расход смеси. На основании проведенных однофакторных экспериментов выделены конструктивные элементы – высота вихревой воронки и высота отбойного конуса. Составлена таблица варьирования факторов таблица 4.2

На основании методики, описанной в п.3.3, проведен ряд испытаний, с учетом основных факторов, оказывающих влияние на процесс отделения. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.3, где, Y_1 – эффективность отделения η_{mod} (по формуле 3.3), Y_2 – коэффициент

гидравлического сопротивления ε_1 .

Таблица 4.2 – Уровни варьирования факторов экспериментов

| Факторы | Условные обозначения | Код | Уровни факторов | | | Интервал варьирования |
|-----------------------------|----------------------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------------|
| | | | -1 | 0 | +1 | |
| Массовый расход, кг/сек | q_1 | X_1 | 0,105 | 0,205 | 0,305 | 0,1 |
| Скорость на входе, м/сек | U_1 | X_2 | 15 | 20 | 25 | 5 |
| Высота вихревой воронки, мм | $h_{\text{вх}}$ | X_3 | 145 | 165 | 185 | 20 |
| Высота отбойного конуса, мм | $h_{\text{кон}}$ | X_4 | 120 | 140 | 160 | 20 |

Таблица 4.3 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y_1 | Y_2 |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | +1 | +1 | 0 | 0 | 97,881 | 2.99 |
| 2 | +1 | -1 | 0 | 0 | 97,474 | 2.86 |
| 3 | -1 | +1 | 0 | 0 | 97,878 | 2.99 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | 0 | 97,451 | 2.86 |
| 5 | 0 | 0 | +1 | +1 | 97,842 | 2.97 |
| 6 | 0 | 0 | +1 | -1 | 97,829 | 2.95 |
| 7 | 0 | 0 | -1 | +1 | 97,665 | 2.87 |
| 8 | 0 | 0 | -1 | -1 | 97,678 | 2.99 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,715 | 3.00 |
| 10 | +1 | 0 | 0 | +1 | 97,706 | 2.91 |
| 11 | +1 | 0 | 0 | -1 | 97,737 | 2.84 |
| 12 | -1 | 0 | 0 | +1 | 97,711 | 2.91 |
| 13 | -1 | 0 | 0 | -1 | 97,741 | 2.83 |
| 14 | 0 | +1 | +1 | 0 | 98,000 | 3.06 |
| 15 | 0 | +1 | -1 | 0 | 97,900 | 2.96 |
| 16 | 0 | -1 | +1 | 0 | 97,618 | 3.01 |
| 17 | 0 | -1 | -1 | 0 | 97,450 | 2.97 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,726 | 3.00 |
| 19 | +1 | 0 | +1 | 0 | 97,842 | 3.03 |
| 20 | +1 | 0 | -1 | 0 | 97,658 | 2.95 |
| 21 | -1 | 0 | +1 | 0 | 97,847 | 3.06 |
| 22 | -1 | 0 | -1 | 0 | 97,656 | 2.95 |
| 23 | 0 | +1 | 0 | +1 | 97,886 | 2.99 |
| 24 | 0 | +1 | 0 | -1 | 97,882 | 2.94 |
| 25 | 0 | -1 | 0 | +1 | 97,454 | 2.85 |

| | | | | | | |
|----|---|----|---|----|--------|------|
| 26 | 0 | -1 | 0 | -1 | 97,460 | 2.86 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,714 | 3.00 |

В таблице 4.4 представлены результаты экспериментальных опытов. В ходе экспериментов в качестве факторов исследовались массовый расход, кг/сек q ; скорость на входе, м/сек U ; высота вихревой воронки, мм h_{ex} ; высота отбойного конуса, мм h_{kon} ;

В качестве независимых параметров для определения рациональных параметров выбраны: коэффициент эффективности Y_1 ; коэффициент гидравлического сопротивления Y_2 .

По результатам проведенных экспериментов в среде моделирования и их статистической обработки с использованием стандартных программ получены уравнения регрессии в виде $Y_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$ и $Y_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$.

Построение математической модели эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления проводились согласно методике 3.1 по матрице плана экспериментов, (таблица 3.1). После проведения экспериментов и получения откликов функций по средствам Microsoft Office Excel, встроенного в него средств Анализа данных, полученная матрица вариаций экспериментов Приложение В.

После выбора областей переменных, включающих в себя области значений факторов и области отклика для Y_1 , полученное уравнение, описывающее математическую модель коэффициента эффективности Y_1 , имеет следующий вид.

$$Y_1 = 97.718 + 0.000975x_1 + 0.21x_2 + 0.0809x_3 - 0.00532x_4 - 0.00499x_1^2 - 0.0359x_2^2 + 0.0455x_3^2 - 0.00386x_4^2 - 0.00495x_1x_2 - 0.0018x_1x_3 - 0.000225x_1x_4 - 0.0168x_2x_3 + 0.00247x_2x_4 + 0.00653x_3x_4 \quad (4.1)$$

При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0.996$, что подтверждает тесную зависимость факторов от отклика функции.

Проверка коэффициентов на значимость (Таблица 4.4). При условии, что $|p\text{-значения}| < 0.05$:

Таблица 4.4 – Значимость коэффициентов

| № п/п | Фактор | Коэффициент уравнения | P-значение | Значимость |
|----------|----------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | Свободный член | 97,7182 | $5,11 \cdot 10^{-42}$ | $< 0,05 $ значим |
| 2 | X_1 | 0,000975 | 0,868 | $> 0,05 $ |
| 3 | X_2 | 0,21 | $1,22 \cdot 10^{-13}$ | $< 0,05 $ значим |
| 4 | X_3 | 0,08085 | $8,69 \cdot 10^{-9}$ | $< 0,05 $ значим |
| 5 | X_4 | -0,005325 | 0,38 | $> 0,05 $ |
| 6 | X_1^2 | -0,0049875 | 0,58 | $> 0,05 $ |
| 7 | X_2^2 | -0,035925 | 0,0013 | $< 0,05 $ значим |
| 8 | X_3^2 | 0,045525 | 0,00021 | $< 0,05 $ значим |
| 9 | X_4^2 | -0,0038625 | 0,66 | $> 0,05 $ |
| 10 | $X_1 X_2$ | -0,00495 | 0,63 | $> 0,05 $ |
| 11 | $X_1 X_3$ | -0,0018 | 0,86 | $> 0,05 $ |
| 12 | $X_1 X_4$ | -0,000225 | 0,98 | $> 0,05 $ |
| 13 | $X_2 X_3$ | -0,016875 | 0,12 | $> 0,05 $ |
| 14 | $X_2 X_4$ | 0,002475 | 0,81 | $> 0,05 $ |
| 15 | $X_3 X_4$ | 0,006525 | 0,53 | $> 0,05 $ |

По формулам, представленным для раскодирования переменных, $X_{\text{осн}} = 0,205 \text{ кг/с}$, $X_{\text{инт}} = 0,1 \text{ кг/с}$, тогда

$$X_1 = \frac{q_1 - 0,205}{0,1} \quad (4.2)$$

для переменной U_2 -скорость на входе $X_{\text{осн}} = 20 \text{ м/с}$, $X_{\text{инт}} = 5 \text{ м/с}$, тогда

$$X_2 = \frac{U_1 - 20}{5} \quad (4.3)$$

для переменной $h_{\text{вх}}$ - высота вихревой воронки $X_{\text{осн}} = 165 \text{ мм}$, $X_{\text{инт}} = 20 \text{ мм}$, тогда

$$X_3 = \frac{h_{\text{вх}} - 165}{20} \quad (4.4)$$

для переменной $h_{\text{кон}}$ – высота отбойного конуса $X_{\text{осн}} = 140$ мм, $X_{\text{инт}} = 20$, тогда

$$X_4 = \frac{h_{\text{кон}} - 140}{20} \quad (4.5)$$

В полном виде уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{мод}} = & 98.387 + 0.576q - 0.126U - 0.0323h_{\text{вх}} - 0.000733h_{\text{кон}} - 0.499q^2 - \\ & 0.00144U^2 + 0.000114h_{\text{вх}}^2 - 0.00000965h_{\text{кон}}^2 - 0.0099qU - 0.0009qh_{\text{вх}} - \\ & 0.000113qh_{\text{кон}} - 0.000168Uh_{\text{вх}} + 0.000025Uh_{\text{кон}} + 0.0000163h_{\text{вх}}h_{\text{кон}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

При определении значимости коэффициентов уравнение:

$$\eta_{\text{мод}} = 98.387 - 0.0323h_{\text{вх}} + 0.126U + 0.000114h_{\text{вх}}^2 - 0.00144U^2 \quad (4.7)$$

Математическая модель коэффициента гидравлического сопротивления отклика Y_2 , по полученным данным в ходе компьютерного моделирования, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} Y_1 = & 3 - 8,196 \cdot 10^{-18}x_2 + 0,0438x_2 + 0,0254x_3 + 0,00892x_4 - \\ & 0,0439x_1^2 - 0,0204x_2^2 + 0,0229x_3^2 - 0,0799x_4^2 - 1,387 \cdot 10^{-17}x_1x_2 + 3,59 \cdot \\ & 10^{-18}x_1x_3 - 2,353x_1x_4 \cdot 10^{-18} + 0,0143x_2x_3 + 0,0133x_2x_4 + \\ & 0,0402x_3x_4 \quad (4.8) \end{aligned}$$

Коэффициент детерминации при этом 0,88 что говорит нам о более сложных взаимосвязях функций отклика и факторов значений.

После определения значимости коэффициентов уравнения математической модели, уравнение, примет следующий вид:

$$Y_1 = 3 + 0,0438x_2 - 0,0439x_1^2 - 0,0799x_4^2 \quad (4.9)$$

Проверка коэффициентов на значимость (Таблица 4.5). При условии, что $|p\text{-значения}| < 0,05|$:

Таблица 4.5 – Значимость коэффициентов

| № п/п | Фактор | Коэффициент уравнения | P-значение | Значимость |
|----------|----------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | Свободный член | 3,00035261 | $4,19 \cdot 10^{-20}$ | $< 0,05$ значим |

| | | | | |
|----|-----------|---------------------------|--------|------------------|
| 2 | X_1 | $-8,19681 \cdot 10^{-18}$ | 1 | $> 0,05 $ |
| 3 | X_2 | 0,043725073 | 0,0032 | $< 0,05 $ значим |
| 4 | X_3 | 0,025366341 | 0,0551 | $> 0,05 $ |
| 5 | X_4 | 0,008928343 | 0,47 | $> 0,05 $ |
| 6 | X_1^2 | -0,043875646 | 0,03 | $< 0,05 $ значим |
| 7 | X_2^2 | -0,02041594 | 0,28 | $> 0,05 $ |
| 8 | X_3^2 | 0,02294962 | 0,22 | $> 0,05 $ |
| 9 | X_4^2 | -0,079977336 | 0,0008 | $< 0,05 $ значим |
| 10 | $X_1 X_2$ | $-1,38778 \cdot 10^{-17}$ | 1 | $> 0,05 $ |
| 11 | $X_1 X_3$ | $3,59036 \cdot 10^{-18}$ | 1 | $> 0,05 $ |
| 12 | $X_1 X_4$ | $-2,35327 \cdot 10^{-18}$ | 1 | $> 0,05 $ |
| 13 | $X_2 X_3$ | 0,014376207 | 0,49 | $> 0,05 $ |
| 14 | $X_2 X_4$ | 0,013303375 | 0,53 | $> 0,05 $ |
| 15 | $X_3 X_4$ | 0,040214545 | 0,074 | $> 0,05 $ |

Таким образом уравнение в раскодированном виде примет следующий вид: $\varepsilon = 3 + 0.00876(U_1 - 20) - 4,39(q_1 - 0.205)^2 - 0.0002(h_{\text{кон}} + 140)^2$

(4.10)

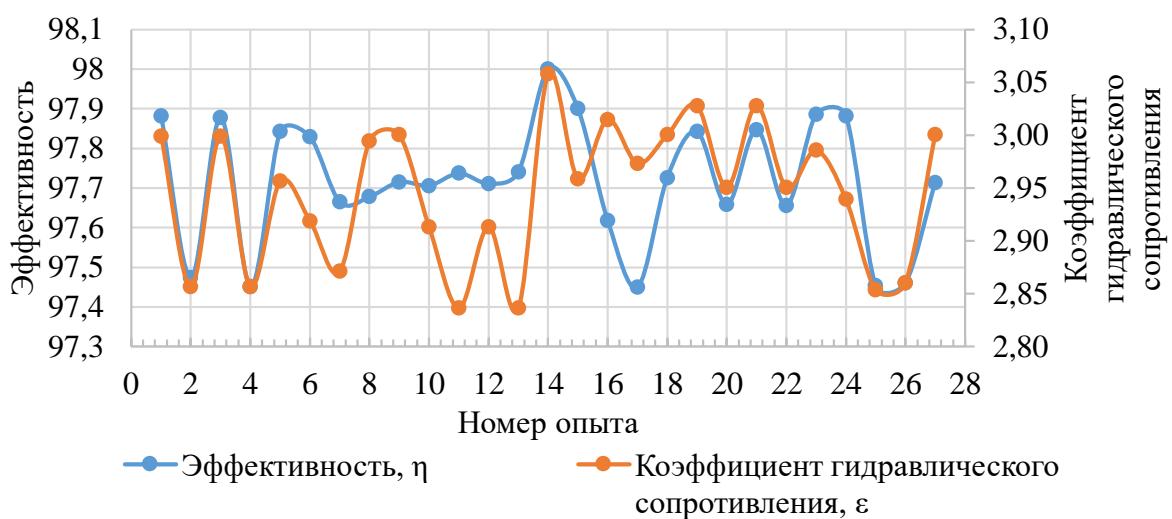


Рисунок 4.13. – Проецирование эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления в сходственных точках.

График полученных значений коэффициента эффективности и

коэффициента гидравлического сопротивления, в зависимости от номера опыта, представлен на рисунке 4.13.

На графике наблюдается, что при повышении эффективности процесса отделения в двухступенчатом циклоне, также увеличивается и его гидравлическое сопротивление, таким образом, данные параметры косвенно связаны схожими зависимостями.

Поля распределения давлений, а также данные, полученные для вычислений гидравлического сопротивления, в результате проведения численного моделирования по матрице Бокса-Бенкена представлены в Приложении В.

4.3 Результаты проведения многофакторного эксперимента полученных физическим экспериментом

По матрице проведения эксперимента компьютерного моделирования таблица 4.3 проведен ряд испытаний на экспериментальной установке п. 3.6 с уровнями варьирования, определенных в ходе численного моделирования таблица 4.2.

Полученные данные в ходе проведения натурных экспериментов, представлены в Приложении Г, а полная матрица экспериментов полностью соответствует матрице, представленной в Приложении В.

Полученная матрица планирования натурных экспериментов представлена в таблице 4.6.

где Y_1 – эффективность отделения 1 повторности, Y_2 – эффективность отделения 2 повторности, Y_3 – эффективность отделения 3 повторности, Y_{cp} – эффективность средняя.

Таблица 4.6 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_{cp} |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|
| 1 | +1 | +1 | 0 | 0 | 99,690 | 99,704 | 99,737 | 99,710 |
| 2 | +1 | -1 | 0 | 0 | 99,358 | 99,379 | 99,388 | 99,375 |
| 3 | -1 | +1 | 0 | 0 | 99,655 | 99,657 | 99,661 | 99,658 |

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 4 | -1 | -1 | 0 | 0 | 99,443 | 99,451 | 99,462 | 99,452 |
| 5 | 0 | 0 | +1 | +1 | 99,576 | 99,576 | 99,577 | 99,576 |
| 6 | 0 | 0 | +1 | -1 | 99,729 | 99,742 | 99,759 | 99,743 |
| 7 | 0 | 0 | -1 | +1 | 99,580 | 99,594 | 99,612 | 99,595 |
| 8 | 0 | 0 | -1 | -1 | 99,622 | 99,650 | 99,669 | 99,647 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99,451 | 99,452 | 99,454 | 99,452 |
| 10 | +1 | 0 | 0 | +1 | 99,483 | 99,495 | 99,514 | 99,497 |
| 11 | +1 | 0 | 0 | -1 | 99,657 | 99,658 | 99,659 | 99,658 |
| 12 | -1 | 0 | 0 | +1 | 99,550 | 99,560 | 99,566 | 99,559 |
| 13 | -1 | 0 | 0 | -1 | 99,606 | 99,618 | 99,643 | 99,623 |
| 14 | 0 | +1 | +1 | 0 | 99,833 | 99,840 | 99,851 | 99,842 |
| 15 | 0 | +1 | -1 | 0 | 99,621 | 99,636 | 99,663 | 99,640 |
| 16 | 0 | -1 | +1 | 0 | 99,392 | 99,408 | 99,437 | 99,412 |
| 17 | 0 | -1 | -1 | 0 | 99,313 | 99,337 | 99,350 | 99,333 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99,422 | 99,452 | 99,471 | 99,448 |
| 19 | +1 | 0 | +1 | 0 | 99,664 | 99,666 | 99,668 | 99,666 |
| 20 | +1 | 0 | -1 | 0 | 99,624 | 99,638 | 99,646 | 99,636 |
| 21 | -1 | 0 | +1 | 0 | 99,671 | 99,688 | 99,704 | 99,688 |
| 22 | -1 | 0 | -1 | 0 | 99,634 | 99,641 | 99,657 | 99,644 |
| 23 | 0 | +1 | 0 | +1 | 99,543 | 99,546 | 99,539 | 99,542 |
| 24 | 0 | +1 | 0 | -1 | 99,778 | 99,780 | 99,782 | 99,780 |
| 25 | 0 | -1 | 0 | +1 | 99,393 | 99,414 | 99,404 | 99,404 |
| 26 | 0 | -1 | 0 | -1 | 99,390 | 99,391 | 99,390 | 99,390 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99,424 | 99,490 | 99,455 | 99,456 |

После выбора областей переменных, включающих в себя области значений факторов и области отклика для Y_1 , полученное уравнение, описывающее математическую модель коэффициента эффективности Y_1 , имеет следующий вид.

$$Y_1 = 99,452 - 0,00666x_1 - 0,15x_2 + 0,0359x_3 - 0,0557x_4 + 0,083x_1^2 + 0,00502x_2^2 + 0,116x_3^2 + 0,0645x_4^2 + 0,0324x_1x_2 - 0,00338x_1x_3 - 0,0242x_1x_4 + 0,0307x_2x_3 - 0,0628x_2x_4 - 0,0287x_3x_4 \quad (4.11)$$

При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,964$, что подтверждает тесную зависимость факторов от отклика функции.

Проверка коэффициентов на значимость п. 3.5 (Таблица 4.7). При условии, что $|p\text{-значения}| < 0,05$:

Таблица 4.7 – Значимость коэффициентов

| № п/п | Фактор | Коэффициент уравнения | P-значение | Значимость |
|----------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | Свободный член, b_0 | 99,45203333 | $7,54 \cdot 10^{-39}$ | $<0,05$ значим |
| 2 | X_1 | -0,006656667 | 0,55 | $>0,05$ |
| 3 | X_2 | 0,150452778 | $9,16 \cdot 10^{-9}$ | $<0,05$ значим |
| 4 | X_3 | 0,035902778 | 0,006 | $<0,05$ значим |
| 5 | X_4 | -0,055615556 | 0,0002 | $<0,05$ значим |
| 6 | X_1^2 | 0,083382222 | 0,0002 | $<0,05$ значим |
| 7 | X_2^2 | 0,005021389 | 0,76 | $>0,05$ |
| 8 | X_3^2 | 0,115504722 | $1,21 \cdot 10^{-5}$ | $<0,05$ значим |
| 9 | X_4^2 | 0,064540556 | 0,0018 | $<0,05$ значим |
| 10 | X_1X_2 | 0,032416667 | 0,109 | $>0,05$ |
| 11 | X_1X_3 | -0,003375 | 0,86 | $>0,05$ |
| 12 | X_1X_4 | -0,024205 | 0,22 | $>0,05$ |
| 13 | X_2X_3 | 0,030725 | 0,13 | $>0,05$ |
| 14 | X_2X_4 | -0,0628 | 0,005 | $<0,05$ значим |
| 15 | X_3X_4 | -0,028658333 | 0,15 | $>0,05$ |

После раскодирования уравнение в полном виде примет вид:

$$\eta_{\text{эксп}} = 107,7 - 2,808q + 0,0461U - 0,0893h_{\text{вх}} - 0,0211h_{\text{кон}} + 8,34q^2 + 0,00029h_{\text{вх}}^2 + 0,000161h_{\text{кон}}^2 - 0,000628Uh_{\text{кон}} \quad (4.12)$$

При определении значимости коэффициентов:

$$\eta_{\text{эксп}} = 107,7 - 2,808q + 0,00461U - 0,0893h_{\text{вх}} - 0,0211h_{\text{кон}} + 8,34q^2 + 0,00029h_{\text{вх}}^2 + 0,000161h_{\text{кон}}^2 - 0,000628Uh_{\text{кон}} \quad (4.13)$$

Анализ значений коэффициентов уравнения регрессии свидетельствует о влиянии рассматриваемых факторов на эффективность процесса отделения. Отрицательные линейные коэффициенты при параметрах q и $h_{\text{вх}}$ указывают на снижение эффективности сепарации с их увеличением в нижней части

исследуемого диапазона. Однако положительный знак коэффициента при квадратичном члене q^2 свидетельствует о наличии экстремума: при значениях $q > 0,25$ кг/с эффективность отделение начинает возрастать, что подтверждается соответствующей формой поверхности отклика (рисунок 4.14), максимальная эффективность достигается при q от 0,275 до 0,305 и при h_{ex} от 180 до 185 мм.

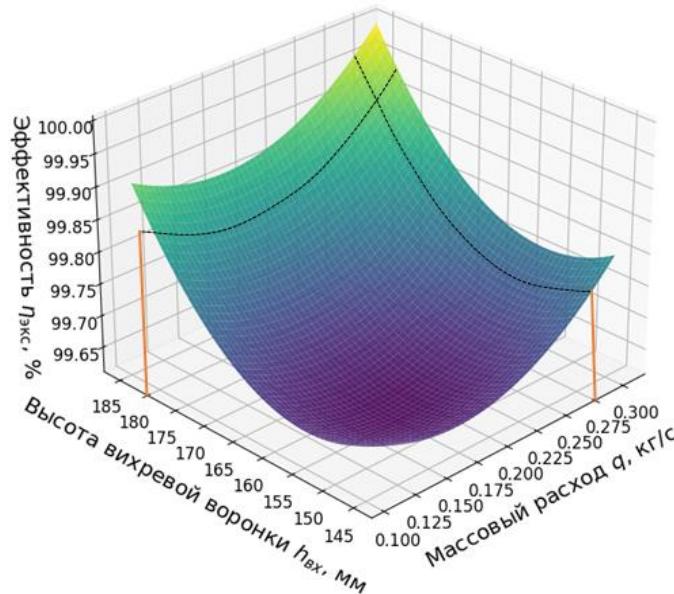


Рисунок 4.14. – Влияние q и h_{ex} на $\eta_{\text{экс}}$.

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

Используя функцию «Поиск решения» в Excel по уравнению, полученной в результатах компьютерного моделирования, определены значения рациональных конструктивно-режимных параметров: $q=0,305$ кг/с; $U=25$ м/с; $h_{bx}=185$ мм; $h_{kon}=120$ мм, при которых эффективность отделения в циклоне оставила 98%.

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

частиц восходящим потоком.

На рисунке 4.15 представлены одномерные зависимости эффективности отделения от каждого фактора при фиксированных уровнях остальных параметров: $q=0,305 \text{ кг/с}$, $U=25 \text{ м/с}$, $h_{bx}=185 \text{ мм}$ и $h_{kon}=120 \text{ мм}$.

На графике зависимости эффективности от массового расхода (Рисунок 4.15, а) наблюдается параболический характер кривой: в области $q < 0,2 \text{ кг/с}$ эффективность падает, однако при $q > 0,2 \text{ кг/с}$ происходит рост эффективности, что соответствует положительному коэффициенту при q^2 в уравнении регрессии.

Зависимость $\eta=f(U)$ (Рисунок 4.15, б) демонстрирует устойчивый рост эффективности с увеличением скорости потока, что связано с усилением центробежных сил. Максимум достигается при $U=25 \text{ м/с}$. График $\eta=f(h_{bx})$ (рисунок 4.15, в) указывает на снижение эффективности при уменьшении высоты воронки, с минимальным значением от 145 до 160 мм. Влияние h_{kon} (рисунок 4.15, г) проявляется в уменьшении эффективности в диапазоне от 120 до 155мм.

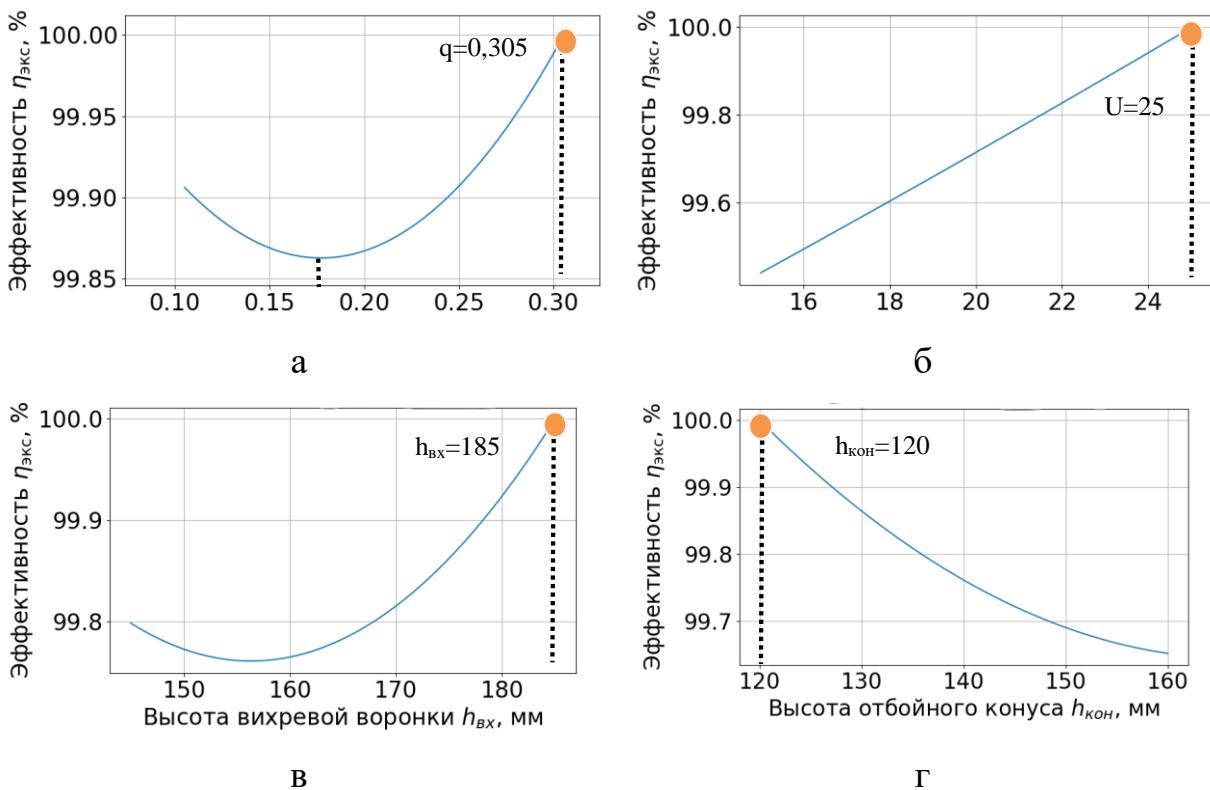


Рисунок 4.15. – Зависимость $\eta_{\text{экс}}$ от исследуемых факторов:

а - зависимость q от $\eta_{\text{экс}}$; б - зависимость U от $\eta_{\text{экс}}$;

в - зависимость $h_{\text{вх}}$ от $\eta_{\text{экс}}$; г - зависимость $h_{\text{кон}}$ от $\eta_{\text{экс}}$.

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

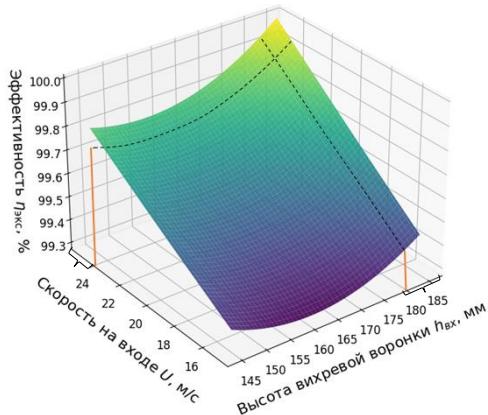


Рисунок 4.16. – Влияние $h_{\text{вх}}$ и U на $\eta_{\text{экс}}$

, %.

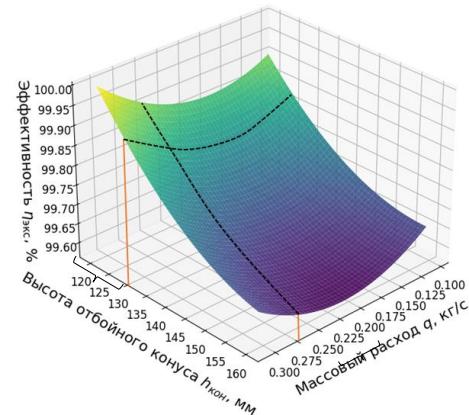


Рисунок 4.17. – Влияние q и $h_{\text{кон}}$ на

$\eta_{\text{экс}}$, %.

Поверхность $\eta = f(U, h_{\text{вх}})$ (Рисунок 4.16) имеет вытянутый максимум в области высоких значений скорости воздуха ($U \geq 23$ м/с) и высоты вихревой воронки ($h_{\text{вх}} \geq 180$ мм), что отражает синергетический эффект этих параметров. На поверхности $\eta = f(h_{\text{кон}}, q)$ (Рисунок 4.17) прослеживается область максимума при сочетании $q \approx 0.305$ кг/с и $h_{\text{кон}} \approx 120$ мм, что соответствует оптимальным геометрическим условиям для формирования стабильного вихревого потока.

Для визуальной оценки, полученных результатов эффективности процесса теоретической и практической модели представлены на графике (рисунок 4.18). Необходимо отметить, что наблюдаются общие закономерности, описывающие изменения эффективности процесса в сходственных точках плана многофакторного эксперимента.

Таким образом, при использовании уточняющего коэффициента при компьютерном моделировании, относительная погрешность результатов,

полученных численным моделированием и экспериментальным путем не превышает 2%, что говорит об успешном использовании принятого метода для проектирования двухступенчатого циклона.

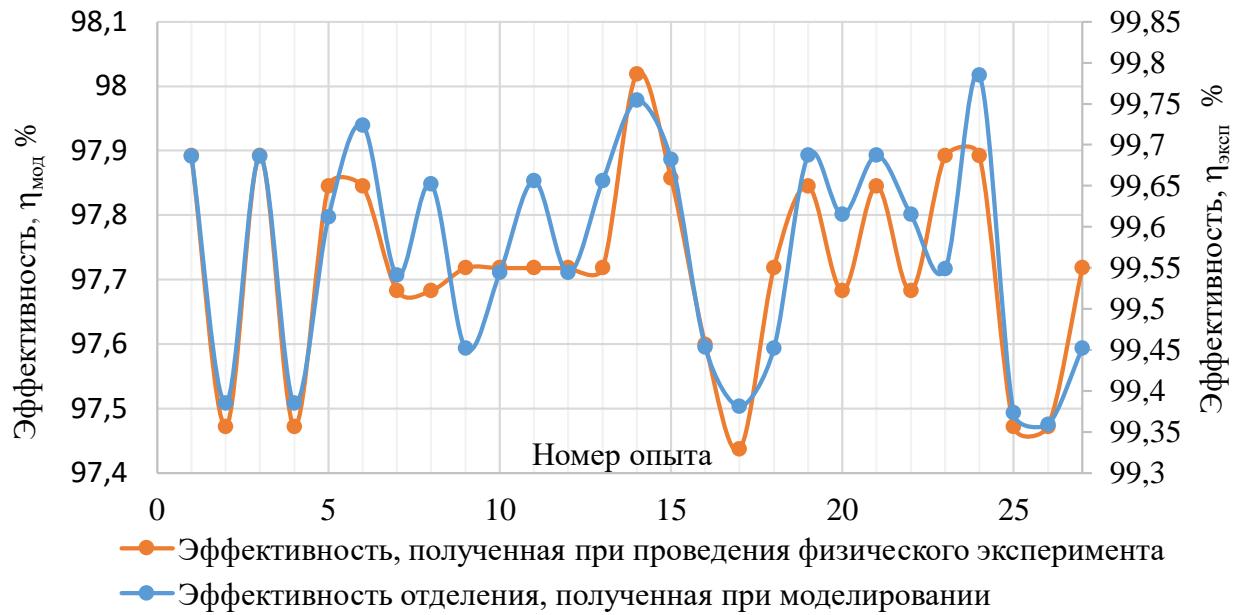


Рисунок 4.18. – Отклонение значений эффективности процесса отделения при компьютерном моделировании и физическом эксперименте в сходственных точках плана эксперимента

При подстановке этих же значений в уравнение, полученного при проведении физического эксперимента, эффективность процесса стремится к 100%.

Построчная оценка дисперсии воспроизводимости единичного результата измерения в каждом опыте:

$$S^2(Y_u)_k = \frac{\sum_{k=1}^{m_u} |(Y_u)_k - \bar{Y}_u|^2}{m-1}, \quad (4.14)$$

Оценка однородности дисперсии по Кохрену:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_i s_i^2} = \frac{0,00109}{0,00638} = 0,172, \quad (4.15)$$

Сравнение расчетного значения с табличным при $m=3$ и $n=27$ $G_m=0,2167$:

$$G=0,172 < 0,235,$$

Расчет значимости модели:

Гипотеза об однородности дисперсии подтвердилась.

N -общее число наблюдений ($n=27$), p -число параметров модели ($p=15$)

y_i - экспериментальные данные;

\hat{y}_i - значения, рассчитанные по модели;

\bar{y} - среднее экспериментальных значений;

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{27} \sum_{i=1}^{27} (y_i - \hat{y}_i)^2 \approx 99,578 \quad (4.16)$$

сумма квадратов остатков (ошибка модели);

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0,0169 \quad (4.17)$$

сумма квадратов отклонений предсказаний модели от среднего;

$$S \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 0,4714 \quad (4.18)$$

$S_{\text{ад}}^2$ -оценка дисперсии остатков;

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = 0.0303 \quad (4.19)$$

$S_{\text{воспр}}^2$ -оценка дисперсии остатков;

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0.00154 \quad (4.20)$$

Для проверки адекватности модели, рассчитывалась дисперсия адекватности по формуле (3.14), при $f=N-(k+1)=27-(8+1)=18$:

Проверку адекватности модели проводим с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2(\bar{Y}_U)} = \frac{0,00354}{0,02363} = 1,31, \quad (4.21)$$

Модель считается адекватной, если расчетное значение F – критерия не превышает табличного, в данном случае $F=1,93>1,31$, следовательно, модель адекватна.

4.4 Результаты сравнительных испытаний с серийно выпускаемой моделью циклона БЦР.

В ходе проведения сравнительных испытаний на имеющемся циклоне БЦР-450, установленном на комбикормовом мини-заводе, поставляемым компанией ООО «Агро Поставка» имеющимся на кафедре Механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Инженерного института, Новосибирского государственного аграрного университета, получены следующие данные таблица 4.8.

Максимальная эффективность циклона БЦР-450 при одинаковых условиях, с предлагаемой моделью двухступенчатого циклона, составила 99,51, при минимальных параметрах подачи и скорости.

Таблица 4.8 данные полученные в ходе сравнительных испытаний

| № опыта | X_1 | X_2 | Количество пыли, г | Эффективность, $\eta_{бцр}$ |
|---------|-------|-------|--------------------|-----------------------------|
| 1 опыт | -1 | 1 | 49,77 | 99,51 |
| 2 опыт | -1 | 0 | 78,81 | 99,28 |
| 3 опыт | -1 | +1 | 58,33 | 99,43 |
| 4 опыт | 0 | -1 | 87,58 | 99,14 |
| 5 опыт | 0 | 0 | 116,62 | 98,86 |
| 6 опыт | 0 | +1 | 145,66 | 98,57 |
| 7 опыт | +1 | -1 | 125,38 | 98,77 |
| 8 опыт | +1 | 0 | 154,42 | 98,49 |
| 9 опыт | +1 | +1 | 183,46 | 98,2 |

При проведении измерений гидравлического сопротивления двухступенчатого циклона и серийно выпускаемой модели использовалась трубка НИОГАЗА совместно с прибором ДМЦ-01М. Давление на

проектируемом циклоне составило $\Delta=730,75$ Па, а на серийной модели – $\Delta=519,9$ Па.

Для дальнейшего сравнения значения давления были преобразованы в коэффициент гидравлического сопротивления по формуле Юлиуса Вейсбаха по формуле 3.16: $\varepsilon_1 = 3,08$ для проектируемого циклона и $\varepsilon_2 = 2,86$ для серийной модели.

4.5 Результаты производственных испытаний

По определенным рациональным параметрам двухступенчатого циклона п.4.3, собран опытный образец циклона, который в дальнейшем сравнивается с серийно выпускаемой моделью циклона БЦР-450.

По методике, описанной в п. 3.8, проведены испытания. Влажность зерносмеси составляла 12,7%, и ячменя менее - 9%.

После проведения 360 кг на циклоне БЦР-450 материала, произведен процесс взвешивания фильтра, установленного на циклоне, и произведен демонтаж и монтаж двухступенчатого циклонного аппарата, на котором в последующем пропущено аналогично 360 кг материала. А также снимались показания с амперметра и вольтметра для вычисления мощностных показателей. Данные представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 Данные, полученные в ходе проведения производственных испытаний

| Параметр | БЦР-450 | Двухступенчатый циклон |
|---|---------|------------------------|
| Масса вынесенных частиц на фильтр элементе (через 360 кг пропущенного материала, г) | 1300 | 400 |
| Масса вынесенных частиц на фильтр мешках (через 640 кг пропущенного материала, г) | 2700 | 800 |

| | | |
|---|--|--|
| Производительность, кг/ч | $m_{mam} = 45 \text{ кг}; t_{замер} = 205 \text{ с}$ $Q = \frac{45}{205} \cdot 3600 = 790.2$ | $m_{mam} = 45 \text{ кг}; t_{замер} = 202 \text{ с}$ $Q = \frac{45}{202} \cdot 3600 = 801.9$ |
| Потребляемая мощность, кВт | $U=215\text{B}; I=11.6 \text{ A}$ $P=215 \cdot 11,6=2494(\text{на фазу})$ $P_{об}=7482 \text{ Вт}$ | $U=219\text{B}; I=11.4 \text{ A}$ $P=219 \cdot 11,4=2496,6(\text{на фазу})$ $P_{об}=7498 \text{ Вт}$ |
| Критерий эффективности при пропуске 360 кг на фильтр элементах, $\eta_{фильтр}$ | $\eta = \frac{M_{ул i}}{M_{исх i}} \cdot 100\%$ | |
| | $\eta = \frac{358,7}{360} \cdot 100 = 99,69$ | $\eta = \frac{359,6}{360} \cdot 100 = 99,94$ |
| Критерий эффективности при пропуске 360 кг на фильтр элементах, $\eta_{мешок}$ | $\eta = \frac{637,5}{640} \cdot 100 = 99,61$ | $\eta = \frac{639,4}{640} \cdot 100 = 99,9$ |

Таким образом, при использовании двухступенчатого циклона в качестве циклона-разгрузителя на комбикормовом мини-заводе, количество мелкодисперсного компонента, унесенного в выхлопной патрубок циклона, уменьшается в среднем в 3 раза (Рисунок 4.19), при этом при уменьшении сопротивления на выхлопном патрубке циклона, эффективность предлагаемого решения не изменяется, в сравнении с серийно выпускаемой моделью (Рисунок 4.20).

Масса вынесенных частиц на фильтре указана с учетом массы мешка, масса которого составляет 200 грамм.

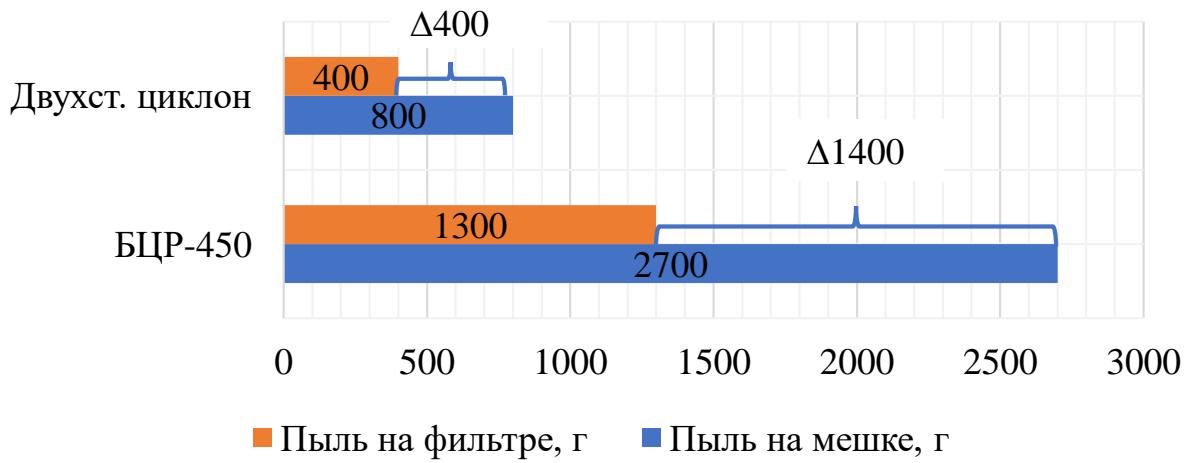


Рисунок 4.19. – Сравнение количества массы пыли.

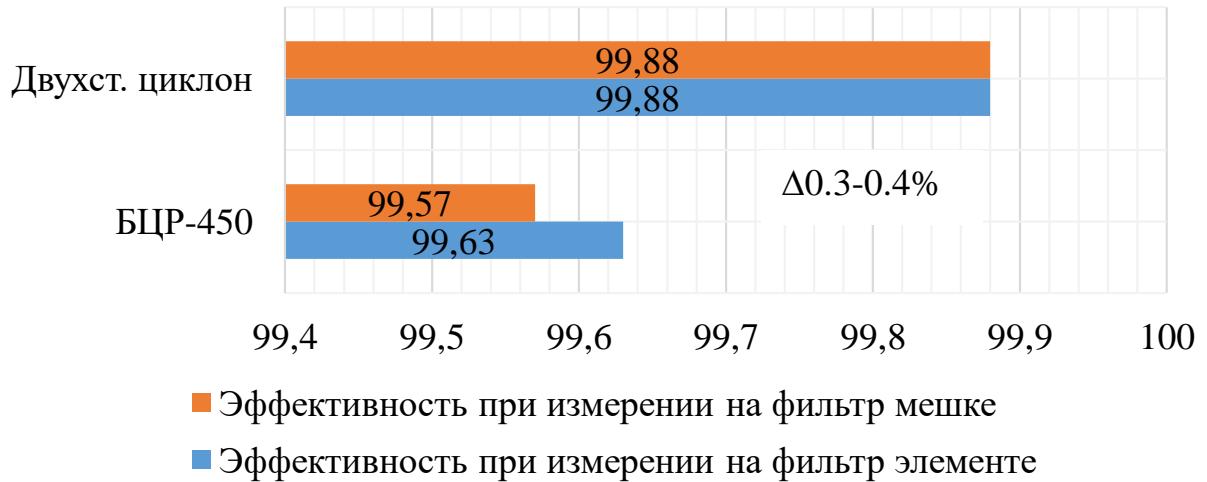


Рисунок 4.20. – Сравнение эффективности циклонов.

Также использование предлагаемого решения в качестве циклон-разгрузителя не влияет на общую производительность комбикормового завода, которая при зафиксированном положении заслонки эжектора, при нагрузке 7,5 кВт, составляет около 800 кг/ч. Это указывает на то, что повышенное гидравлического сопротивление не оказывает существенного влияния на пропускную способность циклона при использовании его в линии производства рассыпных кормов мини-завода производства ООО «Агропоставка» на предприятии АО «Чкаловское».

4.6 Выводы по главе

- Проведён ряд CFD-экспериментов, в ходе которых определены

рациональные размеры ключевых конструктивных элементов циклона — вихревой воронки $d_{ex} = 180$ мм, $h_{ex} = 150$ мм, цилиндрической вставки $h_{ub} = 295$ мм, отбойного конуса $h_{kon} = 155$ мм, $d_{kon} = 75$ мм и их взаиморасположения $h_{ek} = 55$ мм.

2. Проведен многофакторный регрессионный анализ показателей эффективности работы двухступенчатого циклона-разгрузителя в среде компьютерного моделирования SolidWorks FlowSimulation. На основании обработки данных, получена математическая модель в виде уравнения регрессии.

3. На основании полученных данных компьютерного моделирования проведен многофакторный физический эксперимент по аналогичной матрице многофакторного эксперимента, составленной в ходе компьютерного моделирования.

На основании полученной математической модели определены рациональные конструктивно-режимные параметры $q = 0,305$ кг/с; $U = 25$ м/с; $h_{ex} = 185$ мм; $h_{kon} = 120$ мм.

4. При анализе математических моделей, полученных в ходе численного моделирования и физического эксперимента, установлено, что относительная погрешность результатов составляет не более 2%.

5. Экспериментально подтверждена эффективность конструктивного решения двухступенчатого циклона-разгрузителя, которая составила, 99,9% (при коэффициенте гидравлического сопротивления $\varepsilon_1 = 3,08$) в сравнении со штатно выпускаемым циклоном БЦР-450 – 99,5% (При $\varepsilon_2 = 2,86$).

5. В ходе проведения производственных испытаний выявлено, что количество частиц, вылетающих в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона-разгрузителя, на 76% меньше, чем у серийно выпускаемого БЦР-450.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛОНА В ЛИНИИ КОМБИКОРМОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

5.1 Методика оценки эффективности

Экономическая эффективность применения двухступенчатого циклона для повышения эффективности процесса отделения в линии комбикормового мини-завода оценивается с использованием метода расчёта полной стоимости жизненного цикла (Life Cycle Costing, LCC). Этот метод позволяет учесть все возможные капитальные и эксплуатационные затраты на протяжении всего срока службы оборудования. Методика базируется на положениях ГОСТ Р 27.202–2012 [29], ГОСТ 7.32–2017 [28], а также международного стандарта ISO 15686-5:2017 [110], а также с учётом положений методических рекомендаций Минэкономразвития РФ [50] и нормативных указаний из Постановления Правительства РФ № 1470 [61].

Полная стоимость жизненного цикла (LCC) рассчитывается по формуле:

$$LCC = C_{kan} + (C_{сыр} + C_{энерг} + C_{обсл}) \cdot T, \quad (5.1)$$

где C_{kan} – капитальные затраты, руб.;

$C_{сыр}$ – годовые потери сырья, руб.;

$C_{энерг}$ – годовые расходы на электроэнергию, руб.;

$C_{обсл}$ – годовые затраты на обслуживание (в рамках данной работы не учитываются);

T – Срок службы оборудования, лет.

Для расчёта полного жизненного цикла были использованы следующие данные, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Исходные данные для расчёта показателей жизненного цикла

| Показатель | БЦР-450 | Двухступенчатый циклон |
|-------------------|---------|------------------------|
| Объём переработки | 504 000 | 504 000 |

| | | |
|--|-------|--------|
| комбикорма, кг/год. $M_{\text{год}}$ | | |
| Потери при использовании БЦР-450, г/кг. q_i | 3,91 | 0,9375 |
| Производительность дробилки, кг/ч Q_i | 790,2 | 801,9 |
| Цена комбикорма, руб./кг. $P_{\text{продукт}}$ | 25 | 25 |
| Мощность дробилки при работе с циклоном | 7482 | 7498 |
| Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч | 6 | 6 |
| Стоимость, руб | 15000 | 12000 |
| Срок службы, лет | 10 | 10 |

Объем переработки ($M_{\text{год}}$) материала рассчитан с учетом необходимого количества корма для предприятия АО Чкаловское.

$$M_{\text{год}} = 42000 \cdot 12 = 504\,000 \text{ кг} . \quad (5.2)$$

5.2 Расчет потерь комбикорма

Годовые потери комбикорма, при использовании БЦР-450 и двухступенчатого циклона, рассчитываются с учётом массы потерянного продукта, что напрямую влияет на экономику производства.

Формула для расчёта потерь:

$$M_{\text{пот}} = \left(\frac{m_{\text{вых}} - m_{\text{меш}}}{m_{\text{об}}} \right) \cdot M_{\text{год}} . \quad (5.3)$$

Для БЦР-450:

$$M_{\text{пот}} = \left(\frac{2700 - 200}{640} \right) \cdot 504000 \approx 1,97 \text{ т} . \quad (5.4)$$

Для двухступенчатого циклона:

$$M_{\text{пот}} = \left(\frac{800-200}{640} \right) \cdot 504000 \approx 0,4725 \text{ т} . \quad (5.5)$$

Далее рассчитываем денежную стоимость потерь:

$$C_{\text{сыр}} = M_{\text{пот}} \cdot P_{\text{продукт}}, \quad (5.6)$$

Для БЦР-450:

$$C_{\text{сыр}} = 1,97 \cdot 25 = 49250 \text{ руб}. \quad (5.7)$$

Для двухступенчатого циклона:

$$C_{\text{сыр}} = 0,4725 \cdot 25 = 11812,5 \text{ руб}. \quad (5.8)$$

5.3 Расчет энергопотребления

Энергопотребление для работы дробилок, при использовании обоих типов циклона, вычисляется по формуле:

$$E_{\text{год}} = \frac{N \cdot t}{1000}, \quad (5.9)$$

где N – мощность оборудования, Вт;

t – годовое время работы, ч.

Тогда стоимость электроэнергии:

$$C_{\text{энерг}} = E_{\text{год}} \cdot \text{Стоимость электроэнергии, руб./кВт} \cdot \text{ч},$$

Для двухступенчатого циклона:

$$t = \frac{M_{\text{год}}}{Q_{\text{двух}}} = \frac{504000}{801,9} \approx 628,6 \text{ ч} \quad (5.10)$$

$$E_{\text{год}} = \frac{7498 \cdot 628,6}{1000} \approx 4712,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.11)$$

$$C_{\text{энерг}} = 4715,8 \cdot 6 = 28275 \text{ руб}. \quad (5.12)$$

Для БЦР-450:

$$t = \frac{M_{\text{год}}}{Q_{\text{бцр}}} = \frac{504000}{790,2} \approx 637,8 \text{ ч} \quad (5.13)$$

$$E_{\text{год}} = \frac{7498 \cdot 637,8}{1000} \approx 4782,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.14)$$

$$C_{\text{энерг}} = 4771,1 \cdot 6 = 28694 \text{ руб}. \quad (5.15)$$

5.4 Сравнительный анализ

Таблица 4.2 — Сравнение полной стоимости жизненного цикла

| Показатель | БЦР-450 | Двухступенчатый циклон |
|--|---------|------------------------|
| Капитальные вложения, руб. | 15000 | 12000 |
| Годовые потери комбикорма, руб. | 49250 | 11812,5 |
| Годовые затраты на электроэнергию, руб. | 28694 | 28275 |
| Итого эксплуатационные расходы в год, руб. | 77944 | 40087,5 |
| Эксплуатационные расходы за 10 лет, руб. | 779440 | 400875 |
| ИТОГО LCC за 10 лет, руб. | 794440 | 412875 |
| Экономия за жизненный цикл, руб. | — | 381565 |

5.5 Экономическая эффективность

Годовая экономия:

$$\Delta_{год} = (49250 + 28694) - (11812,5 + 28275) = 77944 - 40087,5 = 37856,5. \quad (5.16)$$

Срок окупаемости:

$$C_{энерг} = \frac{\text{Стоимость}_{дв}}{\Delta\text{год}} = \frac{12000}{37856,5} \approx 0,32 \text{ года} \approx 4 \text{ месяца}. \quad (5.17)$$

Применение двухступенчатого циклона снижает годовые потери комбикорма в 4,2 раза и экономит до 381 тыс. руб. за 10 лет службы, обеспечивая срок окупаемости менее 4 месяцев. Это делает его внедрение экономически целесообразным.

Расчёт массы потерь на 1 тонну.

БЦР-450 потери 3,91 г/кг, тогда потери на 1 тонну 3,91 кг. Для двухступенчатого циклона потери 0,9375 г/кг, на 1 тонну 0,9375 кг. Таким образом, разница в потерях на одну тонну составляет 2,9725 кг или это примерно 76% улучшения, по сравнению с БЦР-450. Тогда экономия в рублях

на 1 тонну комбикорма составляет:

$$2,9725 \text{ кг} \cdot 25 \text{ руб/кг} = 74,31 \text{ руб.}$$

Двухступенчатый циклон экономит около 74,31 руб. на каждую тонну переработанного комбикорма за счёт снижения потерь продукта.

5.6 Обоснование экологической и производственной безопасности применения двухступенчатого циклона

Применение предлагаемой конструкции двухступенчатого циклона в линии комбикормового производства, обеспечивает не только снижение прямых эксплуатационных расходов, но и повышает уровень промышленной безопасности, снижает техногенную нагрузку на окружающую среду, и улучшает санитарно-гигиенические условия труда на производстве.

Снижение запылённости воздуха.

В ходе экспериментальных испытаний установлено, что двухступенчатый циклон обеспечивает эффективность пылеулавливания на уровне 99,88 %, тогда как базовый циклон БЦР-450 — лишь 99,57 %. Это означает, что при переработке одной партии массой 640 кг, масса не улавливаемых частиц составляет:

Для БЦР-450:

$$q_{бцр} = \frac{2700 - 200}{640} = 3,91 \text{ г/кг}; \quad (5.18)$$

Для двухступенчатого циклона:

$$q_{двух} = \frac{800 - 200}{640} = 0,9375 \text{ г/кг}. \quad (5.19)$$

Таким образом, применение двухступенчатого циклона позволяет снизить запылённость воздушной среды более чем в 4 раза, что способствует улучшению условий труда, особенно в зонах выгрузки и фильтрации. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, предельно допустимая концентрация органической пыли на рабочих местах не должна превышать 4 мг/м³. На предприятиях без эффективной системы аспирации эти нормы часто превышаются в 2–3 раза [90]. Использование двухступенчатого циклона

позволяет удерживаться в пределах нормативов без установки дополнительного фильтрующего оборудования.

Повышение пожарной и взрывобезопасности

Органическая пыль (в том числе пыль от комбикорма) классифицируется как взрывоопасная (группа G, класс II по ГОСТ 12.1.044–89). Уменьшение пылевой нагрузки напрямую снижает вероятность пылевых взрывов и пожаров в циклонных и пост-циклонических зонах. При снижении концентрации аэрозолей ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ), который для растительной пыли составляет около 40–60 г/м³, устраняется один из ключевых факторов риска [60].

Улучшение санитарных условий и сохранность продукции

Снижение пылевой нагрузки также снижает вторичное загрязнение самого комбикорма, особенно в открытых зонах разгрузки, транспортировки и складирования. Это способствует улучшению микробиологической и кормовой безопасности продукта, а также уменьшает потери при хранении.

По данным собственных расчётов, использование двухступенчатого циклона позволяет снизить годовые потери продукта с 1,97 т до 0,4725 т, что не только экономически эффективно (экономия более 37 тыс. руб./год), но и способствует уменьшению объёма пылевидных отходов, подлежащих утилизации, депонированию или рекуперации.

5.7 Выводы по главе

Применение двухступенчатого циклона в линии производства комбикормов обеспечивает уменьшение выбросов мелкодисперсного компонента продуктов дробленного зерна, тем самым, сохранив его в готовой продукции.

Сокращение потерь экономит 74,31 руб. с каждой тонны перерабатываемого зерна, с учетом средней стоимости готовых рассыпных комбикормов около 25 руб/кг. При этом потребляемая мощность дробилки

увеличивается на 0,2%, а её производительность на 1,5%, за счет снижения сопротивления фильтр-мешка, установленного на выхлопном патрубке циклона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

3. Разработана математическая модель сепарации частиц в вихревой воронке с учетом поправочного расчетного коэффициента k , отражающего влияние формы второй ступени циклона на характер действия центробежных сил и траекторию движения частиц. Согласно расчетам минимальный радиус закрутки частицы составил $R_{\text{ч. мин}}=85$ мм, а максимальный $R_{\text{ч. макс}}=150$ мм, для частицы размерностью 10 мкм.

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

5. Производственные испытания показали, что двухступенчатый циклон

обеспечил сокращение выбросов мелкодисперсного компонента дробленых частиц в 3 раза по сравнению со штатным циклоном БЦР-450. Что в массовом эквиваленте составило 3 кг с 1000 кг перерабатываемой продукции.

6. Экономический эффект от внедрения двухступенчатого циклона в линию производства комбикорма составил 75 рублей с одной тонны, только за счет сокращения потерь перерабатываемой продукции при стоимости готового комбикорма 25 000 руб./т.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Азаров В. Н., Колесников А. Г. Оценка взрывопожароопасности предприятий по хранению и переработке зерна // Пожаровзрывобезопасность. 2003. № 1. С. 34–39.
3. Айзикович Л. Е., Бобров А. Р. Мукомольно-элеваторная промышленность за рубежом. ЦИНТИ. М., 1964.
4. Алексеев К. А., Мухаметзянова А. Г. Моделирование работы газового циклона в среде ANSYS Fluent // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 6. С. 36–39.
5. Алиев Т. Т., Беляев С. Н., Галахарь А. С. Моделирование в среде ANSYS течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628 на участке очистки газа // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 10(655). С. 25–30.
6. Афанасьев В. А. Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных. Воронеж, 2007. 183 с.
7. Бабайлова Г. П., Дурсенев М. С., Овсянников Ю. С. Использование биодобавок в кормлении сельскохозяйственных животных. Киров: ООО «Издательство «Радуга-ПРЕСС», 2025. 215 с. ISBN 978-5-00202-766-8.
8. Бахчевников О. Н., Бенова Е. В., Брагинец С. В. Современные локальные малые предприятия на примере комбикормовых заводов // Вестник НГИЭИ. 2018. № 8(87). С. 58–78.
9. Белоусов А. С., Голованов В. В., Виноградов А. А. Расчет полей скоростей в вихревом пылеуловителе // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации-2018). 2018. № 3. С. 89–93.
10. Беляева Г. И. Исследование характеристик двухфазного потока в мультициклоне методами CFD с целью энергоэффективной компоновки его

элементов // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова, Казань, 13–15 сентября 2016 года. Казань: ФГБУН Казанский научный центр РАН, 2016. С. 290–292.

11. Блескин С. С., Годорожа В. А., Пшенов Е. А. Обзор способов повышения надежности молотковых дробилок // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М. А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–11 ноября 2023 г. Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2023. С. 254–257. EDN QIESFG.

12. Блескин С. С., Мармулева Н. И. Безопасность работ при переработке зерна // Теория и практика современной аграрной науки: Сборник IV национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 26 февраля 2021 г. Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2021. С. 736–739. EDN GLYTBZ.

13. Блескин С. С., Машкова Н. В., Пшенов Е. А. Особенности эксплуатации молотковых дробилок // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XII региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М. А. Анфиногенова, Новосибирск, 11 ноября 2020 г. Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, 2020. С. 137–139. EDN RFKXHG.

14. Блескин С. С., Пшенов Е. А. Особенности эксплуатации оборудования на мини комбикормовых заводах // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XIII международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры Надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 15 декабря 2021 г. Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2021. С. 286–291. EDN NMFPFR.

15. Блескин С. С., Пшенов Е. А. Применение двухступенчатого циклона на комбикормовом мини-заводе // Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования: Материалы XVI международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Инженерного института, Новосибирск, 13–15 ноября 2024 года. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2024. С. 280–283. – EDN IPJUMA.
16. Блескин С. С., Пшенов Е. А. Эксплуатация циклонных аппаратов в комбикормовом производстве // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М. А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–11 ноября 2023 г. Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2023. С. 258–261. EDN VSBPTS.
17. Богданов Г. А. Кормление сельскохозяйственных животных: учебник для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 624 с. ISBN 5-10-001141-6.
18. Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Бенова Е. В., Чернуцкий М. В. Основные положения технологического проектирования внутрихозяйственного производства комбикормов на основе модульного построения // Вестник Курганской ГСХА. 2017. № 2 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-polozheniya-tehnologicheskogo-proektirovaniya-vnutrihozyaystvennogo-proizvodstva-kombikormov-na-osnove-modulnogo> (дата обращения: 21.05.2025).
19. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и её измерение. Москва: Мир, 1974. 279 с.
20. Вечканова М. В., Вечканов А. В., Василенко О. С. [и др.] Анализ результатов расчёта воздушных потоков в циклоне ЦН-15 в программной среде SolidWorks с применением модуля Flow Simulation // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 165-летию В. Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года.

Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. С. 2085–2088.

21. Володин Н. И., Гончаров Г. М., Сугак А. В., Смирнов Д. Е. Пути повышения эффективности циклонов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eco-oos.ru/biblio/sborniki-nauchnyh-trudov/rekomendacii-i-sposoby-snijeniya-tehnogennogo-vozdeistviya-promyshlennyh-predpriyatiii-ekolo-gicheski-chistyie-i-resursosberegayuschie-tehnologii/04/>

22. Гавриленко А. В. Определение потерь давления в установке пневматического транспорта материалов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 4 (99). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-poter-davleniya-v-ustanovke-pnevmaticheskogo-transporta-materialov> (дата обращения: 14.05.2023).

23. Гавриленков А. М., Некрасов А. В., Каргапилов Д. В. Математическая модель движения частицы пыли у стенки циклона // Безопасность в техносфере. 2009. № 2. С. 35–37.

24. Гидрогазодинамика. Жуков. Учебное пособие по направлению подготовки 13.03.01 (140100.62) «Теплоэнергетика и теплотехника». Гидравлика. 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-8265-1434-4.

25. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 1972. 12 с.

26. ГОСТ 18221-2018. Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы. Общие технические условия.

27. ГОСТ 6613-86. Сетки тканые проволочные с квадратными ячейками. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1987. 15 с.

28. ГОСТ 7.32-2017. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления [Электронный ресурс]. М.: Стандартинформ, 2017.

29. ГОСТ Р 27.202–2012. Менеджмент надежности. Анализ стоимости жизненного цикла [Электронный ресурс]. М.: Стандартинформ, 2012.

30. Дзядзио А. М., Кеммер А. С. Пневматический транспорт на

зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1967. 295 с.

31. Едимичев Д. А., Чепелев Н. И. Совершенствование технологии пылеудаления на зерноперерабатывающих предприятиях // Вестник КрасГАУ. 2011. № 8. С. 168–172.

32. Еремкин А. И., Зиганшин М. Г. Степень инерционного осаждения взвешенных частиц в циклонных и вихревых сепараторах. Безразмерные параметры эффективности сепарации взвешенных частиц // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2009. № 2(14). С. 64–71.

33. Ефимов Д. С., Кротова О. Е., Порываев О. Н., Тупольских Т. И., Степанов Д. А. Применение аспирационного оборудования для предотвращения загрязнения воздушного бассейна в районе строительства элеватора // Вестник РГАТУ. 2022. № 3. С. 71–77.

34. Замалиева А. Т. Зависимость размера частиц от движения потока в циклоне методом CFD-DEM // Социально-экономические и естественно-научные парадигмы современности: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 2, Ростов-на-Дону, 30 марта 2018 г. Ростов-на-Дону: Южный университет (ИУБиП), 2018. С. 102–106.

35. Зиганшин М. Г., Зиганшин А. М., Гильфанов Р. М. Расчетные параметры осаждения взвеси в аппаратах с вращательным движением мультифазных потоков. Часть 2. Критерии эффективности циклонной сепарации // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2(14). С. 161–167.

36. Зимняков В. М., Курочкин А. А., Зимняков А. М. Состояние, проблемы и перспективы развития производства комбикормов в России // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 1(45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-problemy-i-perspektivy-razvitiya-proizvodstva-kombikormov-v-rossii> (дата обращения: 18.07.2024).

37. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.

3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

38. Калашников А. П., Клейменов Н. И., Козлов Н. И. и др. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2003. 456 с. ISBN 5-10-003513-7.

39. Каргашилов Д. В. Совершенствование процесса энергосберегающего высокоэффективного центробежного пылеулавливания в пыщевой промышленности (на примере мукомольного производства): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 0.5.18.12. Воронеж, 2013. 16 с.

40. Карпов С. В., Сабуров Э. Н. (ред.). Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. 504 с.

41. Катин В. Д., Журавлев А. А. Циклон для очистки газов: патент на полезную модель № 225506 У1. РФ, МПК B04C 5/12. № 2024102576. Заявл. 01.02.2024, опубл. 23.04.2024. – EDN VYZQHO.

42. Катин В. Д., Шевцов М. Н., Агошков А. И., Журавлев А. А. Циклон для очистки газов: патент на полезную модель № 223762 У1. РФ, МПК B04C 5/12. № 2023118132. Заявл. 07.07.2023, опубл. 04.03.2024. – EDN СОМКМТ.

43. Косолапов В. М. Кормопроизводство в экономике сельского хозяйства России: состояние, проблемы, перспективы // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2009. № 9. С. 6–10. – EDN KVSRGR.

44. Косолапов В. М., Трофимов И. А., Трофимова Л. С., Яковлева Е. П. Кормопроизводство – определяющий фактор сельского хозяйства России // Вестник 2ОрелГАУ. 2012. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kormoproizvodstvo-opredelyayushchiy-faktor-selskogo-hozyaystva-rossii> (дата обращения: 18.07.2024).

45. Кузьмин Д. Е., Трифонов В. Н., Сабиев У. К. Малогабаритные комбикормовые агрегаты // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2017. Т. 1, № 4. С. 18–21.

46. Кузепалов В., Кондрakov С. Кормопроизводство как отрасль сельского хозяйства // Молодежь, наука, творчество – 2016: Сб. студенческих науч. статей по материалам 81-й регион. науч.-практ. конф., Ставрополь, 18–28 апр. 2016 г. Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью «СЕКВОЙЯ», 2016. С. 282–284. – EDN WYCMOZ.
47. Леканов С. В., Стрикунов Н. И. Концепция применения мобильных технологий в послеуборочной обработке зерна и семян // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 9(215). С. 97–101. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-215-9-97-101.
48. Леканов С. В., Стрикунов Н. И., Чуклин Н. М., Микитюк М. Е. Мобильная техника и технологии для послеуборочной обработки зерна и семян. Самоподвижные зерноочистительные машины: Учебное пособие для специалистов АПК, научных работников, преподавателей и студентов образовательных учреждений. Барнаул: ФГБОУ ДПО «Алтайский институт повышения квалификации руководителей и специалистов АПК», 2022. 207 с.
49. Мартемьянов Д. Б., Лисин П. А. Оценка эффективности пылеулавливания сухого молока в циклоне с продольными прорезями // Омский научный вестник. 2010. № 2(90). С. 53–54.
50. Методические рекомендации по оценке экономической эффективности инновационных технологий. М.: Минэкономразвития РФ, 2008.
51. Мисюля Д. И., Кузьмин В. В., Петров О. А. Экспериментальное и численное определение гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40 // Труды БГТУ. 2016. № 3 (185). С. 154–160. – EDN WHMPEJ.
52. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: средообразующие функции кормовых растений и экосистем / Российская академия сельскохозяйственных наук, Всерос. науч.-исслед. ин-т кормов им. В. Р. Вильямса. Том. Выпуск 3 (51). М.: Угрешская типография, 2014. 112 с. ISBN 978-5-91850-095-8. – EDN QEUGRY.

53. Мосендж С. А. О действии на организм пылей комбинированных кормов, применяющихся в промышленном животноводстве // Гигиена и санитария. 1982. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-deystvii-na-organizm-pyley-kombinirovannyh-kormov-primenayuschihsya-v-promyshlennom-zhivotnovodstve> (дата обращения: 25.07.2024).
54. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: НАУКА, 1965. 340 с.
55. Нечаев В. Н. Влияние некоторых параметров на рабочий процесс дробилок зерна // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6(49). С. 67–73.
56. Пат. № 2480294 РФ, МПК B04C5/107. Устройство для пылеулавливания / А. М. Гавриленков, Д. В. Каргашилов, А. В. Некрасов; заявл. 17.08.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. 5 с.
57. Патент на полезную модель № 227378 U1 Российская Федерация, МПК B04C 5/103, B01D 45/12. Циклон с эжектором: № 2024106942; заявл. 18.03.2024; опубл. 18.07.2024 / Е. А. Пшенов, С. С. Блескин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет». – EDN EHNKAT.
58. Петунин А. Н. Методы и техника измерений параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
59. Подпоринов Б. Ф., Семиненко А. С. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 11. С. 104–107.
60. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 № 1470 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации производств, связанных с горючей пылью».
61. Постановление Правительства РФ от 22.11.1997 № 1470 «Об

оценке эффективности инвестиционных проектов, утверждённых для государственного финансирования».

62. Промзернопроект. Альбом нормалей оборудования для пневматического транспорта на мельницах. М., 1961; Указания по проектированию внутрицехового пневматического транспорта на мельницах. М., 1962.

63. Пшенов Е. А., Блескин С. С. Компьютерное моделирование процесса отделения мелкодисперсных частиц в циклонных аппаратах // Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств: сб. тез. докл. Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. интернет-конф. преподавателей, молодых ученых и студентов, посвящ. 60-летию каф. оборудования пищевых производств, Донецк, 26–27 окт. 2023 г. Донецк: Донецкий нац. ун-т экономики и торговли им. М. Туган-Барановского, 2023. С. 65–66. – EDN LKGWPO.

64. Пшенов Е. А., Блескин С. С. Обоснование конструктивных параметров вихревой воронки двухступенчатого циклона с применением компьютерного моделирования // Инновации и продовольственная безопасность. 2024. № 1(43). С. 175–184. DOI: 10.31677/2311-0651-2023-43-1-175-184. – EDN NHFDHNN.

65. Пшенов Е. А., Блескин С. С. Циклон с выводящим каналом: патент на полезную модель № 217720 У1. РФ, МПК B04C 5/00, B01D 45/12. № 2022129886. Заявл. 17.11.2022, опубл. 13.04.2023. – EDN RRAZVU.

66. Пшенов Е. А., Блескин С. С. Циклон с конической вставкой: патент на полезную модель № 220965 У1. РФ, МПК B04C 5/04, B04C 5/103, B01D 45/12. № 2023110587. Заявл. 25.04.2023, опубл. 11.10.2023. – EDN AIOJEX.

67. Пшенов Е. А., Блескин С. С., Лычагин П. А. Теоретические предпосылки расчета пневмотранспорта мини-комбикормового завода // Современное состояние механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции: Сб. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26

мая 2023 г. Новосибирск: Изд-ц НГАУ "Золотой колос", 2023. С. 87–91. – EDN BIMSVH.

68. Пшенов Е. А., Мезенов А. А., Вертей М. Л. [и др.]. Циклон: патент на полезную модель № 208117 У1. РФ, МПК B04C 9/00, B01D 45/12. № 2021106836. Заявл. 15.03.2021, опубл. 03.12.2021. – EDN EZWRGT.

69. Рудыка Е. А., Батурина Е. В., Семенихин О. А., Калачев А. А. Исследование процесса улавливания пыли на зерноперерабатывающих предприятиях // Вестник ВГТУ. 2009. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-ulavlivaniya-pyli-na-zernopererabatyvayuschih-predpriyatiyah> (дата обращения: 30.07.2024).

70. Рукавишников В. А., Шуктомова А. Г., Маясова А. О. Моделирование эрозионного износа цилиндрических стенок циклонного сепаратора // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 202. С. 382–389. DOI 10.21515/1990-4665-202-036. – EDN GCULIP.

71. Сабиев У. К., Пушкарев А. С. Сравнительный анализ устройств для измельчения зерновых материалов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 1. С. 221–226.

72. Сабиев У. К., Черных Е. Р., Подолянчик П. И., Студеникин А. В. Эффективность производства комбикормов в малогабаритных агрегатах // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Сборник II Международной научно-практической конференции, посвященная 25-летию ФГБОУ ВО Омский ГАУ в статусе университета, Омск, 19 апреля 2019 г. Омск: Омский ГАУ, 2019. С. 85–90.

73. Санжаровская М. И. Способ увлажнения воздуха тонкораспыленной водой в свинарнике-откормочнике (ФРГ) // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2008. № 2. С. 576. EDN JKJLF.

74. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.:

Гостехиздат, 1954.

75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. ГОСТ 12.3.018–79.
76. Ситников Н. П. Основные аспекты стратегии кормопроизводства // Производственный менеджмент: теория, методология, практика. 2015. № 2. С. 200–204. – EDN TSKOFD.
77. Смирнов Д. Е. [и др.]. Математическая модель процесса сепарации твердых частиц в пылеуловителе-классификаторе // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2008. Т. 51, № 4. С. 75–76.
78. Соломин В. Ю., Белькова С. В., Соломин В. Ю. Подбор пылеочистительного оборудования типа циклон для металлообрабатывающих производств при помощи метода анализа иерархий // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 46–52.
79. Старк С. Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 400 с.
80. Стрикунов Н. И., Леканов С. В. Обоснование основных параметров пневмо-центробежно-вихревого сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 7(189). С. 115–121.
81. Стрикунов Н. И., Леканов С. В., Черкашин С. А. Обоснование основных параметров пластинчатого барабана центробежно-решетного сепаратора // Вестник ВСГУТУ. 2017. № 2(65). С. 47–51.
82. Стрикунов Н. И., Леканов С. В., Щербаков С. С., Микитюк М. Е. Параметры разгрузочных устройств центробежно-воздушного сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 7(213). С. 97–102. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-213-7-97-102. EDN DLXEBZ.
83. Студеникин А. В., Сабиев У. К. Анализ способов и средств смещивания сыпучих материалов // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: Сборник материалов Международной научно-

практической конференции обучающихся, посвященной 90-летию со дня рождения Е. П. Огрызкова, Омск, 15 января 2019 г. Омск: Омский ГАУ, 2019. С. 324–329.

84. Технологии и оборудование для производства комбикормов и премиксов: учеб. пособие / В. И. Пахомов, Д. В. Рудой, С. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников, А. В. Ольшевская. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 228 с.

85. Технология производства комбикормов [Электронный ресурс]. MPPNIK.ru. URL: <https://mppnik.ru/publ/472-tehnologiya-proizvodstva-kombikormov.html> (дата обращения: 21.05.2025).

86. Толкачев Р. О., Головченко А. Е. Исследование области абразивного износа пневмоциклиона на основе имитационного моделирования в среде ANSYS Fluent // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 2(386). С. 42–49. – EDN DKJJCМ.

87. Топталов В. С., Чесноков Ю. Г., Мешалкин В. П. [и др.] Оценка эффективности разделения пылегазовых потоков в прямоточных циклонах // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57, № 4. С. 363–370.

88. Улучшение охраны труда работников комбикормовых предприятий агропромышленного комплекса путем снижения пылевого загрязнения производственной среды: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Орел; Белгород, 2006. 170 с.

89. Чалов В. А., Кущев Л. А. Повышение эффективности использования аппаратов сухого инерционного пылеулавливания // Механики XXI Веку. 2011. № 10. С. 27–30.

90. Чеботарёв О. Н., Шаззо А. Ю., Мартыненко Я. Ф. Технология муки, крупы и комбикормов. М.: КолосС, 2004. 543 с.

91. Чернышова Е. В., Шевляков В. В., Эрм Г. И. Основные этапы гигиенического нормирования органической пыли // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы ХХI века: Материалы 19-й международной научной конференции, Минск, 23–24 мая 2019 г. Том. Часть 2. Минск:

Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь, 2019. С. 43–46. EDN ENALRC.

92. Шамова Е. В. Пути повышения энергоэффективности циклонов // Научный Лидер. 2024. С. 99.

93. Шевандина В. М., Лоскутова В. И., Петров Н. В., Воронина Н. Н. Технология производства премиксов. М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта СССР, 1986. 21 с.

94. Шевелев Ф. А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. М.: ВОДГЕО, 1953. 208 с.

95. Щукин А. В., Лунев Н. А. Совершенствование конструкции инерционных пылеуловителей методами компьютерного моделирования двухфазного течения газа // Энергетика Татарстана. 2015. № 2(38). С. 42–46.

96. Янченко А. А. Кормление сельскохозяйственных животных: учеб. пособие. Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т, 2009. 120 с.

97. Яцунов А. Н., Сабиев У. К., Черняков А. В. Экспериментальные исследования процесса смешивания сыпучих кормов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 4(24). С. 193–198.

98. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995. 574 p. ISBN 978-0-07-001685-9. Режим доступа: <https://www.airloads.net/Downloads/Textbooks/Computational-Fluid-Dynamics-the-Basics-With-Applications-Anderson-J-D.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).

99. Barth W. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations // Brennstoff-Wärme-Kraft. 1956.

100. CADMaster. Анализ внешнего потока в SOLIDWORKS Flow Simulation [Электронный ресурс] // CADMaster. 2016. № 96. Режим доступа: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_96_10.html (дата обращения: 01.06.2025).

101. Casal J., Martinez-Benet J. M. A better way to calculate cyclone pressure drop // Chemical Engineering. 1983.
102. Chen Z., You C., Wang H., Liu Q. Experimental study on the synergetic removal of fine particles by wet flue gas desulfurization tower with a flow pattern control device // Powder Technology. 2019. Vol. 343. P. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.017>
103. Crowe C. T., Schwarzkopf J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. 2 nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 509 p. ISBN 978-1-4398-4050-4. Режим доступа: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b11103/multiphase-flows-droplets-particles-clayton-crowe-john-schwarzkopf-martin-sommerfeld-yutaka-tsuji> (дата обращения: 01.06.2025).
104. Crowe C. T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. CRC Press, 1997.
105. CSoft. Простой расчет Flow Simulation [Электронный ресурс] // CSoft. 2021. Режим доступа: https://sw.csoft.ru/education/article_20211210_1.html (дата обращения: 01.06.2025).
106. Eymard R., Gallouët T., Herbin R. The finite volume method. Handbook of Numerical Analysis. Vol. VII, 2000.
107. Ferziger J. H., Perić M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd ed. Springer, 2002. ISBN 978-3-642-56026-2.
108. Fluid mechanics and particle transport in cyclone separators // Journal of Aerosol Science. 1996. Vol. 27, Issue 5. P. 777–794.
109. Henderson C. B. Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows // AIAA Journal. 1976. Vol. 14, No. 6. P. 707–708. DOI: 10.2514/3.5983.
110. ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life cycle costing. International Organization for Standardization, 2017.

111. Leith D. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions // AIChE Journal. 1984.
112. Leith D., Licht M. Cyclone particle separator performance // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1972. Vol. 11, Issue 4. P. 446–452.
113. Liang Y., Wang Y., Zhang Y., Wang W. CFD-DEM simulation of cyclone self-rotation drying // Energy. 2024. Vol. 289. Article 126548. DOI: 10.1016/j.energy.2024.126548. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544224000483> (дата обращения: 01.06.2025).
114. Roache P. J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers, 1998. ISBN 978-0913478080.
115. SolidWorks Corporation. Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. SolidWorks White Paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_basis_of_cad_embedded_cfd_whitewpaper.pdf (дата обращения: 21.05.2025).
116. SolidWorks Flow Simulation Technical Reference. Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2020. Режим доступа: <https://www.solidworks.com>
117. SolidWorks. Flow Simulation Overview [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation> (дата обращения: 21.05.2025).
118. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Pearson Education, 2007. ISBN 978-0131274983.
119. Wang W., Zhang Y., Chen X., Zhang L. CFD modeling of gas–solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures // Processes. 2020. Vol. 8, No. 2. Article 228. DOI: 10.3390/pr8020228. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/228> (дата обращения: 01.06.2025).
120. Wasilewski M., Duda J. CFD investigations of cyclone separators with different cone heights and shapes // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 10. Article

4904. DOI: 10.3390/app12104904. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/4904> (дата обращения: 01.06.2025).

121. Zatserkliannyi M., Gogunskii V., Semenyuk Yu. [et al.] Studying the emissions from enterprises in the breadmaking industry in order to use them as additives to animal feed products // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4, No. 10(94). P. 29–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.141013.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

1) Диаметр вихревой воронки

| 1 | | <i>Геометрический размер диаметра вихревой воронки, мм</i> | | | | | |
|----|---|--|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 | 125 |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | |
| 4 | 10 | 406 | 389 | 381 | 366 | 375 | 398 |
| 5 | 30 | 403 | 383 | 374 | 365 | 378 | 384 |
| 6 | 50 | 372 | 378 | 370 | 331 | 354 | 380 |
| 7 | 70 | 368 | 361 | 354 | 333 | 341 | 361 |
| 8 | 90 | 349 | 357 | 334 | 314 | 309 | 345 |
| 9 | 110 | 323 | 336 | 294 | 291 | 302 | 322 |
| 10 | 130 | 309 | 316 | 277 | 268 | 291 | 294 |
| 11 | 150 | 287 | 266 | 235 | 250 | 249 | 267 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η_i</i> | | | | | | |
| 13 | 10 | 59,4 | 61,1 | 61,9 | 63,4 | 62,5 | 60,2 |
| 14 | 30 | 59,7 | 61,7 | 62,6 | 63,5 | 62,2 | 61,6 |
| 15 | 50 | 62,8 | 62,2 | 63 | 66,9 | 64,6 | 62 |
| 16 | 70 | 63,2 | 63,9 | 64,6 | 66,7 | 65,9 | 63,9 |
| 17 | 90 | 65,1 | 64,3 | 66,6 | 68,6 | 69,1 | 65,5 |
| 18 | 110 | 67,7 | 66,4 | 70,6 | 70,9 | 69,8 | 67,8 |
| 19 | 130 | 69,1 | 68,4 | 72,3 | 73,2 | 70,9 | 70,6 |
| 20 | 150 | 71,3 | 73,4 | 76,5 | 75 | 75,1 | 73,3 |
| 21 | <i>Критерий эффективности, η</i> | <u>64,787</u> <u>5</u> | <u>65,17</u> <u>5</u> | <u>67,262</u> <u>5</u> | <u>68,52</u> <u>5</u> | <u>67,512</u> <u>5</u> | <u>65,612</u> <u>5</u> |
| 22 | <i>Гидравлическое сопротивление, ε</i> | <u>17,84</u> | <u>16,65</u> | <u>13,82</u> | <u>13,92</u> | <u>12,7</u> | <u>11,03</u> |

Продолжение таблицы

| 1 | <i>Геометрический размер диаметра вихревой воронки, мм</i> | | | | | | | | | |
|----|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | 175 |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | 369 | 400 | 404 | 434 | 435 | 447 | 440 | 449 | 429 | 433 |
| 5 | 363 | 393 | 392 | 418 | 424 | 427 | 430 | 434 | 427 | 416 |
| 6 | 351 | 371 | 366 | 397 | 402 | 413 | 410 | 403 | 409 | 399 |
| 7 | 344 | 364 | 354 | 385 | 387 | 404 | 393 | 399 | 390 | 381 |
| 8 | 324 | 342 | 335 | 359 | 356 | 394 | 379 | 392 | 382 | 381 |
| 9 | 304 | 328 | 327 | 337 | 338 | 360 | 357 | 361 | 354 | 354 |
| 10 | 284 | 315 | 304 | 320 | 316 | 329 | 318 | 325 | 322 | 319 |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11 | 255 | 270 | 261 | 284 | 283 | 287 | 285 | 296 | 277 | 279 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | | |
| 13 | 63,1 | 60 | 59,6 | 56,6 | 56,5 | 55,3 | 56 | 55,1 | 57,1 | 56,7 |
| 14 | 63,7 | 60,7 | 60,8 | 58,2 | 57,6 | 57,3 | 57 | 56,6 | 57,3 | 58,4 |
| 15 | 64,9 | 62,9 | 63,4 | 60,3 | 59,8 | 58,7 | 59 | 59,7 | 59,1 | 60,1 |
| 16 | 65,6 | 63,6 | 64,6 | 61,5 | 61,3 | 59,6 | 60,7 | 60,1 | 61 | 61,9 |
| 17 | 67,6 | 65,8 | 66,5 | 64,1 | 64,4 | 60,6 | 62,1 | 60,8 | 61,8 | 61,9 |
| 18 | 69,6 | 67,2 | 67,3 | 66,3 | 66,2 | 64 | 64,3 | 63,9 | 64,6 | 64,6 |
| 19 | 71,6 | 68,5 | 69,6 | 68 | 68,4 | 67,1 | 68,2 | 67,5 | 67,8 | 68,1 |
| 20 | 74,5 | 73 | 73,9 | 71,6 | 71,7 | 71,3 | 71,5 | 70,4 | 72,3 | 72,1 |
| 21 | <u>67,5</u> <u>75</u> | <u>65,21</u> <u>25</u> | <u>65,71</u> <u>25</u> | <u>63,3</u> <u>25</u> | <u>63,23</u> <u>75</u> | <u>61,73</u> <u>75</u> | <u>62,3</u> <u>5</u> | <u>61,76</u> <u>25</u> | <u>62,6</u> <u>25</u> | <u>62,9</u> <u>75</u> |
| 22 | <u>11,2</u> <u>5</u> | <u>10,79</u> | <u>10,32</u> | <u>9,42</u> | <u>9,2</u> | <u>9,44</u> | <u>8,7</u> | <u>8,42</u> | <u>8,71</u> | <u>8,41</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | | | |
|----|---|-----------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | Геометрический размер диаметра вихревой воронки, мм | | | | | | | | | |
| 2 | 180 | 185 | 190 | 195 | 200 | 205 | 210 | 215 | 220 | 225 |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | 410 | 410 | 427 | 450 | 475 | 522 | 546 | 554 | 550 | 549 |
| 5 | 412 | 415 | 431 | 443 | 469 | 514 | 544 | 544 | 540 | 537 |
| 6 | 397 | 400 | 414 | 421 | 466 | 507 | 523 | 524 | 522 | 526 |
| 7 | 377 | 376 | 387 | 394 | 427 | 483 | 508 | 504 | 502 | 508 |
| 8 | 368 | 370 | 376 | 380 | 415 | 457 | 474 | 470 | 468 | 467 |
| 9 | 329 | 328 | 330 | 360 | 381 | 423 | 438 | 431 | 431 | 435 |
| 10 | 300 | 300 | 303 | 319 | 335 | 384 | 397 | 400 | 404 | 404 |
| 11 | 274 | 281 | 279 | 307 | 301 | 341 | 352 | 353 | 341 | 346 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | | |
| 13 | 59 | 59 | 57,3 | 55 | 52,5 | 47,8 | 45,4 | 44,6 | 45 | 45,1 |
| 14 | 58,8 | 58, 5 | 56,9 | 55,7 | 53,1 | 48,6 | 45,6 | 45,6 | 46 | 46,3 |
| 15 | 60,3 | 60 | 58,6 | 57,9 | 53,4 | 49,3 | 47,7 | 47,6 | 47,8 | 47,4 |
| 16 | 62,3 | 62, | 61,3 | 60,6 | 57,3 | 51,7 | 49,2 | 49,6 | 49,8 | 49,2 |
| 17 | 63,2 | 63 | 62,4 | 62 | 58,5 | 54,3 | 52,6 | 53 | 53,2 | 53,3 |
| 18 | 67,1 | 67, 2 | 67 | 64 | 61,9 | 57,7 | 56,2 | 56,9 | 56,9 | 56,5 |
| 19 | 70 | 70 | 69,7 | 68,1 | 66,5 | 61,6 | 60,3 | 60 | 59,6 | 59,6 |
| 20 | 72,6 | 71, 9 | 72,1 | 69,3 | 69,9 | 65,9 | 64,8 | 64,7 | 65,9 | 65,4 |
| 21 | <u>64,162</u> <u>5</u> | <u>64</u> | <u>63,162</u> <u>5</u> | <u>61,57</u> <u>5</u> | <u>59,137</u> <u>5</u> | <u>54,612</u> <u>5</u> | <u>52,72</u> <u>5</u> | <u>52,7</u> <u>5</u> | <u>53,02</u> <u>5</u> | <u>52,8</u> <u>5</u> |

| | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 22 | <u>8,37</u> | <u>8,0</u> 4 | <u>7,67</u> | <u>7,56</u> | <u>7,44</u> | <u>7,4</u> | <u>7,28</u> | <u>7,26</u> | <u>7,23</u> | <u>7,27</u> |
|----|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | | |
|----|--|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| 1 | <i>Геометрический размер диаметра вихревой воронки, мм</i> | | | | | | | | |
| 2 | 230 | 235 | 240 | 245 | 250 | 255 | 260 | 265 | 270 |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | 555 | 557 | 556 | 568 | 561 | 556 | 559 | 560 | 573 |
| 5 | 538 | 548 | 543 | 555 | 540 | 539 | 540 | 547 | 558 |
| 6 | 523 | 520 | 526 | 542 | 521 | 514 | 525 | 530 | 531 |
| 7 | 498 | 505 | 503 | 511 | 496 | 504 | 502 | 498 | 515 |
| 8 | 466 | 463 | 465 | 476 | 456 | 458 | 463 | 456 | 473 |
| 9 | 433 | 428 | 415 | 433 | 419 | 424 | 418 | 421 | 430 |
| 10 | 407 | 391 | 377 | 190 | 378 | 377 | 381 | 363 | 376 |
| 11 | 343 | 334 | 324 | 340 | 320 | 326 | 328 | 316 | 330 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, %</i> | | | | | | | | |
| 13 | 44,5 | 44,3 | 44,4 | 43,2 | 43,9 | 44,4 | 44,1 | 44 | 42,7 |
| 14 | 46,2 | 45,2 | 45,7 | 44,5 | 46 | 46,1 | 46 | 45,3 | 44,2 |
| 15 | 47,7 | 48 | 47,4 | 45,8 | 47,9 | 48,6 | 47,5 | 47 | 46,9 |
| 16 | 50,2 | 49,5 | 49,7 | 48,9 | 50,4 | 49,6 | 49,8 | 50,2 | 48,5 |
| 17 | 53,4 | 53,7 | 53,5 | 52,4 | 54,4 | 54,2 | 53,7 | 54,4 | 52,7 |
| 18 | 56,7 | 57,2 | 58,5 | 56,7 | 58,1 | 57,6 | 58,2 | 57,9 | 57 |
| 19 | 59,3 | 60,9 | 62,3 | 81 | 62,2 | 62,3 | 61,9 | 63,7 | 62,4 |
| 20 | 65,7 | 66,6 | 67,6 | 66 | 68 | 67,4 | 67,2 | 68,4 | 67 |
| 21 | <u>52,962</u> | <u>53,17</u> | <u>53,637</u> | <u>54,812</u> | <u>53,862</u> | <u>53,77</u> | <u>53,5</u> | <u>53,862</u> | <u>52,67</u> |
| | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> |
| 22 | <u>7,34</u> | <u>7,09</u> | <u>7,36</u> | <u>7,04</u> | <u>7,01</u> | <u>7,35</u> | <u>7,3</u> | <u>6,76</u> | <u>7,2</u> |

2) Высота вихревой воронки

| | | | | | | | |
|----|---------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | <i>Геометрический размер высоты вихревой воронки, мм</i> | | | | | |
| 2 | | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 | 125 |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | |
| 4 | 10 | 504 | 468 | 470 | 474 | 472 | 463 |
| 5 | 30 | 508 | 458 | 479 | 482 | 460 | 466 |
| 6 | 50 | 503 | 465 | 463 | 466 | 445 | 463 |
| 7 | 70 | 494 | 448 | 430 | 426 | 440 | 447 |
| 8 | 90 | 447 | 120 | 417 | 420 | 412 | 421 |
| 9 | 110 | 429 | 403 | 397 | 408 | 382 | 390 |
| 10 | 130 | 381 | 373 | 365 | 369 | 336 | 343 |
| 11 | 150 | 346 | 332 | 315 | 317 | 288 | 315 |
| 12 | | <i>Эффективность по каждой фракции, η_i</i> | | | | | |

| | | | | | | | |
|----|---|--------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
| 13 | 10 | 49,6 | 53,2 | 53 | 52,6 | 52,8 | 53,7 |
| 14 | 30 | 49,2 | 54,2 | 52,1 | 51,8 | 54 | 53,4 |
| 15 | 50 | 49,7 | 53,5 | 53,7 | 53,4 | 55,5 | 53,7 |
| 16 | 70 | 50,6 | 55,2 | 57 | 57,4 | 56 | 55,3 |
| 17 | 90 | 55,3 | 88 | 58,3 | 58 | 58,8 | 57,9 |
| 18 | 110 | 57,1 | 59,7 | 60,3 | 59,2 | 61,8 | 61 |
| 19 | 130 | 61,9 | 62,7 | 63,5 | 63,1 | 66,4 | 65,7 |
| 20 | 150 | 65,4 | 66,8 | 68,5 | 68,3 | 71,2 | 68,5 |
| 21 | <i>Критерий эффективности, η</i> | <u>54,85</u> <u>5</u> | <u>61,662</u> | <u>58,3</u> <u>5</u> | <u>57,97</u> <u>5</u> | <u>59,562</u> <u>5</u> | <u>58,65</u> |
| 22 | <i>Гидравлическое сопротивление, ε</i> | <u>7,49</u> | <u>7,61</u> | <u>7,91</u> | <u>7,99</u> | <u>7,67</u> | <u>8,06</u> |

Продолжение таблицы

| 1 | <i>Геометрический размер высоты вихревой воронки, мм</i> | | | | | | | |
|----|---|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | 452 | 467 | 459 | 423 | 413 | 421 | 411 | 424 |
| 5 | 451 | 452 | 453 | 407 | 417 | 421 | 411 | 412 |
| 6 | 437 | 449 | 443 | 391 | 401 | 419 | 404 | 408 |
| 7 | 430 | 429 | 413 | 385 | 371 | 374 | 388 | 375 |
| 8 | 403 | 404 | 414 | 377 | 359 | 365 | 379 | 380 |
| 9 | 369 | 376 | 373 | 353 | 333 | 335 | 348 | 340 |
| 10 | 330 | 342 | 337 | 309 | 307 | 302 | 300 | 308 |
| 11 | 285 | 286 | 303 | 277 | 273 | 296 | 281 | 277 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η_f</i> | | | | | | | |
| 13 | 54,8 | 53,3 | 54,1 | 57,7 | 58,7 | 57,9 | 58,9 | 57,6 |
| 14 | 54,9 | 54,8 | 54,7 | 59,3 | 58,3 | 57,9 | 58,9 | 58,8 |
| 15 | 56,3 | 55,1 | 55,7 | 60,9 | 59,9 | 58,1 | 59,6 | 59,2 |
| 16 | 57 | 57,1 | 58,7 | 61,5 | 62,9 | 62,6 | 61,2 | 62,5 |
| 17 | 59,7 | 59,6 | 58,6 | 62,3 | 64,1 | 63,5 | 62,1 | 62 |
| 18 | 63,1 | 62,4 | 62,7 | 64,7 | 66,7 | 66,5 | 65,2 | 66 |
| 19 | 67 | 65,8 | 66,3 | 69,1 | 69,3 | 69,8 | 70 | 69,2 |
| 20 | 71,5 | 71,4 | 69,7 | 72,3 | 72,7 | 70,4 | 71,9 | 72,1 |
| 21 | <u>60,537</u> <u>5</u> | <u>59,937</u> <u>5</u> | <u>60,062</u> <u>5</u> | <u>63,47</u> <u>5</u> | <u>64,07</u> <u>5</u> | <u>63,337</u> <u>5</u> | <u>63,47</u> <u>5</u> | <u>63,42</u> <u>5</u> |
| 22 | <u>8,2</u> | <u>8,02</u> | <u>7,8</u> | <u>8,38</u> | <u>8,31</u> | <u>8,13</u> | <u>8,09</u> | <u>8,47</u> |

Продолжение таблицы

| 1 | <i>Геометрический размер высоты вихревой воронки, мм</i> | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 175 | 180 | 185 | 190 | 195 | 200 | 205 | 210 |

| | | | | | | | | | |
|----|---|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | 443 | 440 | 443 | 443 | 459 | 478 | 498 | 517 | 474 |
| 5 | 429 | 425 | 429 | 444 | 466 | 473 | 490 | 510 | 482 |
| 6 | 425 | 423 | 420 | 420 | 432 | 467 | 475 | 503 | 462 |
| 7 | 419 | 408 | 393 | 419 | 430 | 441 | 447 | 468 | 438 |
| 8 | 384 | 381 | 380 | 383 | 389 | 411 | 414 | 434 | 398 |
| 9 | 355 | 350 | 346 | 347 | 365 | 371 | 387 | 396 | 381 |
| 10 | 317 | 307 | 298 | 306 | 319 | 336 | 333 | 354 | 336 |
| 11 | 285 | 274 | 266 | 277 | 295 | 292 | 298 | 297 | 303 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | |
| 13 | 55,7 | 56 | 55,7 | 55,7 | 54,1 | 52,2 | 50,2 | 48,3 | 52,6 |
| 14 | 57,1 | 57,5 | 57,1 | 55,6 | 53,4 | 52,7 | 51 | 49 | 51,8 |
| 15 | 57,5 | 57,7 | 58 | 58 | 56,8 | 53,3 | 52,5 | 49,7 | 53,8 |
| 16 | 58,1 | 59,2 | 60,7 | 58,1 | 57 | 55,9 | 55,3 | 53,2 | 56,2 |
| 17 | 61,6 | 61,9 | 62 | 61,7 | 61,1 | 58,9 | 58,6 | 56,6 | 60,2 |
| 18 | 64,5 | 65 | 65,4 | 65,3 | 63,5 | 62,9 | 61,3 | 60,4 | 61,9 |
| 19 | 68,3 | 69,3 | 70,2 | 69,4 | 68,1 | 66,4 | 66,7 | 64,6 | 66,4 |
| 20 | 71,5 | 72,6 | 73,4 | 72,3 | 70,5 | 70,8 | 70,2 | 70,3 | 69,7 |
| 21 | <u>61,787</u> | <u>62,4</u> | <u>62,812</u> | <u>62,012</u> | <u>60,562</u> | <u>59,137</u> | <u>58,22</u> | <u>56,512</u> | <u>59,07</u> |
| | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> |
| 22 | <u>7,65</u> | <u>7,63</u> | <u>7,66</u> | <u>7,64</u> | <u>7,02</u> | <u>7,17</u> | <u>7,17</u> | <u>7,86</u> | <u>7,5</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | | |
|----|---|--|------|--|------|--|------|--|--|
| 1 | Геометрический размер высоты вихревой воронки, мм | | | | | | | | |
| 2 | 220 | | 225 | | 230 | | 235 | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | 480 | | 459 | | 479 | | 493 | | |
| 5 | 481 | | 442 | | 478 | | 481 | | |
| 6 | 459 | | 439 | | 461 | | 481 | | |
| 7 | 419 | | 430 | | 454 | | 470 | | |
| 8 | 389 | | 409 | | 450 | | 433 | | |
| 9 | 363 | | 376 | | 416 | | 419 | | |
| 10 | 326 | | 356 | | 379 | | 423 | | |
| 11 | 310 | | 330 | | 353 | | 380 | | |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | |
| 13 | 52 | | 54,1 | | 52,1 | | 50,7 | | |
| 14 | 51,9 | | 55,8 | | 52,2 | | 51,9 | | |
| 15 | 54,1 | | 56,1 | | 53,9 | | 51,9 | | |
| 16 | 58,1 | | 57 | | 54,6 | | 53 | | |
| 17 | 61,1 | | 59,1 | | 55 | | 56,7 | | |
| 18 | 63,7 | | 62,4 | | 58,4 | | 58,1 | | |
| 19 | 67,4 | | 64,4 | | 62,1 | | 57,7 | | |

| | | | | |
|----|----------------|----------------|---------------|--------------|
| 20 | 69 | 67 | 64,7 | 62 |
| 21 | <u>59,6625</u> | <u>59,4875</u> | <u>56,625</u> | <u>55,25</u> |
| 22 | <u>7,92</u> | <u>7,51</u> | <u>7,68</u> | <u>7,69</u> |

3) Высота цилиндрической вставки

| 1 | <i>Геометрический размер высоты цилиндрической вставки, мм</i> | | | | | | |
|----|--|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|-------------|---------------|
| 2 | | 250 | 255 | 260 | 265 | 270 | 275 |
| 3 | Размер фракции, МКМ | | | | | | |
| 4 | 10 | 466 | 460 | 454 | 465 | 464 | 439 |
| 5 | 30 | 439 | 456 | 438 | 449 | 445 | 435 |
| 6 | 50 | 416 | 409 | 431 | 434 | 431 | 439 |
| 7 | 70 | 388 | 385 | 409 | 428 | 411 | 402 |
| 8 | 90 | 375 | 394 | 393 | 391 | 391 | 380 |
| 9 | 110 | 317 | 345 | 358 | 356 | 359 | 349 |
| 10 | 130 | 297 | 288 | 324 | 317 | 303 | 319 |
| 11 | 150 | 269 | 261 | 270 | 282 | 284 | 275 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η_i</i> | | | | | | |
| 13 | 10 | 53,4 | 54 | 54,6 | 53,5 | 53,6 | 56,1 |
| 14 | 30 | 56,1 | 54,4 | 56,2 | 55,1 | 55,5 | 56,5 |
| 15 | 50 | 58,4 | 59,1 | 56,9 | 56,6 | 56,9 | 56,1 |
| 16 | 70 | 61,2 | 61,5 | 59,1 | 57,2 | 58,9 | 59,8 |
| 17 | 90 | 62,5 | 60,6 | 60,7 | 60,9 | 60,9 | 62 |
| 18 | 110 | 68,3 | 65,5 | 64,2 | 64,4 | 64,1 | 65,1 |
| 19 | 130 | 70,3 | 71,2 | 67,6 | 68,3 | 69,7 | 68,1 |
| 20 | 150 | 73,1 | 73,9 | 73 | 71,8 | 71,6 | 72,5 |
| 21 | <i>Критерий эффективности, η</i> | <u>62,912</u> <u>5</u> | <u>62,525</u> | <u>61,537</u> <u>5</u> | <u>60,97</u> <u>5</u> | <u>61,4</u> | <u>62,025</u> |
| 22 | <i>Гидравлическое сопротивление, ξ</i> | <u>7,29</u> | <u>7,24</u> | <u>7,32</u> | <u>7,32</u> | <u>7,5</u> | <u>7,39</u> |

Продолжение таблицы

| 1 | <i>Геометрический размер высоты цилиндрической вставки, мм</i> | | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 280 | 285 | 290 | 295 | 300 | 305 | 310 | 315 | 320 |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | 445 | 425 | 413 | 408 | 429 | 441 | 423 | 462 | 475 |
| 5 | 437 | 420 | 417 | 393 | 431 | 423 | 418 | 453 | 467 |
| 6 | 425 | 427 | 401 | 393 | 389 | 396 | 413 | 443 | 454 |
| 7 | 400 | 381 | 371 | 388 | 375 | 378 | 411 | 429 | 431 |

| | | | | | | | | | |
|----|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| 8 | 373 | 355 | 359 | 359 | 353 | 368 | 391 | 392 | 412 |
| 9 | 350 | 340 | 333 | 328 | 347 | 373 | 364 | 393 | 374 |
| 10 | 325 | 315 | 307 | 311 | 306 | 313 | 336 | 359 | 357 |
| 11 | 289 | 279 | 273 | 288 | 276 | 283 | 296 | 310 | 327 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | |
| 13 | 55,5 | 57,5 | 58,7 | 59,2 | 57,1 | 55,9 | 57,7 | 53,8 | 52,5 |
| 14 | 56,3 | 58 | 58,3 | 60,7 | 56,9 | 57,7 | 58,2 | 54,7 | 53,3 |
| 15 | 57,5 | 57,3 | 59,9 | 60,7 | 61,1 | 60,4 | 58,7 | 55,7 | 54,6 |
| 16 | 60 | 61,9 | 62,9 | 61,2 | 62,5 | 62,2 | 58,9 | 57,1 | 56,9 |
| 17 | 62,7 | 64,5 | 64,1 | 64,1 | 64,7 | 63,2 | 60,9 | 60,8 | 58,8 |
| 18 | 65 | 66 | 66,7 | 67,2 | 65,3 | 62,7 | 63,6 | 60,7 | 62,6 |
| 19 | 67,5 | 68,5 | 69,3 | 68,9 | 69,4 | 68,7 | 66,4 | 64,1 | 64,3 |
| 20 | 71,1 | 72,1 | 72,7 | 71,2 | 72,4 | 71,7 | 70,4 | 69 | 67,3 |
| 21 | <u>61,95</u> | <u>63,22</u> | <u>64,07</u> | <u>64,15</u> | <u>63,67</u> | <u>62,812</u> | <u>61,8</u> | <u>59,487</u> | <u>58,787</u> |
| | <u>5</u> | <u>5</u> | | | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> |
| 22 | <u>7,67</u> | <u>7,59</u> | <u>8,28</u> | <u>7,91</u> | <u>8,21</u> | <u>7,78</u> | <u>8,17</u> | <u>8,1</u> | <u>8,03</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | | |
|----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | Геометрический размер высоты цилиндрической вставки, мм | | | | | | | | |
| 2 | 325 | 330 | 335 | 340 | 345 | 350 | 355 | 360 | 365 |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | 475 | 473 | 491 | 467 | 473 | 468 | 491 | 498 | 526 |
| 5 | 465 | 462 | 488 | 459 | 467 | 469 | 479 | 487 | 521 |
| 6 | 451 | 446 | 476 | 444 | 470 | 467 | 480 | 489 | 511 |
| 7 | 449 | 434 | 463 | 446 | 445 | 443 | 469 | 469 | 493 |
| 8 | 413 | 419 | 444 | 422 | 430 | 433 | 459 | 452 | 469 |
| 9 | 385 | 390 | 421 | 410 | 415 | 424 | 447 | 429 | 443 |
| 10 | 365 | 357 | 394 | 374 | 389 | 387 | 405 | 391 | 417 |
| 11 | 329 | 336 | 364 | 351 | 380 | 365 | 377 | 364 | 385 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | |
| 13 | 52,5 | 52,7 | 50,9 | 53,3 | 52,7 | 53,2 | 50,9 | 50,2 | 47,4 |
| 14 | 53,5 | 53,8 | 51,2 | 54,1 | 53,3 | 53,1 | 52,1 | 51,3 | 47,9 |
| 15 | 54,9 | 55,4 | 52,4 | 55,6 | 53 | 53,3 | 52 | 51,1 | 48,9 |
| 16 | 55,1 | 56,6 | 53,7 | 55,4 | 55,5 | 55,7 | 53,1 | 53,1 | 50,7 |

| | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 7 | 58,7 | 58,1 | 55,6 | 57,8 | 57 | 56,7 | 54,1 | 54,8 | 53,1 |
| 1 8 | 61,5 | 61 | 57,9 | 59 | 58,5 | 57,6 | 55,3 | 57,1 | 55,7 |
| 1 9 | 63,5 | 64,3 | 60,6 | 62,6 | 61,1 | 61,3 | 59,5 | 60,9 | 58,3 |
| 2 0 | 67,1 | 66,4 | 63,6 | 64,9 | 62 | 63,5 | 62,3 | 63,6 | 61,5 |
| 2 1 | <u>58,3</u> <u>5</u> | <u>58,537</u> <u>5</u> | <u>55,737</u> <u>5</u> | <u>57,837</u> <u>5</u> | <u>56,637</u> <u>5</u> | <u>56,8</u> <u>5</u> | <u>54,912</u> <u>5</u> | <u>55,262</u> <u>5</u> | <u>52,937</u> <u>5</u> |
| 2 2 | <u>7,93</u> | <u>7,72</u> | <u>7,65</u> | <u>7,59</u> | <u>7,74</u> | <u>7,77</u> | <u>7,76</u> | <u>7,78</u> | <u>7,75</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | |
|----|--|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
| 1 | <i>Геометрический размер высоты цилиндрической вставки, мм</i> | | | | | | |
| 2 | 370 | 375 | 380 | 385 | 390 | 395 | 400 |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | 507 | 521 | 528 | 514 | 508 | 476 | 512 |
| 5 | 501 | 512 | 519 | 506 | 509 | 463 | 494 |
| 6 | 497 | 512 | 510 | 489 | 501 | 465 | 491 |
| 7 | 485 | 491 | 499 | 483 | 481 | 463 | 489 |
| 8 | 464 | 485 | 494 | 469 | 477 | 459 | 482 |
| 9 | 442 | 454 | 476 | 453 | 439 | 428 | 449 |
| 10 | 410 | 427 | 437 | 407 | 415 | 394 | 407 |
| 11 | 395 | 390 | 405 | 379 | 379 | 338 | 366 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η_i</i> | | | | | | |
| 13 | 49,3 | 47,9 | 47,2 | 48,6 | 49,2 | 52,4 | 48,8 |
| 14 | 49,9 | 48,8 | 48,1 | 49,4 | 49,1 | 53,7 | 50,6 |
| 15 | 50,3 | 48,8 | 49 | 51,1 | 49,9 | 53,5 | 50,9 |
| 16 | 51,5 | 50,9 | 50,1 | 51,7 | 51,9 | 53,7 | 51,1 |
| 17 | 53,6 | 51,5 | 50,6 | 53,1 | 52,3 | 54,1 | 51,8 |
| 18 | 55,8 | 54,6 | 52,4 | 54,7 | 56,1 | 57,2 | 55,1 |
| 19 | 59 | 57,3 | 56,3 | 59,3 | 58,5 | 60,6 | 59,3 |
| 20 | 60,5 | 61 | 59,5 | 62,1 | 62,1 | 66,2 | 63,4 |
| 21 | <u>53,7375</u> | <u>52,6</u> | <u>51,65</u> | <u>53,75</u> | <u>53,6375</u> | <u>56,425</u> | <u>53,875</u> |
| 22 | <u>7,77</u> | <u>7,8</u> | <u>7,76</u> | <u>7,72</u> | <u>7,73</u> | <u>7,79</u> | <u>7,77</u> |

4) Расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса

| | | | | | | | |
|---|------------------------|---|----|----|----|----|----|
| 1 | | <i>Геометрический размер расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, мм</i> | | | | | |
| 2 | | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | |

| | | | | | | | |
|----|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 4 | 10 | 426 | 422 | 408 | 432 | 486 | 524 |
| 5 | 30 | 425 | 413 | 396 | 428 | 477 | 516 |
| 6 | 50 | 418 | 409 | 377 | 419 | 453 | 503 |
| 7 | 70 | 382 | 381 | 378 | 394 | 440 | 483 |
| 8 | 90 | 357 | 354 | 359 | 371 | 413 | 467 |
| 9 | 110 | 329 | 325 | 327 | 354 | 387 | 428 |
| 10 | 130 | 295 | 299 | 310 | 329 | 347 | 377 |
| 11 | 150 | 265 | 260 | 284 | 303 | 328 | 345 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | |
| 13 | 10 | 57,4 | 57,8 | 59,2 | 56,8 | 51,4 | 47,6 |
| 14 | 30 | 57,5 | 58,7 | 60,4 | 57,2 | 52,3 | 48,4 |
| 15 | 50 | 58,2 | 59,1 | 62,3 | 58,1 | 54,7 | 49,7 |
| 16 | 70 | 61,8 | 61,9 | 62,2 | 60,6 | 56 | 51,7 |
| 17 | 90 | 64,3 | 64,6 | 64,1 | 62,9 | 58,7 | 53,3 |
| 18 | 110 | 67,1 | 67,5 | 67,3 | 64,6 | 61,3 | 57,2 |
| 19 | 130 | 70,5 | 70,1 | 69 | 67,1 | 65,3 | 62,3 |
| 20 | 150 | 73,5 | 74 | 71,6 | 69,7 | 67,2 | 65,5 |
| 21 | <u>Критерий эффективности</u> , η | <u>63,787</u> <u>5</u> | <u>64,212</u> <u>5</u> | <u>64,512</u> <u>5</u> | <u>62,12</u> <u>5</u> | <u>58,362</u> <u>5</u> | <u>54,462</u> <u>5</u> |
| 22 | <u>Гидравлическое сопротивление, ξ</u> | <u>7,43</u> | <u>8,16</u> | <u>7,81</u> | <u>8,27</u> | <u>7,92</u> | <u>8,33</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | |
|----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | <i>Геометрический размер расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, мм</i> | | | | | | | |
| 2 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 |
| 3 | | | | | | | | 115 |
| 4 | 543 | 550 | 551 | 551 | 545 | 557 | 557 | 577 |
| 5 | 537 | 541 | 546 | 540 | 529 | 539 | 535 | 549 |
| 6 | 523 | 529 | 521 | 513 | 511 | 519 | 517 | 537 |
| 7 | 489 | 493 | 487 | 474 | 468 | 476 | 489 | 503 |
| 8 | 476 | 468 | 449 | 450 | 438 | 452 | 466 | 476 |
| 9 | 434 | 423 | 404 | 406 | 395 | 413 | 425 | 441 |
| 10 | 379 | 364 | 365 | 365 | 345 | 357 | 365 | 377 |
| 11 | 339 | 322 | 316 | 326 | 285 | 304 | 313 | 315 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | |
| 13 | 45,7 | 45 | 44,9 | 44,9 | 45,5 | 44,3 | 44,3 | 42,3 |
| 14 | 46,3 | 45,9 | 45,4 | 46 | 47,1 | 46,1 | 46,5 | 45,1 |
| 15 | 47,7 | 47,1 | 47,9 | 48,7 | 48,9 | 48,1 | 48,3 | 46,3 |
| 16 | 51,1 | 50,7 | 51,3 | 52,6 | 53,2 | 52,4 | 51,1 | 49,7 |

| | | | | | | | | | |
|----|-------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 17 | 52,4 | 53,2 | 55,1 | 55 | 56,2 | 54,8 | 53,4 | 52,4 | 52,4 |
| 18 | 56,6 | 57,7 | 59,6 | 59,4 | 60,5 | 58,7 | 57,5 | 55,9 | 54,1 |
| 19 | 62,1 | 63,6 | 63,5 | 63,5 | 65,5 | 64,3 | 63,5 | 62,3 | 59,3 |
| 20 | 66,1 | 67,8 | 68,4 | 67,4 | 71,5 | 69,6 | 68,7 | 68,5 | 65,1 |
| 21 | <u>53,5</u> | <u>53,87</u> | <u>54,512</u> | <u>54,687</u> | <u>56,05</u> | <u>54,787</u> | <u>54,162</u> | <u>52,812</u> | <u>51,275</u> |
| 22 | <u>7,46</u> | <u>7,14</u> | <u>6,94</u> | <u>6,88</u> | <u>6,9</u> | <u>7,02</u> | <u>7,07</u> | <u>7,07</u> | <u>7,19</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | |
|----|---|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 1 | <i>Геометрический размер расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса, мм</i> | | | | | |
| 2 | 120 | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 |
| 3 | | | | | | |
| 4 | 587 | 590 | 607 | 605 | 588 | 574 |
| 5 | 568 | 587 | 597 | 598 | 577 | 571 |
| 6 | 554 | 564 | 577 | 572 | 559 | 544 |
| 7 | 529 | 545 | 562 | 558 | 546 | 534 |
| 8 | 496 | 513 | 536 | 533 | 531 | 519 |
| 9 | 449 | 476 | 504 | 499 | 505 | 483 |
| 10 | 404 | 415 | 465 | 473 | 473 | 443 |
| 11 | 359 | 366 | 414 | 440 | 435 | 409 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, ηi</i> | | | | | |
| 13 | 41,3 | 41 | 39,3 | 39,5 | 41,2 | 42,6 |
| 14 | 43,2 | 41,3 | 40,3 | 40,2 | 42,3 | 42,9 |
| 15 | 44,6 | 43,6 | 42,3 | 42,8 | 44,1 | 45,6 |
| 16 | 47,1 | 45,5 | 43,8 | 44,2 | 45,4 | 46,6 |
| 17 | 50,4 | 48,7 | 46,4 | 46,7 | 46,9 | 48,1 |
| 18 | 55,1 | 52,4 | 49,6 | 50,1 | 49,5 | 51,7 |
| 19 | 59,6 | 58,5 | 53,5 | 52,7 | 52,7 | 55,7 |
| 20 | 64,1 | 63,4 | 58,6 | 56 | 56,5 | 59,1 |
| 21 | <u>50,675</u> | <u>49,3</u> | <u>46,725</u> | <u>46,525</u> | <u>47,325</u> | <u>49,0375</u> |
| 22 | <u>7,43</u> | <u>7,17</u> | <u>7,25</u> | <u>7,35</u> | <u>7,35</u> | <u>7,25</u> |

5) Высота отбойного конуса

| | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | <i>Геометрический размер высоты отбойного конуса, мм</i> | | | | | | |
| 2 | | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | |
| 4 | 10 | 548 | 543 | 517 | 526 | 499 | 515 |
| 5 | 30 | 550 | 538 | 514 | 522 | 503 | 510 |
| 6 | 50 | 521 | 511 | 496 | 512 | 484 | 493 |
| 7 | 70 | 491 | 482 | 468 | 472 | 455 | 465 |

| | | | | | | | |
|----|---|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 8 | 90 | 472 | 467 | 452 | 461 | 449 | 457 |
| 9 | 110 | 442 | 435 | 418 | 420 | 415 | 419 |
| 10 | 130 | 407 | 386 | 385 | 389 | 380 | 379 |
| 11 | 150 | 346 | 332 | 339 | 335 | 340 | 331 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η^i | | | | | | |
| 13 | 10 | 45,2 | 45,7 | 48,3 | 47,4 | 50,1 | 48,5 |
| 14 | 30 | 45 | 46,2 | 48,6 | 47,8 | 49,7 | 49 |
| 15 | 50 | 47,9 | 48,9 | 50,4 | 48,8 | 51,6 | 50,7 |
| 16 | 70 | 50,9 | 51,8 | 53,2 | 52,8 | 54,5 | 53,5 |
| 17 | 90 | 52,8 | 53,3 | 54,8 | 53,9 | 55,1 | 54,3 |
| 18 | 110 | 55,8 | 56,5 | 58,2 | 58 | 58,5 | 58,1 |
| 19 | 130 | 59,3 | 61,4 | 61,5 | 61,1 | 62 | 62,1 |
| 20 | 150 | 65,4 | 66,8 | 66,1 | 66,5 | 66 | 66,9 |
| 21 | <u>Критерий эффективности</u> <u>, η</u> | <u>52,787</u> <u>5</u> | <u>53,825</u> | <u>55,137</u> <u>5</u> | <u>54,537</u> <u>5</u> | <u>55,937</u> <u>5</u> | <u>55,387</u> <u>5</u> |
| 22 | <u>Гидравлическое сопротивление.</u> <u>ξ</u> | <u>7,36</u> | <u>7,41</u> | <u>7,36</u> | <u>7,43</u> | <u>7,37</u> | <u>7,39</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | |
|----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | Геометрический размер высоты отбойного конуса, мм | | | | | | | |
| 2 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 |
| 3 | | | | | | | | 120 |
| 4 | 502 | 543 | 535 | 547 | 530 | 492 | 467 | 464 |
| 5 | 499 | 532 | 524 | 538 | 527 | 482 | 468 | 452 |
| 6 | 486 | 519 | 509 | 520 | 514 | 478 | 460 | 448 |
| 7 | 451 | 495 | 480 | 505 | 489 | 458 | 425 | 436 |
| 8 | 435 | 475 | 468 | 480 | 479 | 442 | 405 | 401 |
| 9 | 419 | 437 | 426 | 451 | 437 | 411 | 391 | 379 |
| 10 | 366 | 399 | 387 | 409 | 408 | 374 | 371 | 358 |
| 11 | 233 | 352 | 350 | 362 | 354 | 321 | 313 | 314 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η^i | | | | | | | |
| 13 | 49,8 | 45,7 | 46,5 | 45,3 | 47 | 50,8 | 53,3 | 53,6 |
| 14 | 50,1 | 46,8 | 47,6 | 46,2 | 47,3 | 51,8 | 53,2 | 54,8 |
| 15 | 51,4 | 48,1 | 49,1 | 48 | 48,6 | 52,2 | 54 | 55,2 |
| 16 | 54,9 | 50,5 | 52 | 49,5 | 51,1 | 54,2 | 57,5 | 56,4 |
| 17 | 56,5 | 52,5 | 53,2 | 52 | 52,1 | 55,8 | 59,5 | 59,9 |
| 18 | 58,1 | 56,3 | 57,4 | 54,9 | 56,3 | 58,9 | 60,9 | 62,1 |
| 19 | 63,4 | 60,1 | 61,3 | 59,1 | 59,2 | 62,6 | 62,9 | 64,2 |
| 20 | 76,7 | 64,8 | 65 | 63,8 | 64,6 | 67,9 | 68,7 | 68,6 |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 21 | <u>57,612</u> | <u>53,1</u> | <u>54,012</u> | <u>52,35</u> | <u>53,27</u> | <u>56,77</u> | <u>58,75</u> | <u>59,35</u> | <u>62,712</u> |
| 22 | <u>7,4</u> | <u>7,46</u> | <u>7,52</u> | <u>8,06</u> | <u>8,05</u> | <u>8,18</u> | <u>8,208</u> | <u>8,26</u> | <u>8,2</u> |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 1 | <i>Геометрический размер высоты отбойного конуса, мм</i> | | | | | | | | | | |
| 2 | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 416 | 407 | 412 | 429 | 426 | 435 | 458 | 486 | 504 | 519 | |
| 5 | 396 | 393 | 400 | 419 | 402 | 421 | 444 | 465 | 509 | 495 | |
| 6 | 388 | 380 | 383 | 402 | 397 | 412 | 429 | 431 | 472 | 483 | |
| 7 | 382 | 358 | 370 | 370 | 369 | 392 | 410 | 422 | 456 | 457 | |
| 8 | 361 | 341 | 343 | 352 | 348 | 365 | 382 | 395 | 432 | 435 | |
| 9 | 339 | 324 | 326 | 325 | 331 | 344 | 345 | 355 | 386 | 396 | |
| 10 | 319 | 294 | 298 | 291 | 295 | 304 | 309 | 324 | 345 | 358 | |
| 11 | 279 | 269 | 270 | 277 | 278 | 277 | 297 | 285 | 316 | 320 | |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η_i</i> | | | | | | | | | | |
| 13 | 58,4 | 59,3 | 58,8 | 57,1 | 57,4 | 56,5 | 54,2 | 51,4 | 49,6 | 48,1 | |
| 14 | 60,4 | 60,7 | 60 | 58,1 | 59,8 | 57,9 | 55,6 | 53,5 | 49,1 | 50,5 | |
| 15 | 61,2 | 62 | 61,7 | 59,8 | 60,3 | 58,8 | 57,1 | 56,9 | 52,8 | 51,7 | |
| 16 | 61,8 | 64,2 | 63 | 63 | 63,1 | 60,8 | 59 | 57,8 | 54,4 | 54,3 | |
| 17 | 63,9 | 65,9 | 65,7 | 64,8 | 65,2 | 63,5 | 61,8 | 60,5 | 56,8 | 56,5 | |
| 18 | 66,1 | 67,6 | 67,4 | 67,5 | 66,9 | 65,6 | 65,5 | 64,5 | 61,4 | 60,4 | |
| 19 | 68,1 | 70,6 | 70,2 | 70,9 | 70,5 | 69,6 | 69,1 | 67,6 | 65,5 | 64,2 | |
| 20 | 72,1 | 73,1 | 73 | 72,3 | 72,2 | 72,3 | 70,3 | 71,5 | 68,4 | 68 | |
| 21 | <u>64</u> | <u>65,42</u> | <u>64,97</u> | <u>64,187</u> | <u>64,42</u> | <u>63,12</u> | <u>61,57</u> | <u>60,4</u> | <u>57,2</u> | <u>56,7</u> | |
| | | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>5</u> | <u>625</u> | <u>5</u> | <u>125</u> | |
| 22 | <u>7,87</u> | <u>8,35</u> | <u>8,29</u> | <u>7,73</u> | <u>7,66</u> | <u>7,43</u> | <u>7,46</u> | <u>7,44</u> | <u>6,89</u> | <u>6,70</u> | <u>4</u> |

6) Диаметр отбойного конуса

| | | | | | | | | |
|----|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 1 | <i>Геометрический размер диаметра отбойного конуса, мм</i> | | | | | | | |
| 2 | | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | | |
| 4 | 10 | 278 | 246 | 253 | 269 | 263 | 255 | |
| 5 | 30 | 282 | 241 | 252 | 247 | 261 | 250 | |
| 6 | 50 | 284 | 229 | 243 | 245 | 247 | 239 | |
| 7 | 70 | 270 | 212 | 227 | 233 | 232 | 214 | |
| 8 | 90 | 260 | 211 | 216 | 220 | 215 | 208 | |
| 9 | 110 | 244 | 199 | 206 | 203 | 208 | 190 | |
| 10 | 130 | 237 | 191 | 190 | 184 | 186 | 163 | |

| | | | | | | | |
|----|---|---------------------------|---------------|--------------|-------------|---------------|---------------|
| 11 | 150 | 206 | 157 | 153 | 151 | 162 | 147 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | |
| 13 | 10 | 72,2 | 75,4 | 74,7 | 73,1 | 73,7 | 74,5 |
| 14 | 30 | 71,8 | 75,9 | 74,8 | 75,3 | 73,9 | 75 |
| 15 | 50 | 71,6 | 77,1 | 75,7 | 75,5 | 75,3 | 76,1 |
| 16 | 70 | 73 | 78,8 | 77,3 | 76,7 | 76,8 | 78,6 |
| 17 | 90 | 74 | 78,9 | 78,4 | 78 | 78,5 | 79,2 |
| 18 | 110 | 75,6 | 80,1 | 79,4 | 79,7 | 79,2 | 81 |
| 19 | 130 | 76,3 | 80,9 | 81 | 81,6 | 81,4 | 83,7 |
| 20 | 150 | 79,4 | 84,3 | 84,7 | 84,9 | 83,8 | 85,3 |
| 21 | <u>Критерий эффективности, η</u> | <u>74,237</u> <u>5</u> | <u>78,925</u> | <u>78,25</u> | <u>78,1</u> | <u>77,825</u> | <u>79,175</u> |
| 22 | <u>Гидравлическое сопротивление, ξ</u> | <u>6,28</u> | <u>6,47</u> | <u>6,1</u> | <u>5,75</u> | <u>5,66</u> | <u>5,64</u> |

Продолжение таблицы

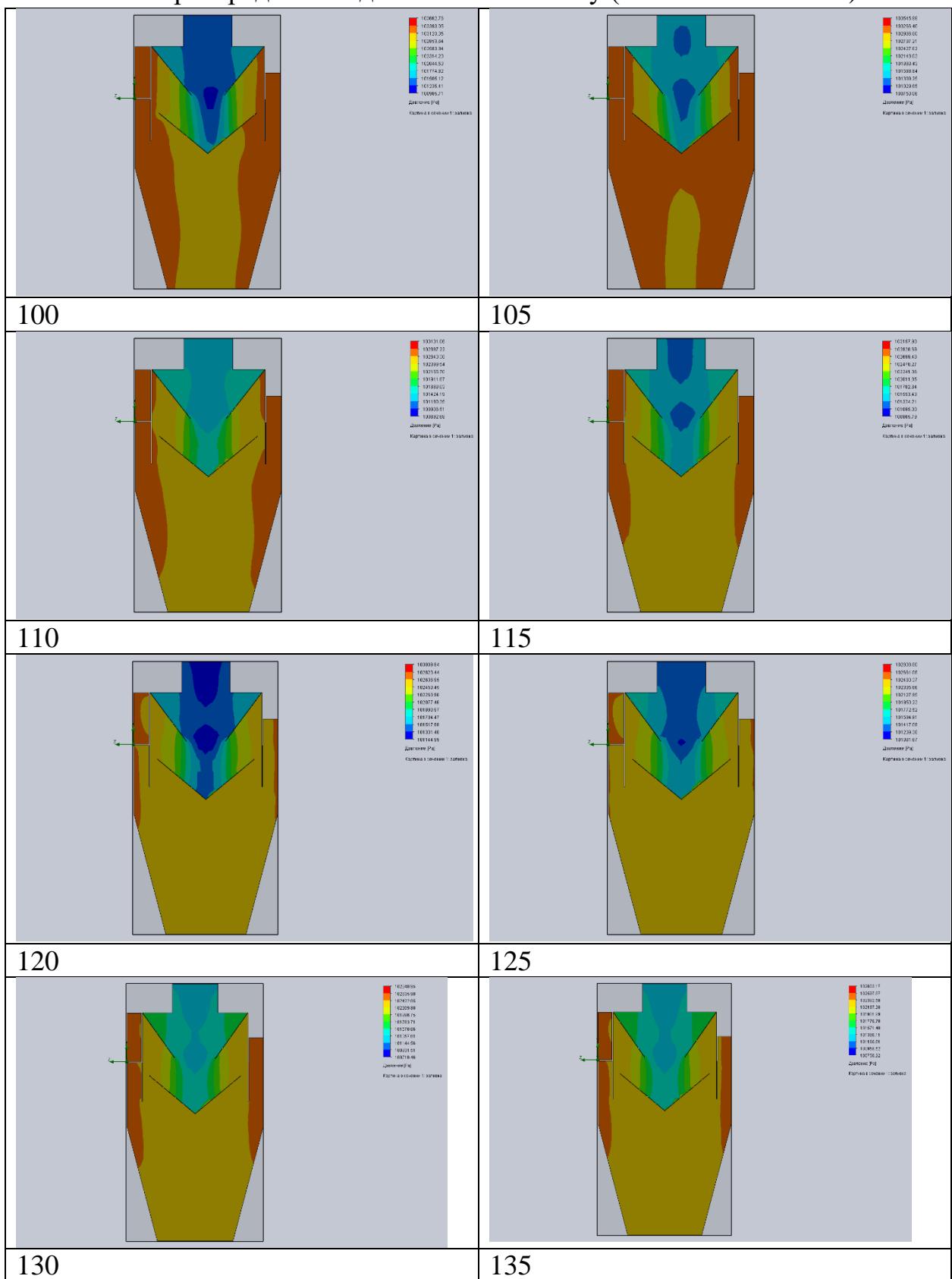
| | | | | | | | | |
|----|--|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | <i>Геометрический размер высоты отбойного конуса, мм</i> | | | | | | | |
| 2 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 |
| 3 | | | | | | | | 120 |
| 4 | 288 | 276 | 287 | 332 | 374 | 419 | 445 | 490 |
| 5 | 281 | 268 | 286 | 332 | 359 | 404 | 439 | 478 |
| 6 | 271 | 257 | 279 | 311 | 346 | 379 | 417 | 446 |
| 7 | 247 | 238 | 252 | 293 | 329 | 352 | 378 | 417 |
| 8 | 243 | 206 | 235 | 258 | 289 | 321 | 355 | 396 |
| 9 | 201 | 200 | 209 | 228 | 258 | 272 | 308 | 346 |
| 10 | 187 | 181 | 194 | 206 | 230 | 250 | 259 | 294 |
| 11 | 144 | 152 | 175 | 178 | 200 | 212 | 233 | 248 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | |
| 13 | 71,2 | 72,4 | 71,3 | 66,8 | 62,6 | 58,1 | 55,5 | 51 |
| 14 | 71,9 | 73,2 | 71,4 | 66,8 | 64,1 | 59,6 | 56,1 | 52,2 |
| 15 | 72,9 | 74,3 | 72,1 | 68,9 | 65,4 | 62,1 | 58,3 | 55,4 |
| 16 | 75,3 | 76,2 | 74,8 | 70,7 | 67,1 | 64,8 | 62,2 | 58,3 |
| 17 | 75,7 | 79,4 | 76,5 | 74,2 | 71,1 | 67,9 | 64,5 | 60,4 |
| 18 | 79,9 | 80 | 79,1 | 77,2 | 74,2 | 72,8 | 69,2 | 65,4 |
| 19 | 81,3 | 81,9 | 80,6 | 79,4 | 77 | 75 | 74,1 | 70,6 |
| 20 | 85,6 | 84,8 | 82,5 | 82,2 | 80 | 78,8 | 76,7 | 75,2 |
| 21 | <u>76,72</u> <u>5</u> | <u>77,77</u> <u>5</u> | <u>76,037</u> <u>5</u> | <u>73,27</u> <u>5</u> | <u>70,187</u> <u>5</u> | <u>67,387</u> <u>5</u> | <u>64,57</u> <u>5</u> | <u>61,062</u> <u>5</u> |
| 22 | <u>5,58</u> | <u>5,67</u> | <u>5,68</u> | <u>5,75</u> | <u>5,89</u> | <u>6,73</u> | <u>7,36</u> | <u>6,35</u> |

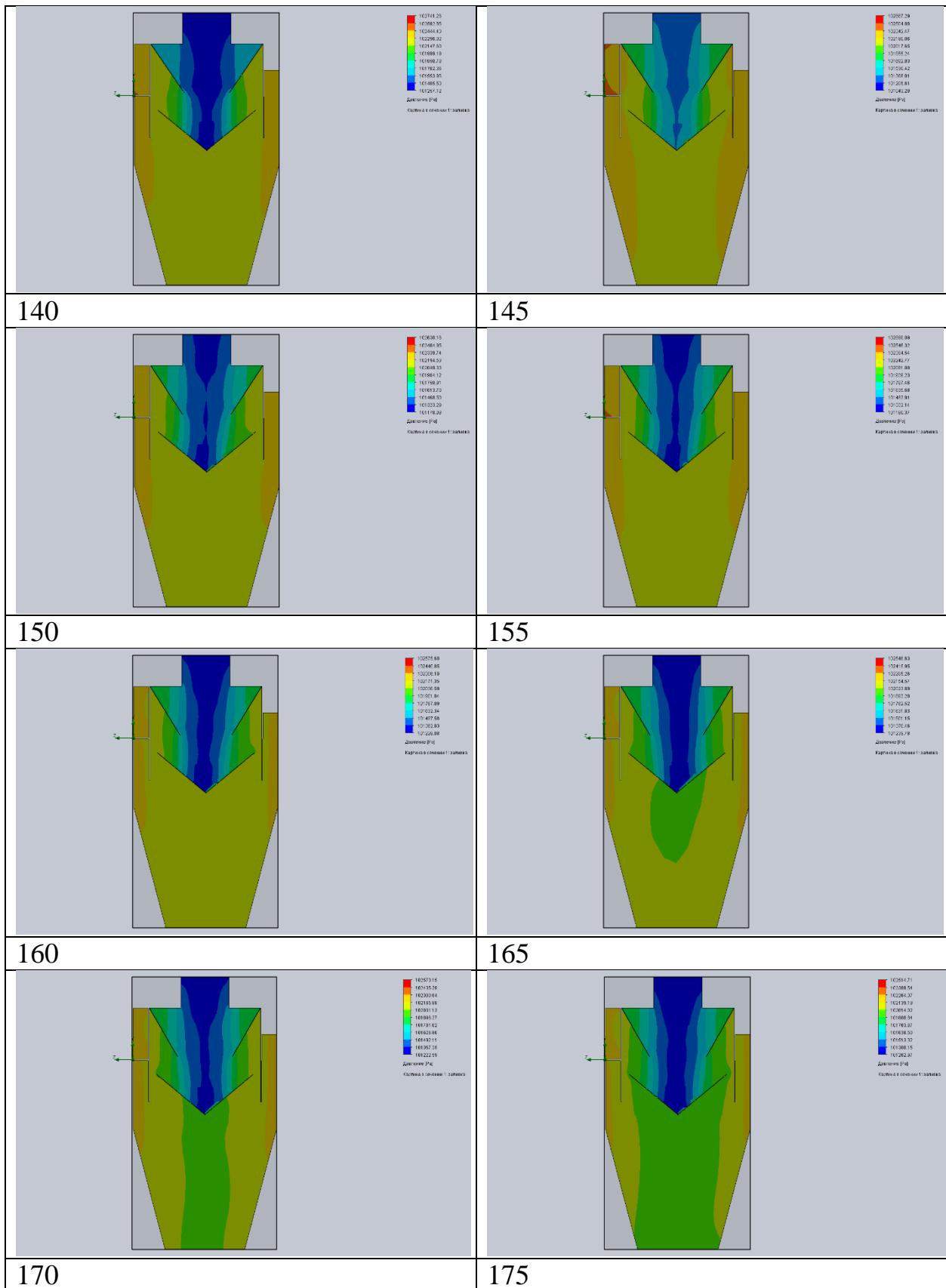
Продолжение таблицы

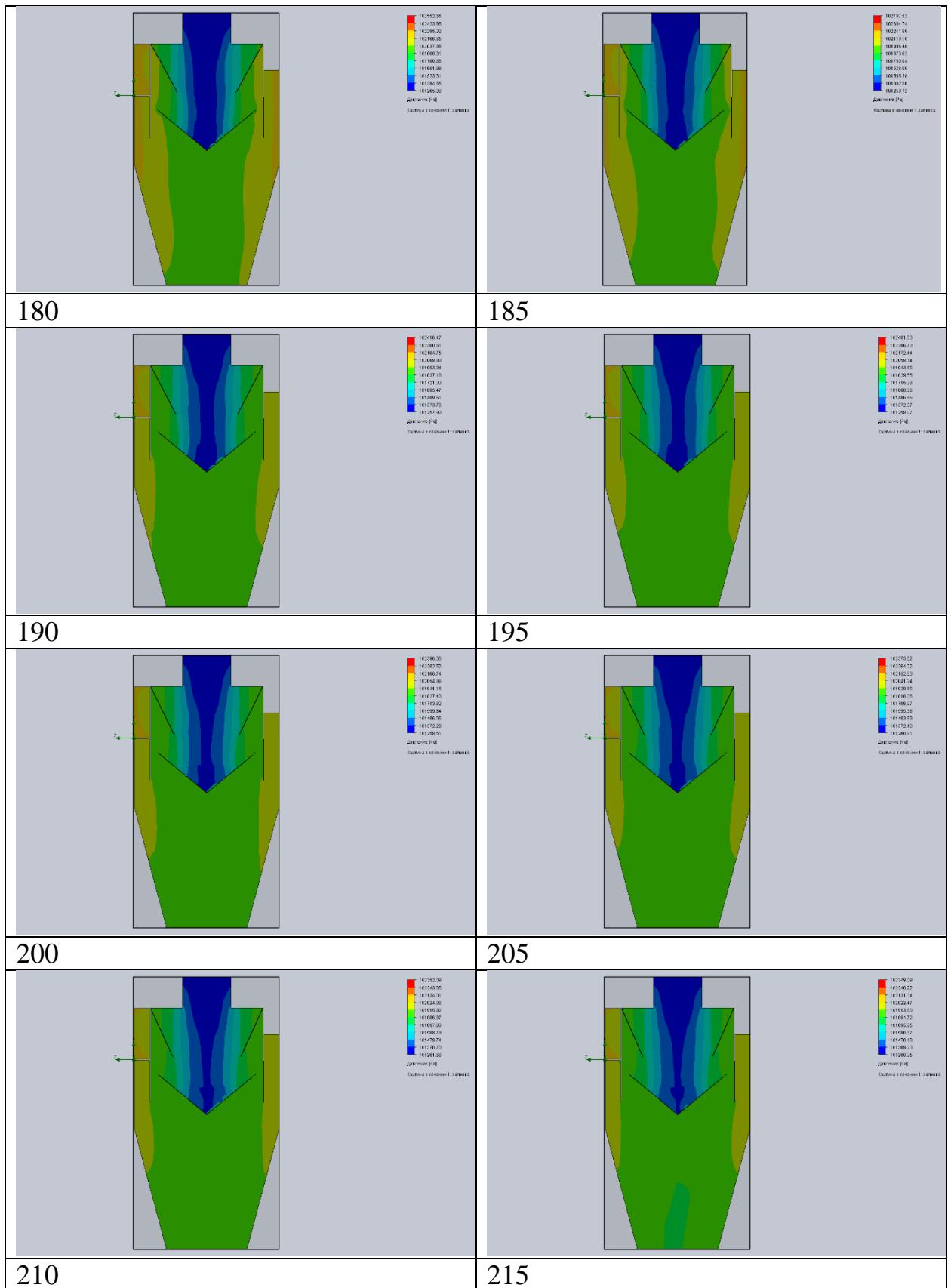
| 1 | <i>Геометрический размер высоты отбойного конуса, мм</i> | | | | | |
|----|---|-------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 2 | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 |
| 3 | | | | | | |
| 4 | 541 | 552 | 549 | 554 | 538 | 400 |
| 5 | 524 | 546 | 540 | 545 | 528 | 388 |
| 6 | 500 | 520 | 523 | 534 | 512 | 382 |
| 7 | 470 | 494 | 496 | 479 | 492 | 385 |
| 8 | 441 | 456 | 469 | 479 | 473 | 360 |
| 9 | 379 | 415 | 509 | 420 | 427 | 327 |
| 10 | 339 | 358 | 366 | 373 | 365 | 312 |
| 11 | 295 | 315 | 329 | 327 | 327 | 272 |
| 12 | <i>Эффективность по каждой фракции, η^i</i> | | | | | |
| 13 | 45,9 | 44,8 | 45,1 | 44,6 | 46,2 | 60 |
| 14 | 47,6 | 45,4 | 46 | 45,5 | 47,2 | 61,2 |
| 15 | 50 | 48 | 47,7 | 46,6 | 48,8 | 61,8 |
| 16 | 53 | 50,6 | 50,4 | 52,1 | 50,8 | 61,5 |
| 17 | 55,9 | 54,4 | 53,1 | 52,1 | 52,7 | 64 |
| 18 | 62,1 | 58,5 | 49,1 | 58 | 57,3 | 67,3 |
| 19 | 66,1 | 64,2 | 63,4 | 62,7 | 63,5 | 68,8 |
| 20 | 70,5 | 68,5 | 67,1 | 67,3 | 67,3 | 72,8 |
| 21 | <u>56,3875</u> | <u>54,3</u> | <u>52,7375</u> | <u>53,6125</u> | <u>54,225</u> | <u>64,675</u> |
| 22 | <u>6,54</u> | <u>7,53</u> | <u>7,54</u> | <u>6,89</u> | <u>7,09</u> | <u>7,58</u> |

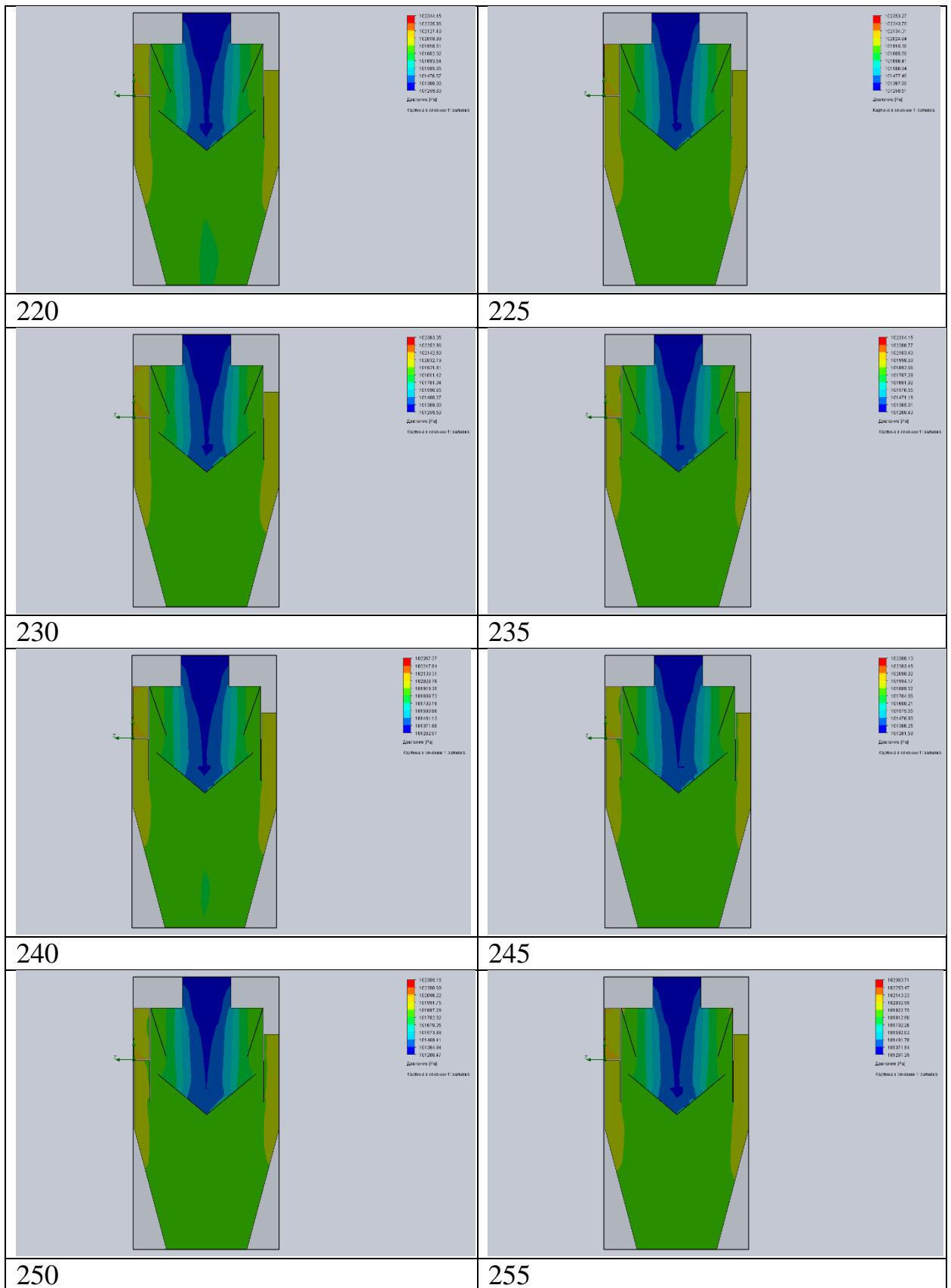
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

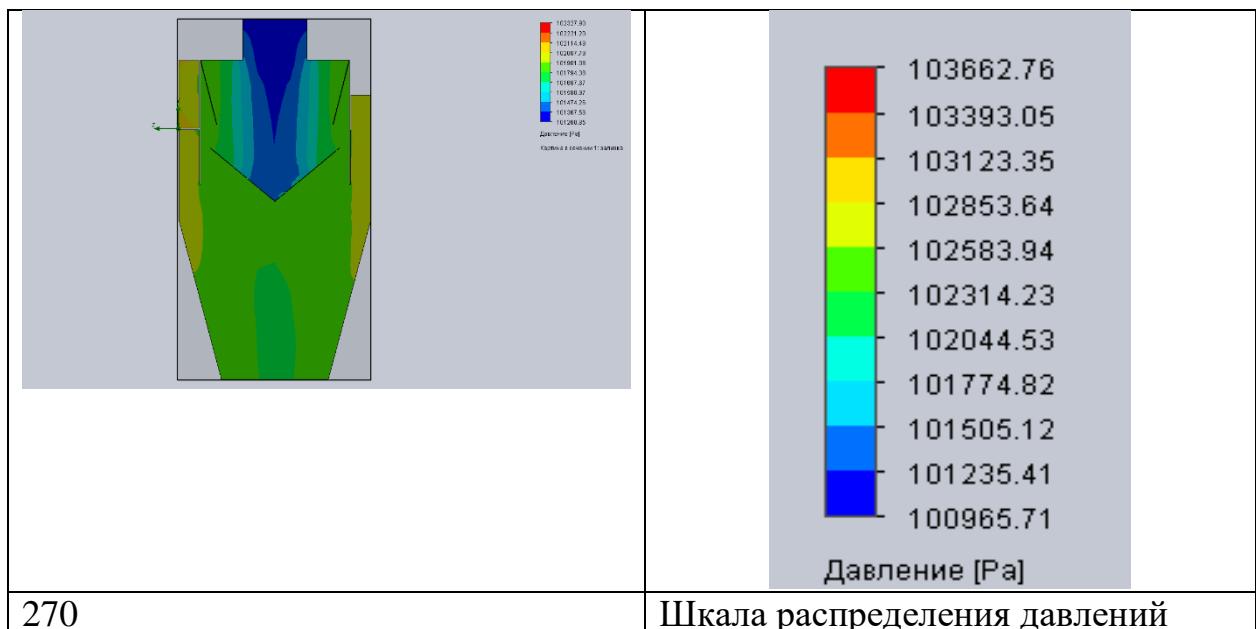
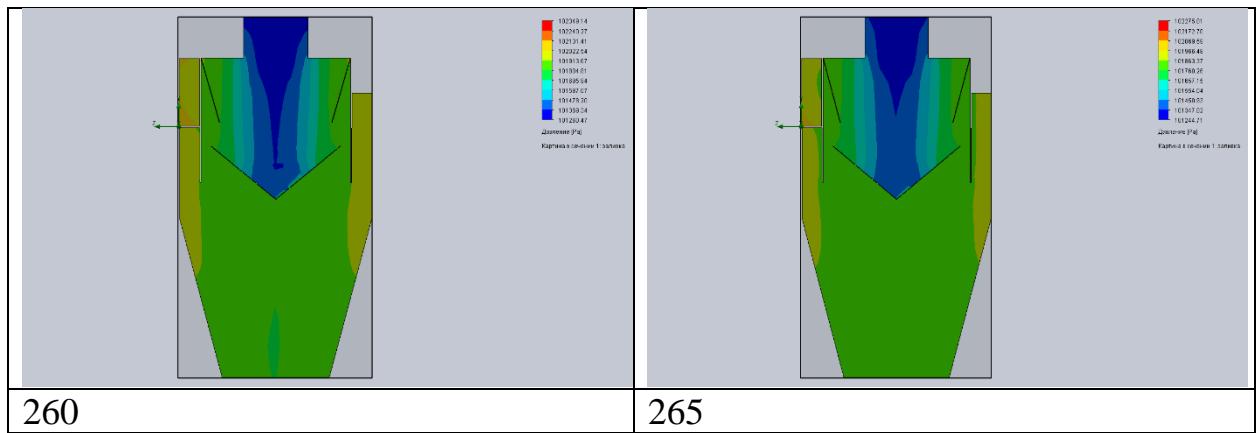
- 1) Расчетные точки диаметра вихревой воронки (от 100 мм до 270 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY).



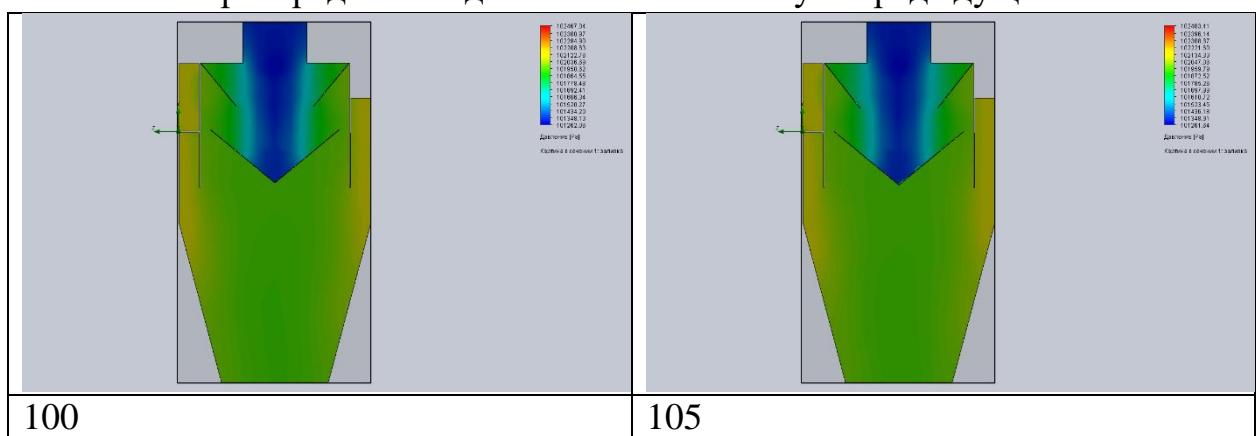


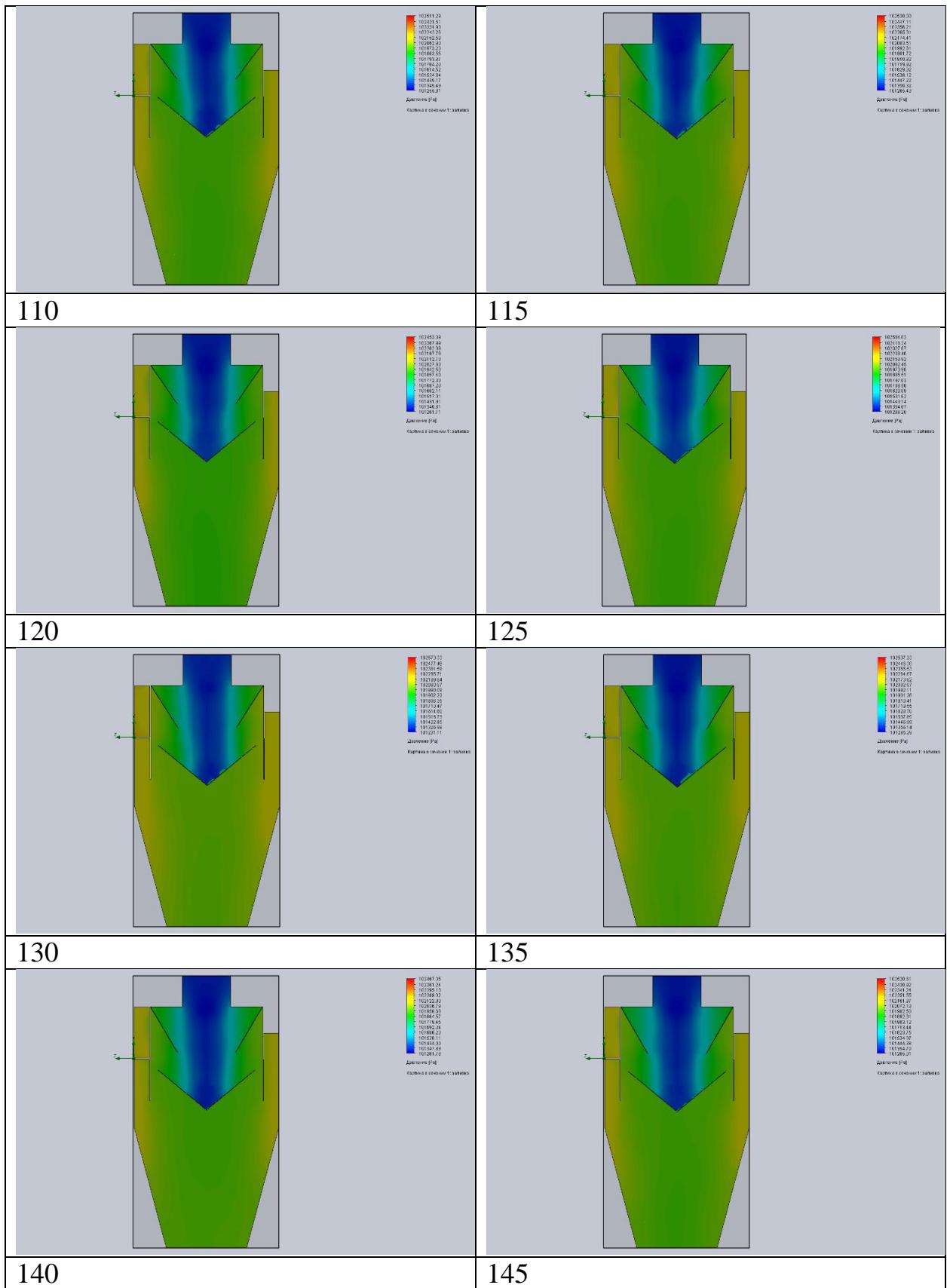


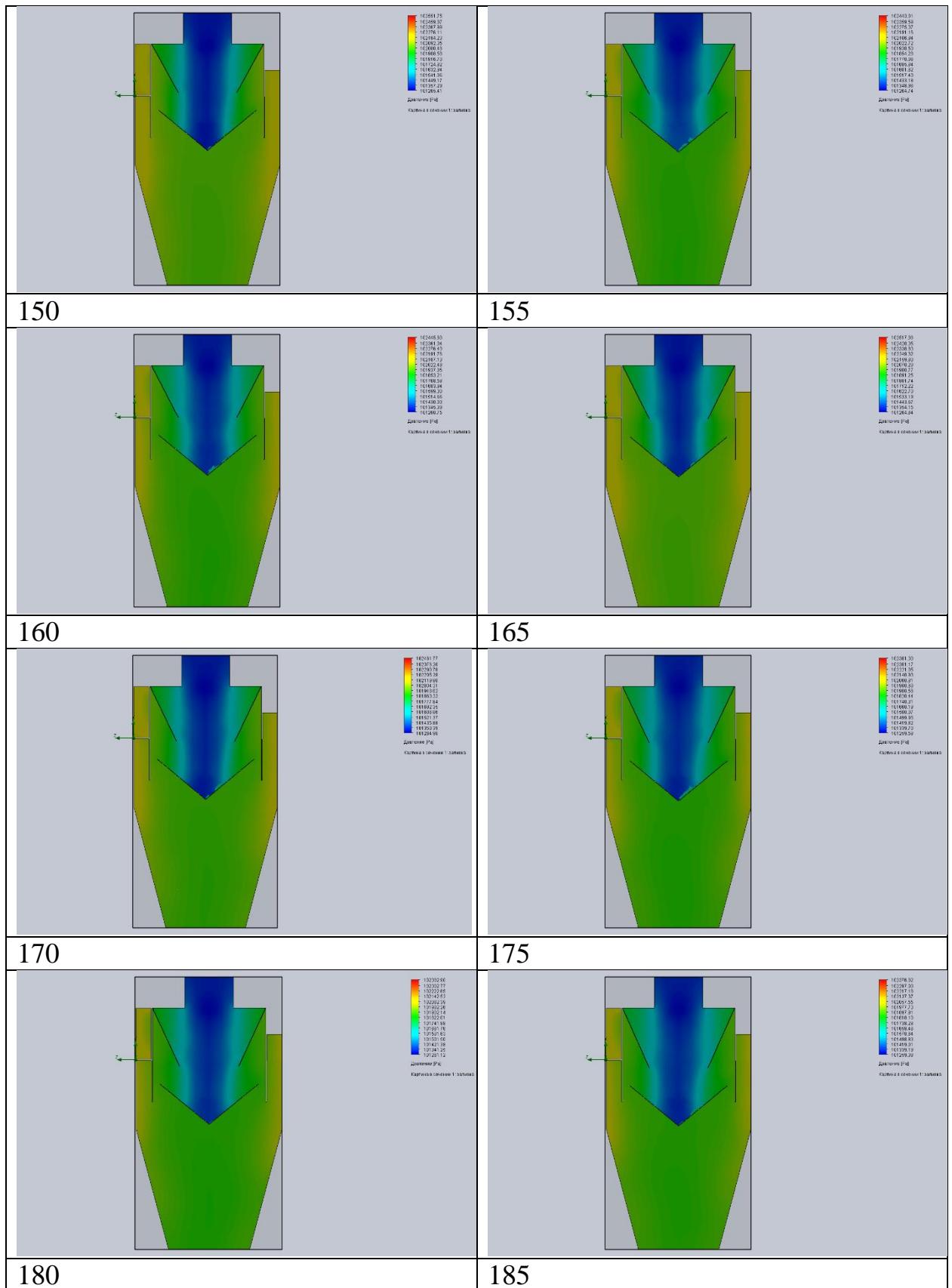


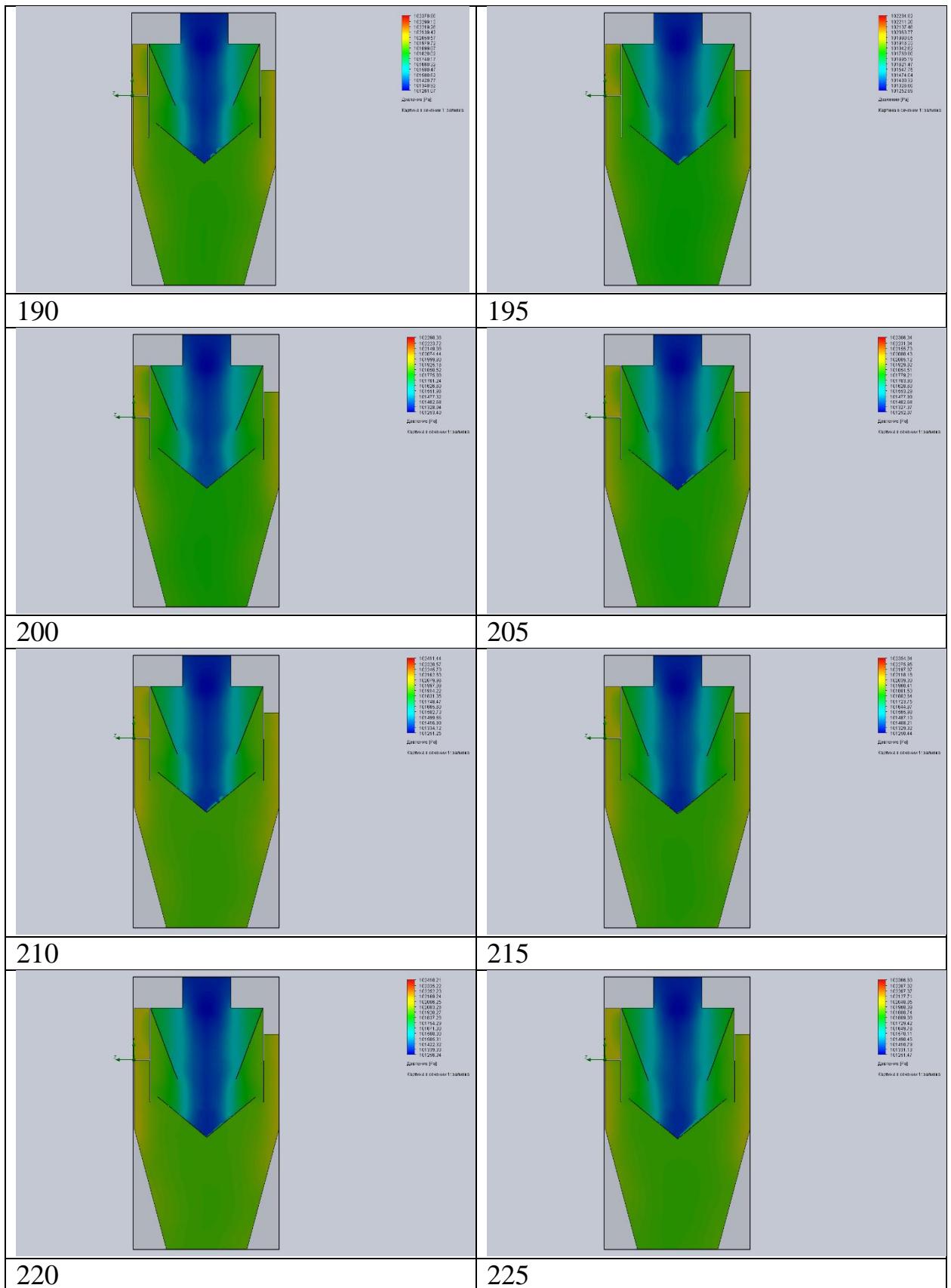


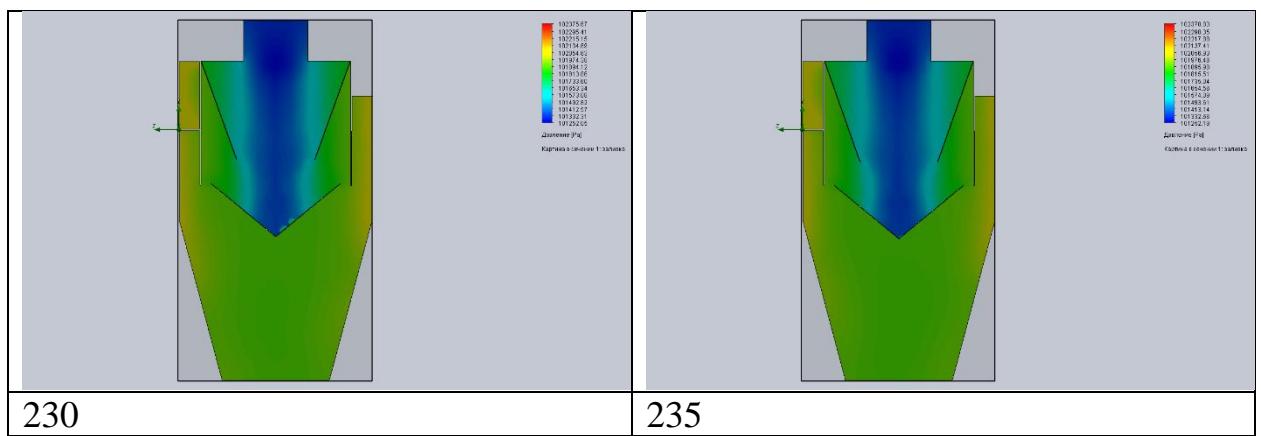
- 2) Расчетные точки высоты вихревой воронки (от 100 мм до 235 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY).
Шкала распределения давлений соответствует предыдущей.



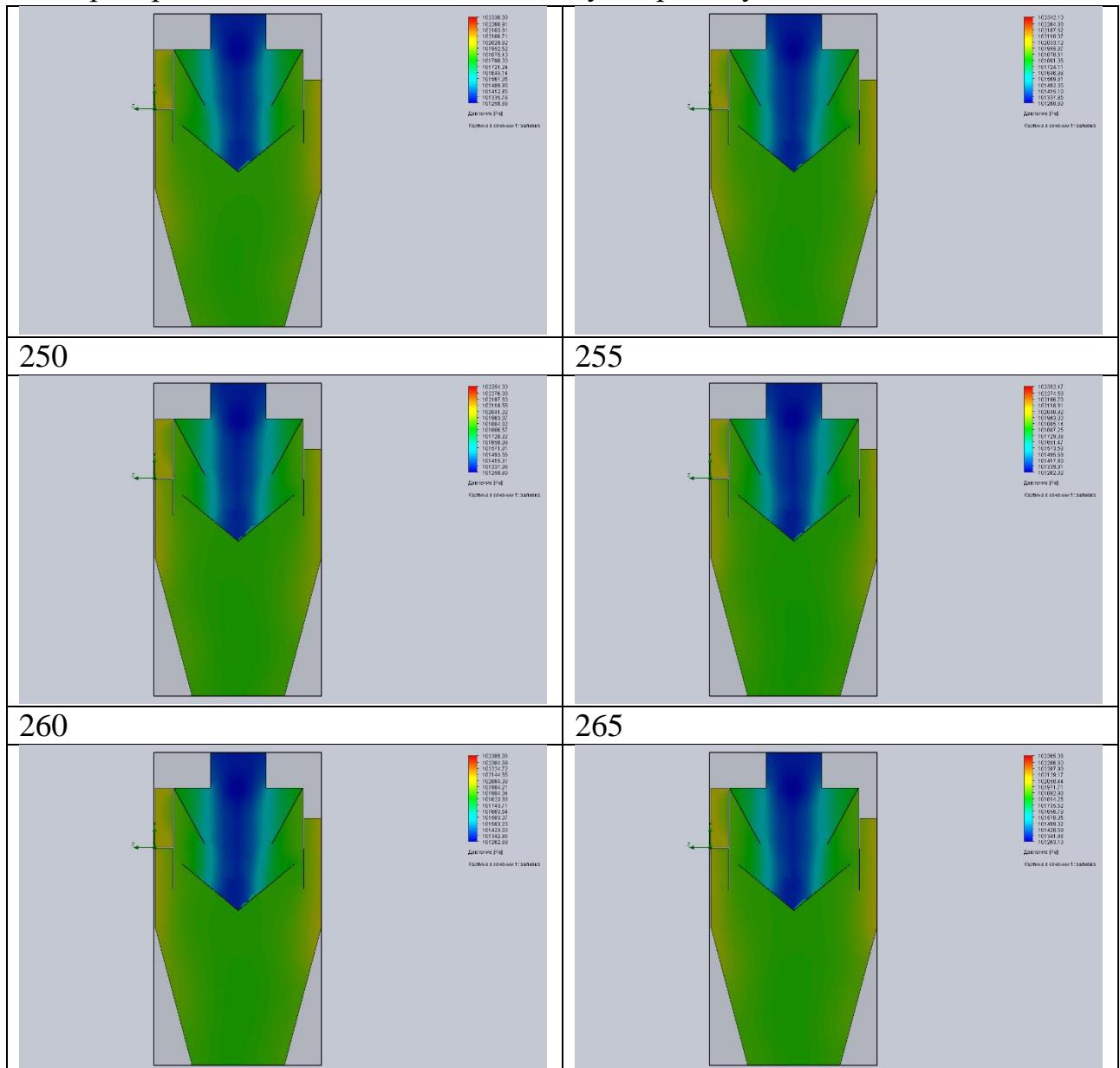


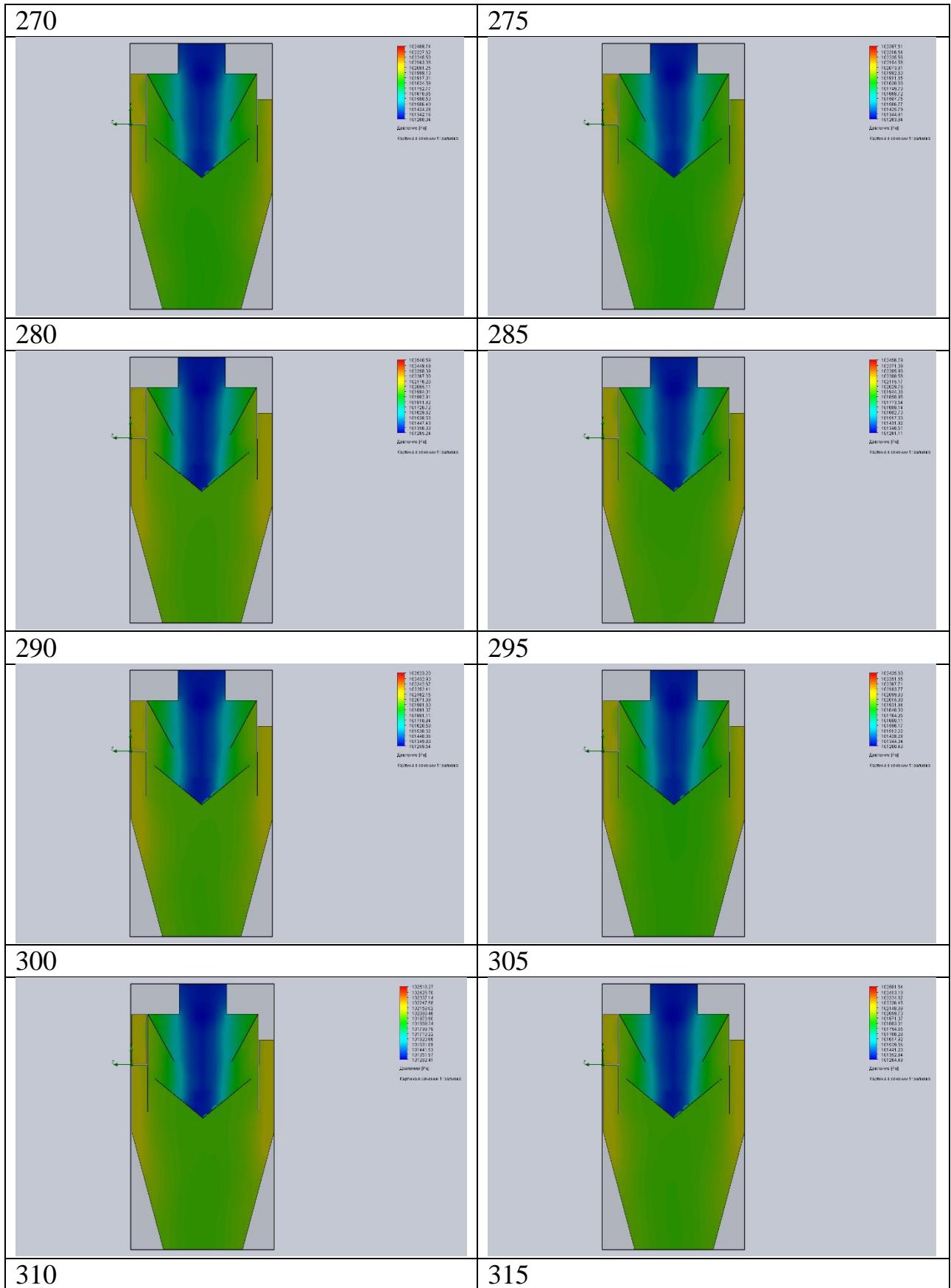


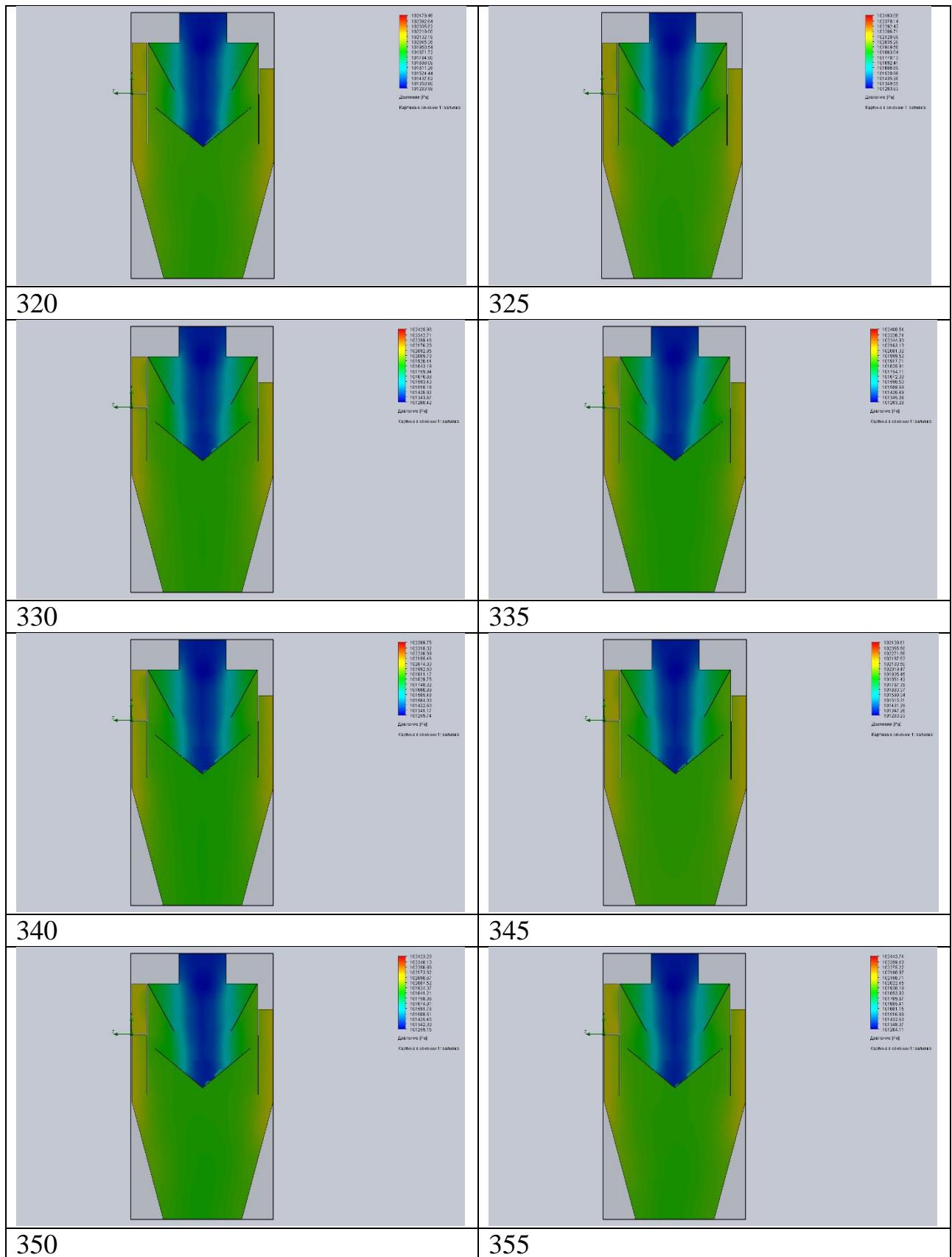


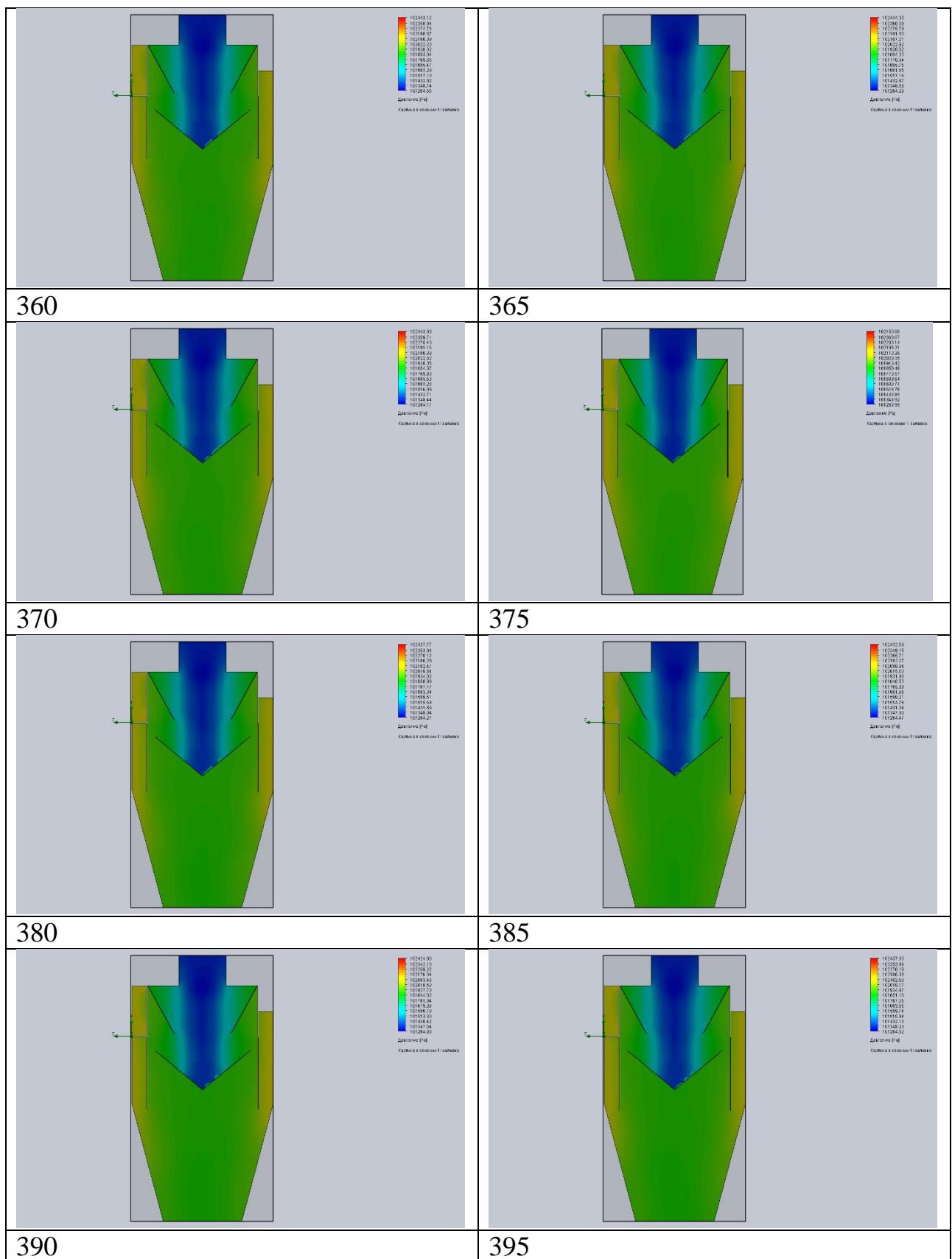


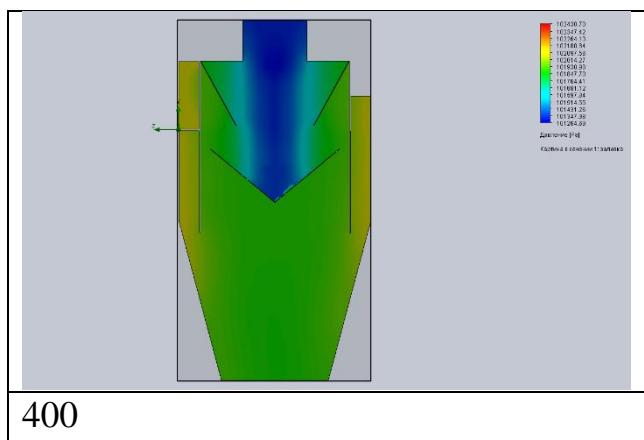
3) Высота цилиндрической вставки (от 250 мм до 400 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY). Шкала распределения давлений соответствует предыдущей.



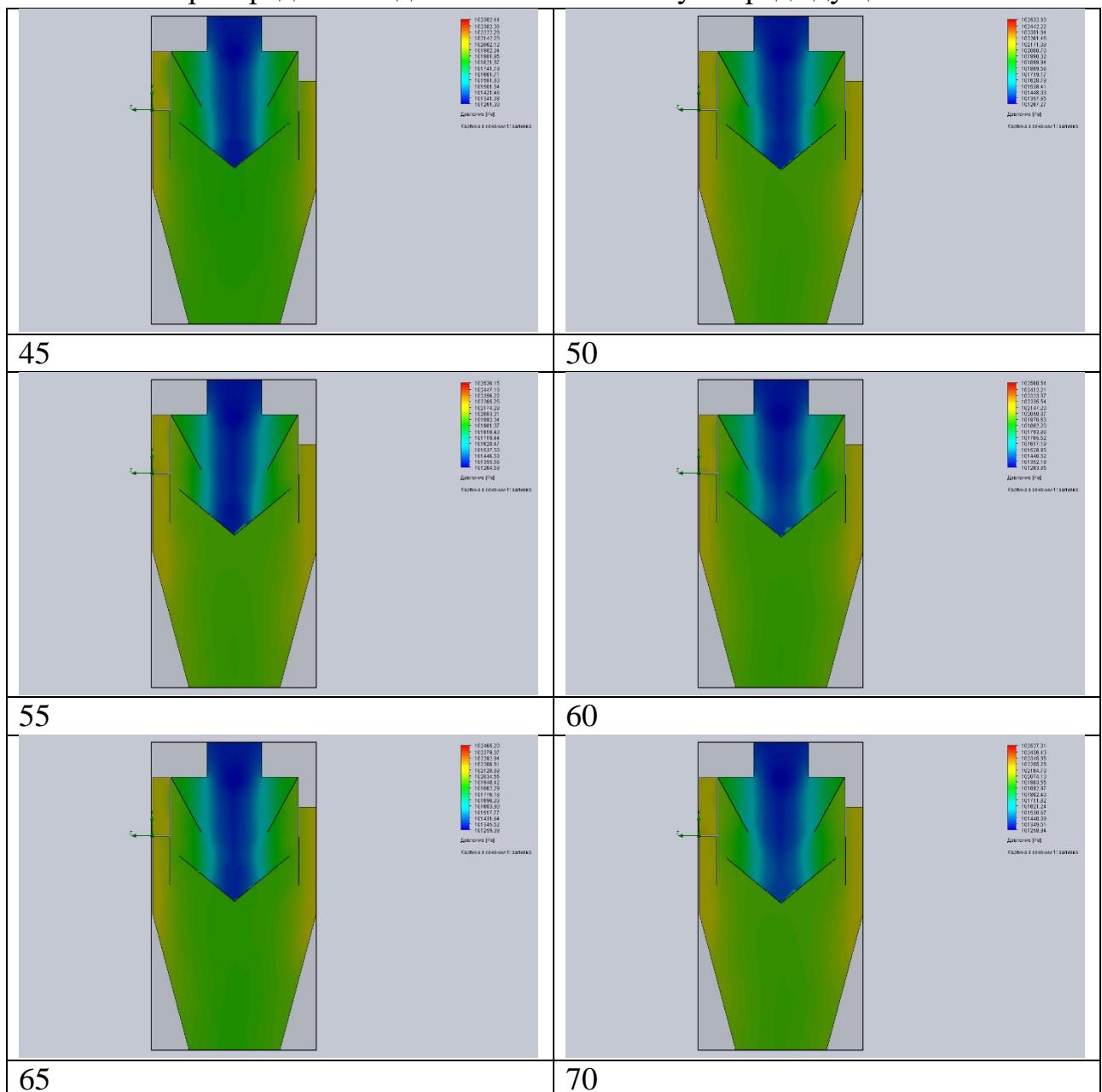


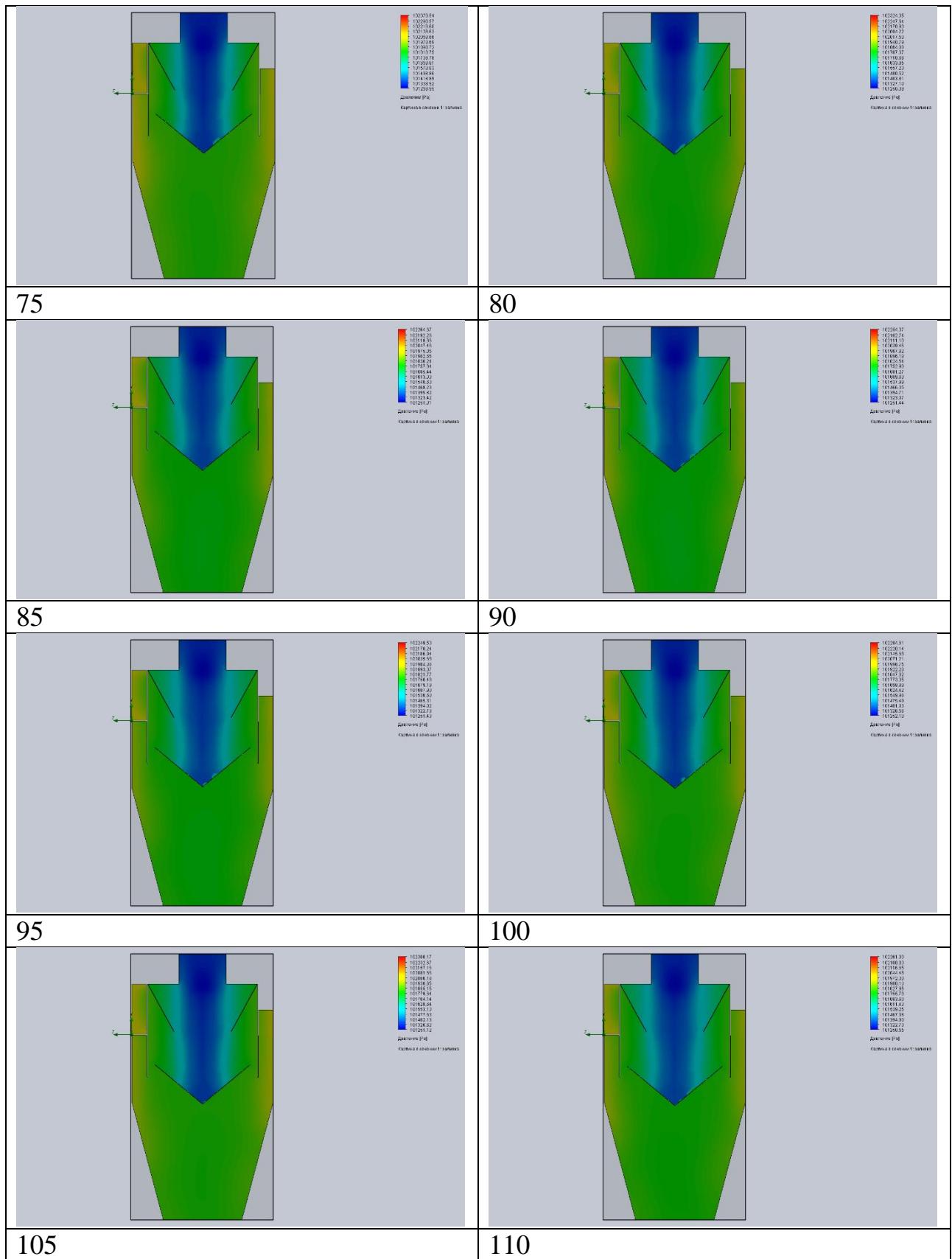


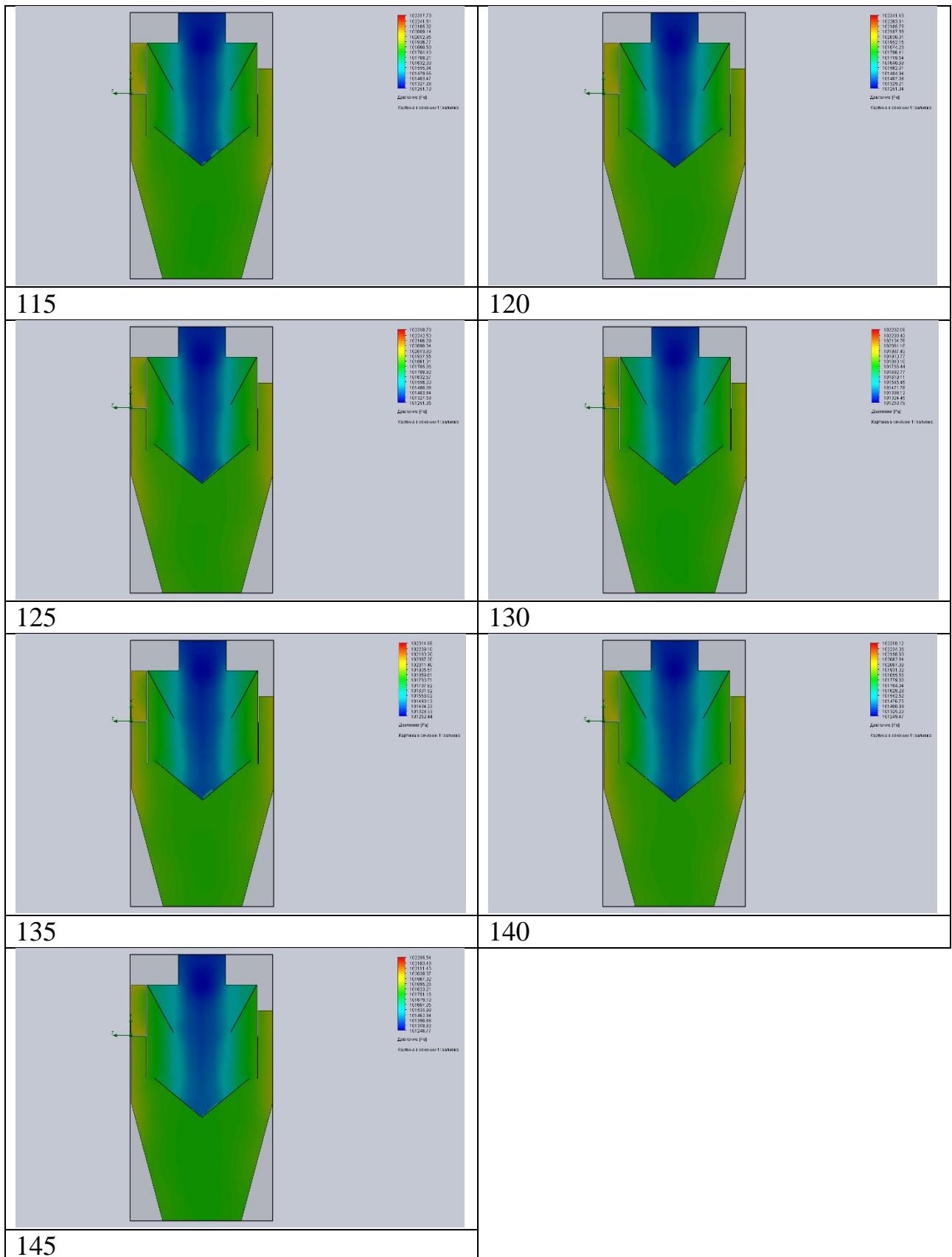




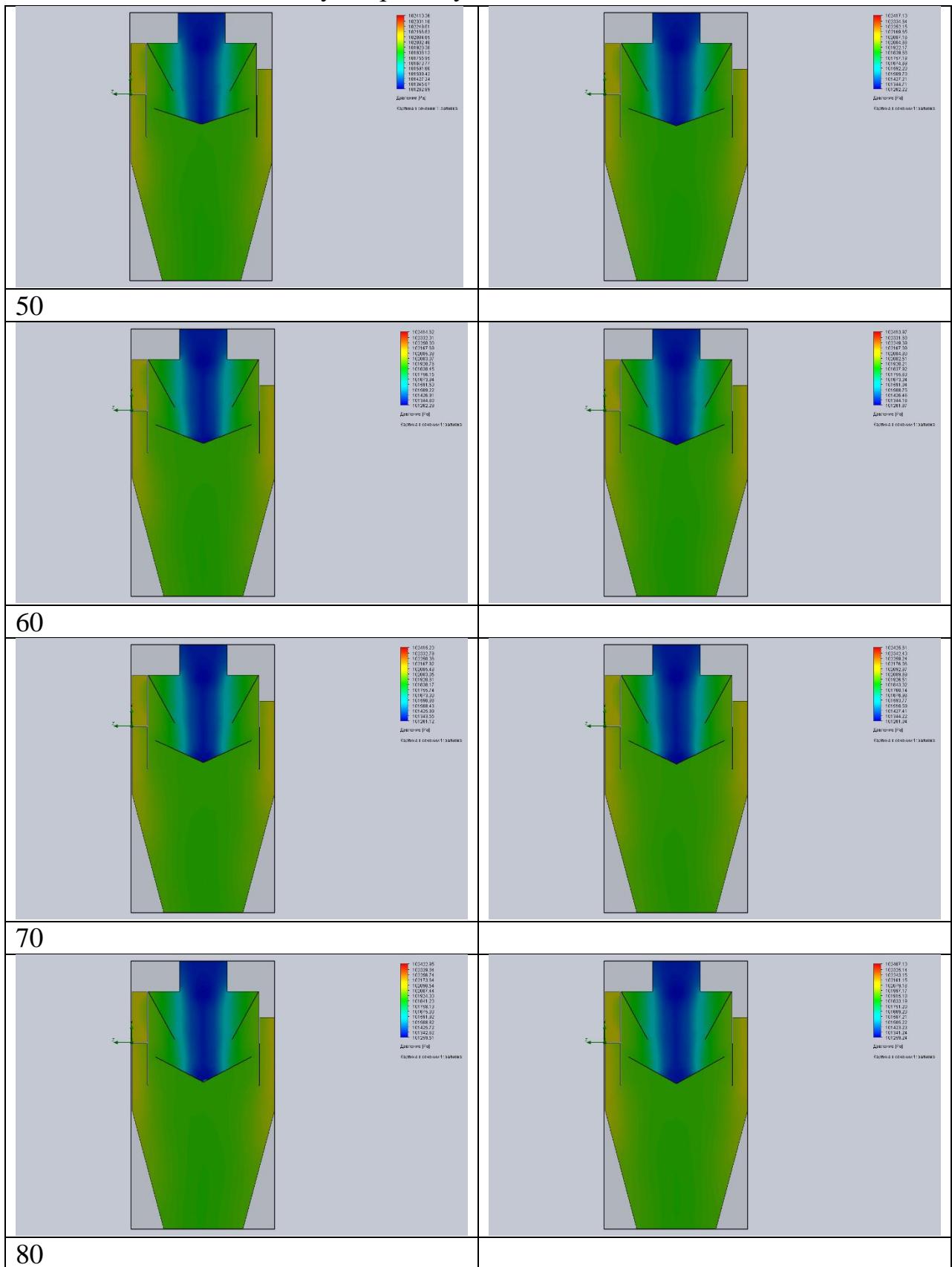
- 4) Расстояние от вихревой воронки до отбойного конуса (от 45 мм до 145 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY). Шкала распределения давлений соответствует предыдущей.

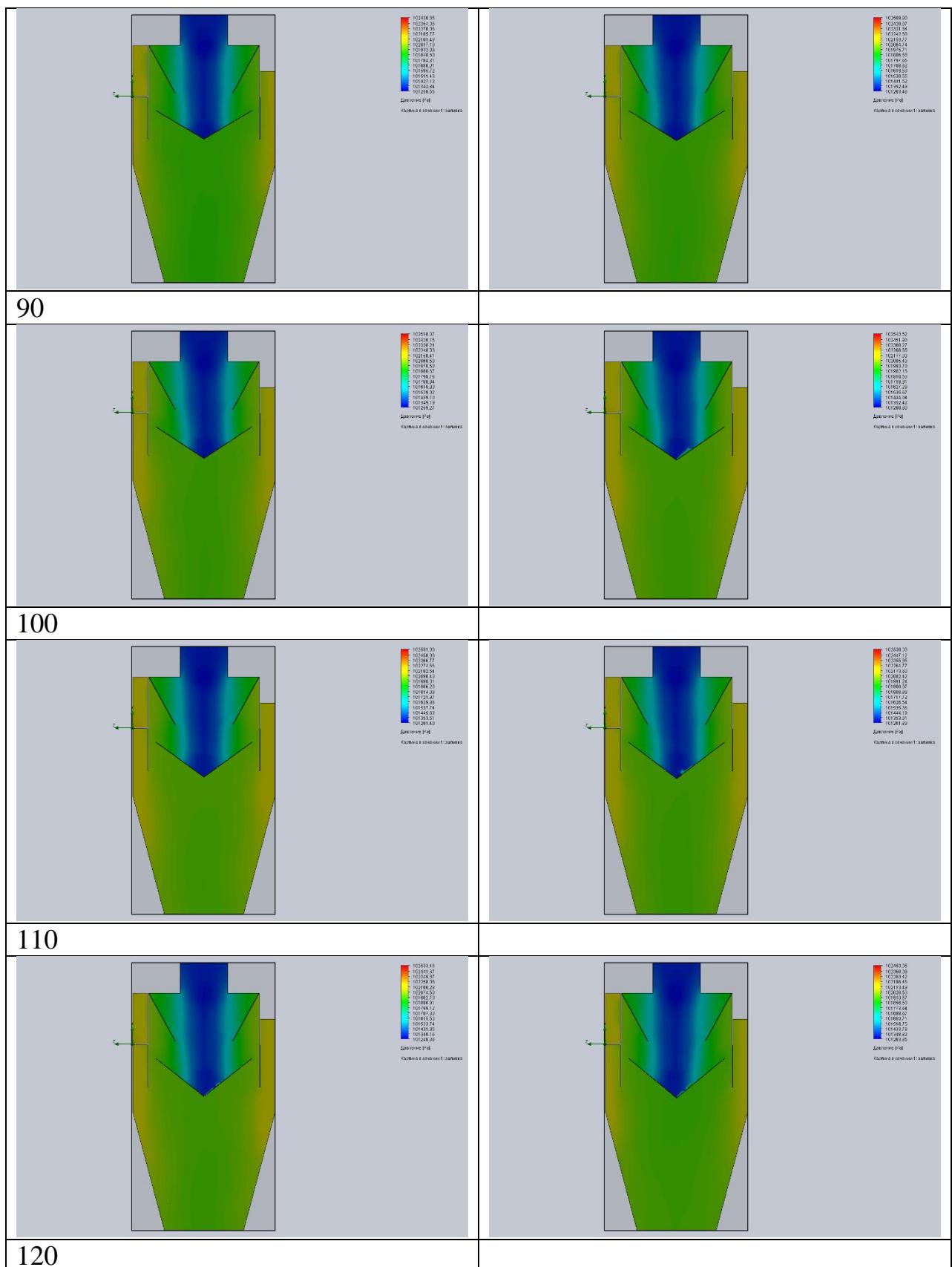


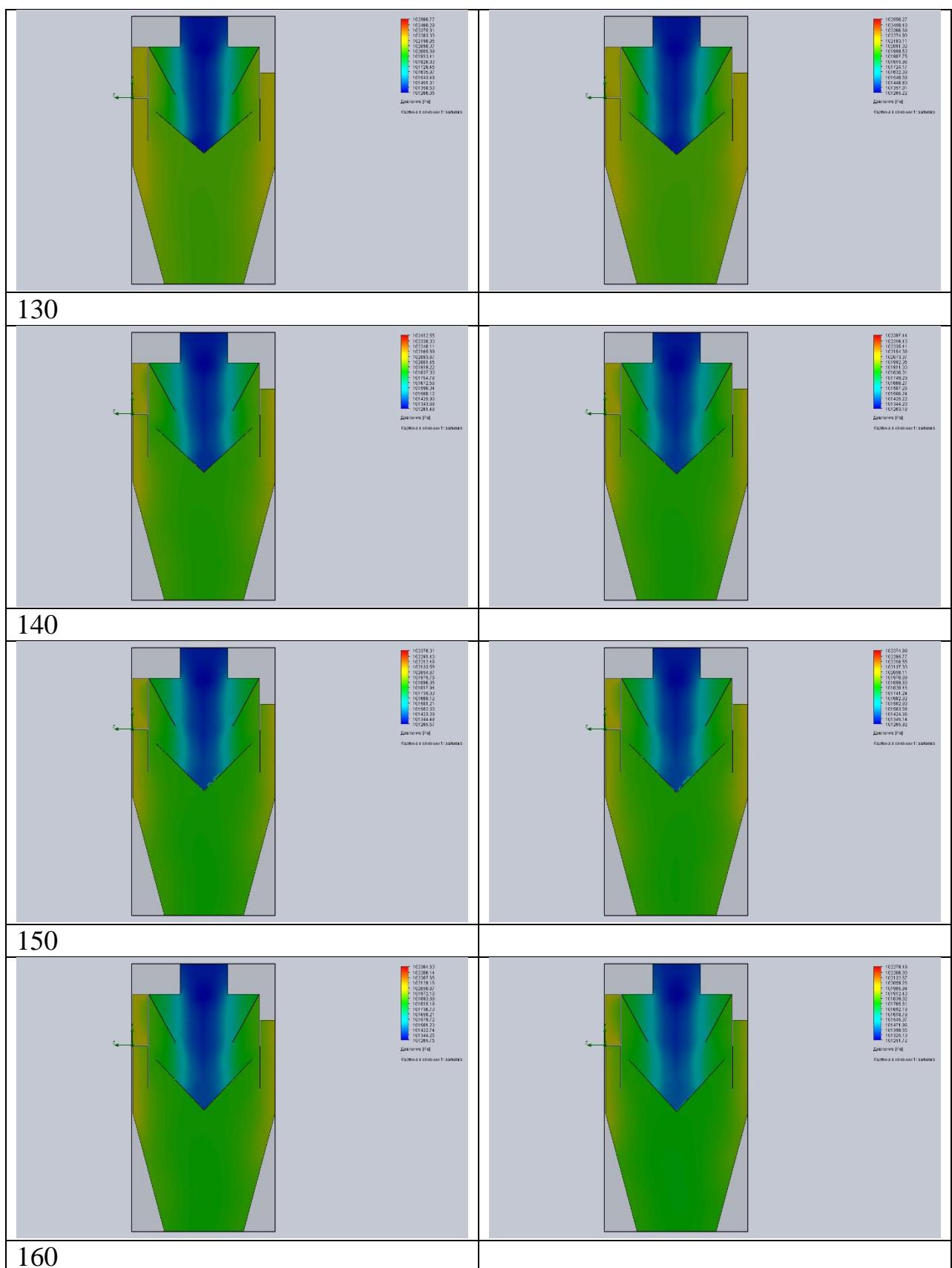


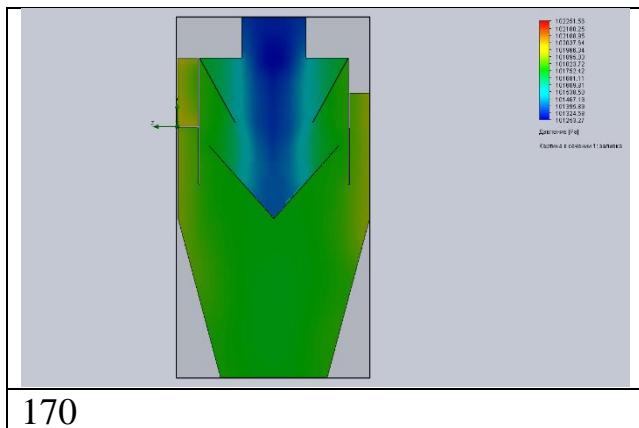


5) Высота отбойного конуса (от 50 мм до 170 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY). Шкала распределения давлений соответствует предыдущей.

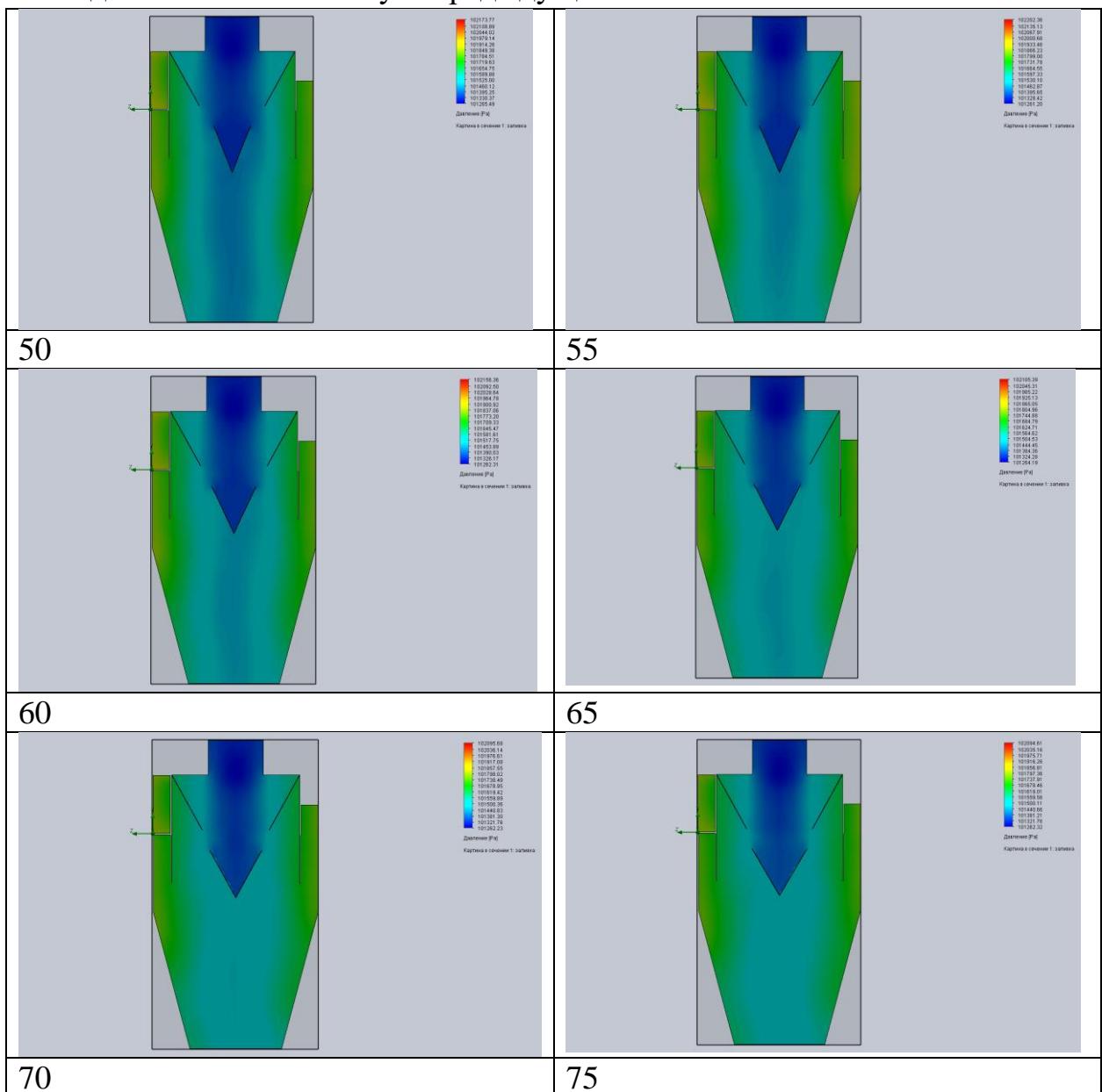


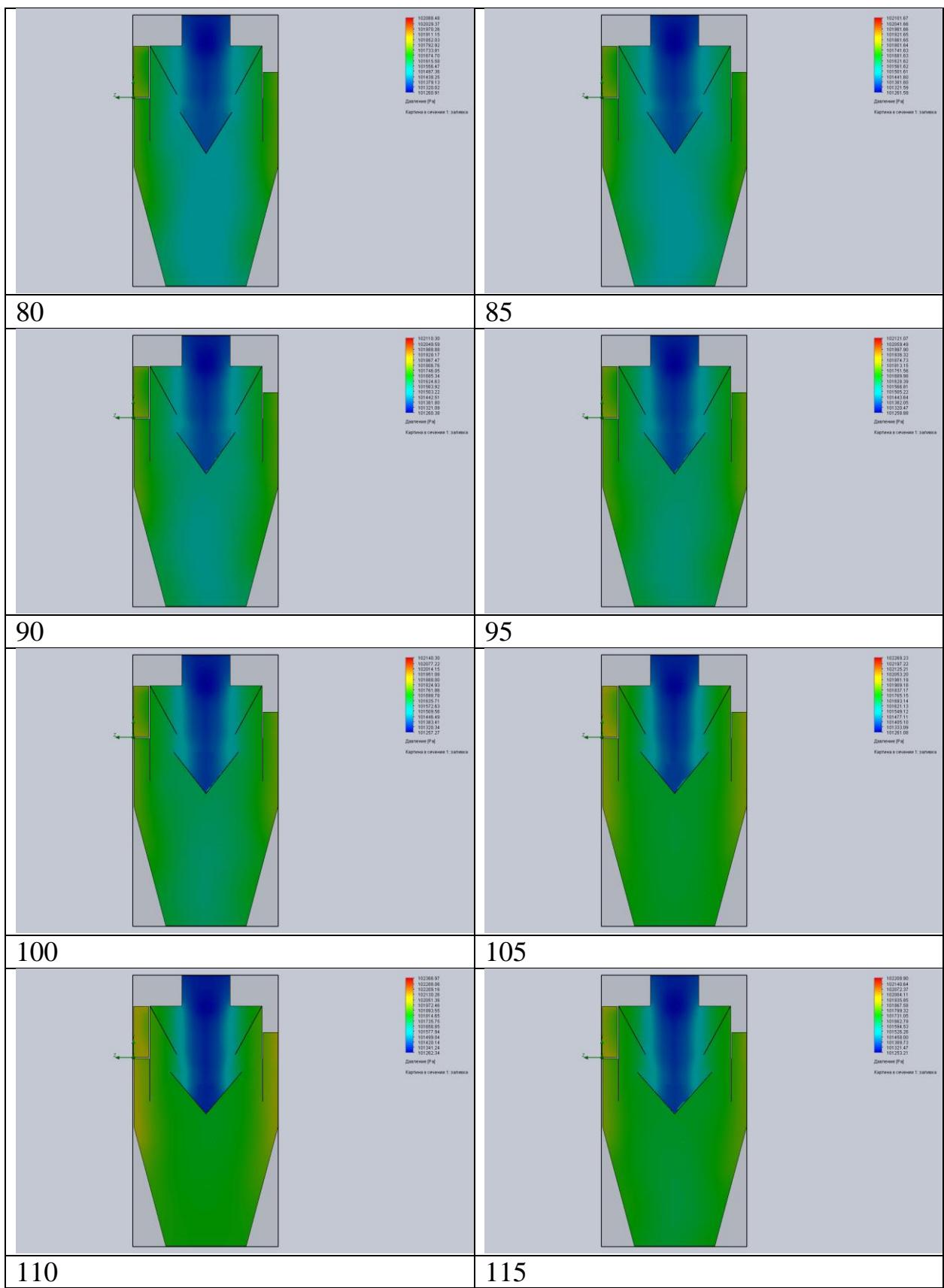


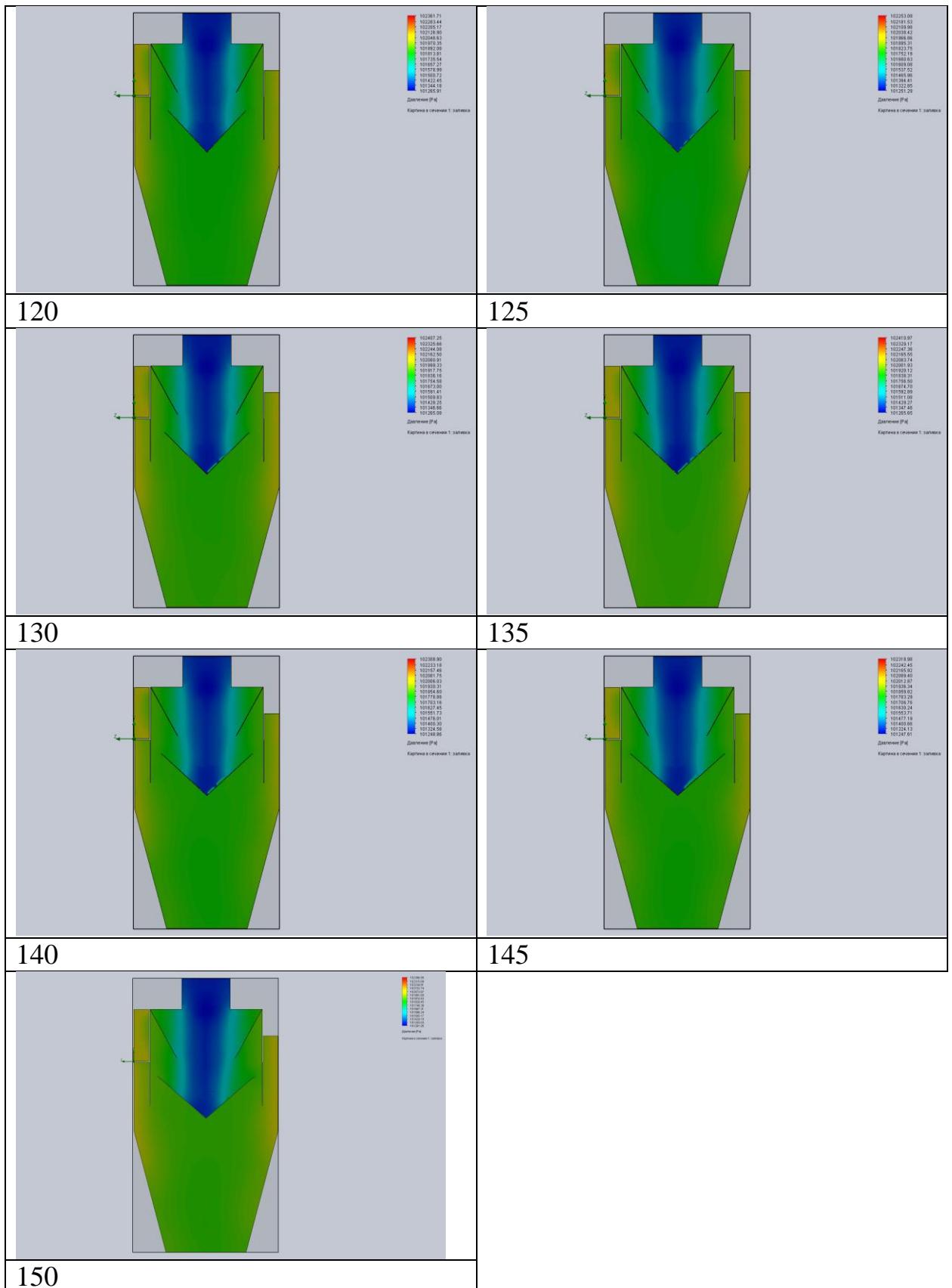




- 6) Диаметр отбойного конуса (от 50 мм до 150 мм) с полями распределения давлений по объему (сечение по оси XY). Шкала распределения давлений соответствует предыдущей.







ПРИЛОЖЕНИЕ В

Матрица экспериментов

| № опыты | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₁ ² | X ₂ ² | X ₃ ² | X ₄ ² | X ₁ X ₂ |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 12 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 13 | -1 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 14 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 21 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 22 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 25 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 26 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Продолжение таблицы

| № опыты | X ₁ X ₃ | X ₁ X ₄ | X ₂ X ₃ | X ₂ X ₄ | X ₃ X ₄ | Y ₁ | Y ₂ |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,881 | 2.99 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,474 | 2.85 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,878 | 2.99 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,451 | 2.85 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 97,842 | 2.95 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 97,829 | 2.91 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 97,665 | 2.87 |

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|---|--------|------|
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 97,678 | 2.99 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,715 | 3.00 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 97,706 | 2.91 |
| 11 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 97,737 | 2.83 |
| 12 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 97,711 | 2.91 |
| 13 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 97,741 | 2.83 |
| 14 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 98,000 | 3.05 |
| 15 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 97,900 | 2.95 |
| 16 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 97,618 | 3.01 |
| 17 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 97,450 | 2.97 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,726 | 3.00 |
| 19 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,842 | 3.02 |
| 20 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,658 | 2.95 |
| 21 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,847 | 3.02 |
| 22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,656 | 2.95 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 97,886 | 2.98 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 97,882 | 2.93 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 97,454 | 2.85 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 97,460 | 2.86 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,714 | 3.00 |

Результаты вывода итогов статистической обработки для Y_1

| Множественный R | | 0,996237049 | | | |
|-------------------------|--------------|--------------------|--------------|------------|-------------|
| R-квадрат | | 0,992488258 | | | |
| Нормированный R-квадрат | | 0,983724558 | | | |
| Стандартная ошибка | | 0,020038759 | | | |
| Наблюдения | | 27 | | | |
| Дисперсионный анализ | | | | | |
| | | df | SS | MS | F |
| Регрессия | | 14 | 0,63666 | 0,045476 | 113,2499181 |
| Остаток | | 12 | 0,004819 | 0,000402 | |
| Итого | | 26 | 0,641479 | | |
| | | | | | |
| | Kоэффициенты | Стандартная ошибка | t-статистика | P-Значение | |
| Y-пересечение | | 97,7182 | 0,011569 | 8446,276 | 5,10994E-42 |
| Переменная X 1 | | 0,000975 | 0,005785 | 0,168548 | 0,868959495 |

| | | | | |
|-----------------|------------|----------|----------|--------------------------|
| Переменная X 2 | 0,21 | 0,005785 | 36,30271 | $1,22235 \cdot 10^{-13}$ |
| Переменная X 3 | 0,08085 | 0,005785 | 13,97654 | $8,69582 \cdot 10^{-9}$ |
| Переменная X 4 | -0,005325 | 0,005785 | -0,92053 | 0,375429272 |
| Переменная X 5 | -0,0049875 | 0,008677 | -0,57479 | 0,576049307 |
| Переменная X 6 | -0,035925 | 0,008677 | -4,14024 | 0,001370239 |
| Переменная X 7 | 0,045525 | 0,008677 | 5,246606 | 0,000205539 |
| Переменная X 8 | -0,0038625 | 0,008677 | -0,44514 | 0,66414175 |
| Переменная X 9 | -0,00495 | 0,010019 | -0,49404 | 0,630195405 |
| Переменная X 10 | -0,0018 | 0,010019 | -0,17965 | 0,86042378 |
| Переменная X 11 | -0,000225 | 0,010019 | -0,02246 | 0,982452923 |
| Переменная X 12 | -0,016875 | 0,010019 | -1,68424 | 0,117945443 |
| Переменная X 13 | 0,002475 | 0,010019 | 0,247021 | 0,809067241 |
| Переменная X 14 | 0,006525 | 0,010019 | 0,651238 | 0,527167694 |

Полученные результаты при проведении численного моделирования по матрице Бокса-Бенкена.

| 1 | 2 | Номер опыта | | | | | |
|----|---|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 3 | Размер фракции, мкм | | | | | | |
| 4 | 10 | 337 | 349 | 334 | 351 | 330 | 337 |
| 5 | 30 | 324 | 352 | 324 | 356 | 317 | 309 |
| 6 | 50 | 309 | 338 | 310 | 335 | 298 | 304 |
| 7 | 70 | 280 | 315 | 281 | 321 | 267 | 272 |
| 8 | 90 | 236 | 290 | 240 | 295 | 231 | 223 |
| 9 | 110 | 181 | 255 | 179 | 255 | 194 | 192 |
| 10 | 130 | 125 | 198 | 126 | 202 | 154 | 160 |
| 11 | 150 | 92 | 148 | 92 | 150 | 127 | 132 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | |
| 13 | 10 | 66,3 | 65,1 | 66,6 | 64,9 | 67 | 66,3 |
| 14 | 30 | 67,6 | 64,8 | 67,6 | 64,4 | 68,3 | 69,1 |
| 15 | 50 | 69,1 | 66,2 | 69 | 66,5 | 70,2 | 69,6 |
| 16 | 70 | 72 | 68,5 | 71,9 | 67,9 | 73,3 | 72,8 |
| 17 | 90 | 76,4 | 71 | 76 | 70,5 | 76,9 | 77,7 |
| 18 | 110 | 81,9 | 74,5 | 82,1 | 74,5 | 80,6 | 80,8 |
| 19 | 130 | 87,5 | 80,2 | 87,4 | 79,8 | 84,6 | 84 |
| 20 | 150 | 90,8 | 85,2 | 90,8 | 85 | 87,3 | 86,8 |
| 21 | <u>Критерий эффективности η</u> | <u>76,45</u> | <u>71,937</u> | <u>76,425</u> | <u>71,687</u> | <u>76,025</u> | <u>75,887</u> |
| | | | <u>5</u> | | <u>5</u> | | <u>5</u> |

| | | | | | | | |
|----|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 22 | <u>Критерий эффективности</u> <u>, η_{mod}</u> | <u>97,89</u> | <u>97,47</u> | <u>97,89</u> | <u>97,47</u> | <u>97,84</u> | <u>97,84</u> |
| 23 | <u>Гидравлическое сопротивление, ξ</u> | <u>3,00</u> | <u>2,86</u> | <u>3,00</u> | <u>2,86</u> | <u>2,96</u> | <u>2,92</u> |

| 1 | Номер опыта | | | | | | | | | |
|----|---|-------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--|
| 2 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | 350 | | 352 | | 351 | | 345 | | 349 | |
| 5 | 335 | | 340 | | 342 | | 343 | | 340 | |
| 6 | 314 | | 312 | | 326 | | 321 | | 319 | |
| 7 | 303 | | 293 | | 293 | | 287 | | 288 | |
| 8 | 251 | | 263 | | 261 | | 257 | | 245 | |
| 9 | 225 | | 217 | | 195 | | 206 | | 199 | |
| 10 | 170 | | 161 | | 143 | | 149 | | 150 | |
| 11 | 128 | | 126 | | 120 | | 125 | | 123 | |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | | |
| 13 | 65 | 64,8 | 64,9 | 65,5 | 65,1 | 65,4 | 65 | 68,7 | 67,6 | |
| 14 | 66,5 | 66 | 65,8 | 65,7 | 66 | 65,8 | 66,6 | 71,6 | 68 | |
| 15 | 68,6 | 68,8 | 67,4 | 67,9 | 68,1 | 67,9 | 68 | 71,5 | 68,9 | |
| 16 | 69,7 | 70,7 | 70,7 | 70,7 | 71,3 | 71,2 | 70,8 | 74 | 72,2 | |
| 17 | 74,9 | 73,7 | 73,9 | 74,3 | 75,5 | 74,1 | 75,2 | 77,7 | 76,8 | |
| 18 | 77,5 | 78,3 | 80,5 | 79,4 | 80,1 | 79,5 | 80,3 | 82,4 | 83,4 | |
| 19 | 83 | 83,9 | 85,7 | 85,1 | 85 | 85,2 | 85,8 | 86,5 | 86,1 | |
| 20 | 87,2 | 87,4 | 88 | 87,5 | 87,7 | 87,5 | 87,5 | 89,9 | 90,4 | |
| 21 | <u>74,0</u> <u>5</u> | <u>74,2</u> <u>5</u> | <u>74,612</u> <u>5</u> | <u>74,512</u> <u>5</u> | <u>74,85</u> | <u>74,57</u> <u>5</u> | <u>74,9</u> <u>5</u> | <u>77,787</u> <u>5</u> | <u>76,67</u> <u>5</u> | |
| 22 | <u>97,6</u> <u>8</u> | <u>97,68</u> | <u>97,72</u> | <u>97,72</u> | <u>97,72</u> | <u>97,72</u> | <u>97,72</u> | <u>98,02</u> | <u>97,86</u> | |
| 23 | <u>2,87</u> | <u>2,99</u> | <u>3,00</u> | <u>2,91</u> | <u>2,84</u> | <u>2,91</u> | <u>2,84</u> | <u>3,06</u> | <u>2,96</u> | |

Продолжение таблицы

| 1 | Номер опыта | | | | | | | | | |
|---|-------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|--|
| 2 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | 339 | | 359 | | 350 | | 329 | | 351 | |
| 5 | 330 | | 344 | | 339 | | 309 | | 341 | |
| 6 | 317 | | 333 | | 322 | | 300 | | 320 | |
| 7 | 283 | | 308 | | 294 | | 268 | | 302 | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----|---|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 8 | 269 | 284 | 253 | 226 | 257 | 228 | 256 | 244 | 231 |
| 9 | 236 | 254 | 195 | 192 | 221 | 190 | 219 | 180 | 177 |
| 10 | 193 | 214 | 146 | 164 | 162 | 160 | 161 | 126 | 133 |
| 11 | 150 | 170 | 122 | 130 | 127 | 126 | 126 | 96 | 91 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | | | | | | | |
| 13 | 66,1 | 64,1 | 65 | 67,1 | 64,9 | 67,1 | 64,3 | 66,9 | 66,8 |
| 14 | 67 | 65,6 | 66,1 | 69,1 | 65,9 | 68,7 | 65,4 | 67,3 | 67,4 |
| 15 | 68,3 | 66,7 | 67,8 | 70 | 68 | 70,3 | 68,4 | 70 | 68,9 |
| 16 | 71,7 | 69,2 | 70,6 | 73,2 | 69,8 | 73 | 69,8 | 72,5 | 71,9 |
| 17 | 73,1 | 71,6 | 74,7 | 77,4 | 74,3 | 77,2 | 74,4 | 75,6 | 76,9 |
| 18 | 76,4 | 74,6 | 80,5 | 80,8 | 77,9 | 81 | 78,1 | 82 | 82,3 |
| 19 | 80,7 | 78,6 | 85,4 | 83,6 | 83,8 | 84 | 83,9 | 87,4 | 86,7 |
| 20 | 85 | 83 | 87,8 | 87 | 87,3 | 87,4 | 87,4 | 90,4 | 90,9 |
| 21 | <u>73,537</u> <u>5</u> | <u>71,67</u> <u>5</u> | <u>74,737</u> <u>5</u> | <u>76,02</u> <u>5</u> | <u>73,987</u> <u>5</u> | <u>76,087</u> <u>5</u> | <u>73,962</u> <u>5</u> | <u>76,512</u> <u>5</u> | <u>76,47</u> <u>5</u> |
| 22 | <u>97,60</u> | <u>97,44</u> | <u>97,72</u> | <u>97,84</u> | <u>97,68</u> | <u>97,84</u> | <u>97,68</u> | <u>97,89</u> | <u>97,89</u> |
| 23 | <u>3,01</u> | <u>2,97</u> | <u>3,00</u> | <u>3,03</u> | <u>2,95</u> | <u>3,03</u> | <u>2,95</u> | <u>2,99</u> | <u>2,94</u> |

Продолжение таблицы

| 1 | <i>Номер опыта</i> | | |
|----|---|----------------|--------------|
| 2 | 25 | 26 | 27 |
| 3 | | | |
| 4 | 357 | 353 | 352 |
| 5 | 353 | 358 | 344 |
| 6 | 338 | 339 | 324 |
| 7 | 315 | 314 | 289 |
| 8 | 295 | 286 | 259 |
| 9 | 254 | 254 | 194 |
| 10 | 200 | 200 | 148 |
| 11 | 151 | 153 | 122 |
| 12 | Эффективность по каждой фракции, η_i | | |
| 13 | 64,3 | 64,7 | 64,8 |
| 14 | 64,7 | 64,2 | 65,6 |
| 15 | 66,2 | 66,1 | 67,6 |
| 16 | 68,5 | 68,6 | 71,1 |
| 17 | 70,5 | 71,4 | 74,1 |
| 18 | 74,6 | 74,6 | 80,6 |
| 19 | 80 | 80 | 85,2 |
| 20 | 84,9 | 84,7 | 87,8 |
| 21 | <u>71,7125</u> | <u>71,7875</u> | <u>74,6</u> |
| 22 | <u>97,47</u> | <u>97,47</u> | <u>97,72</u> |

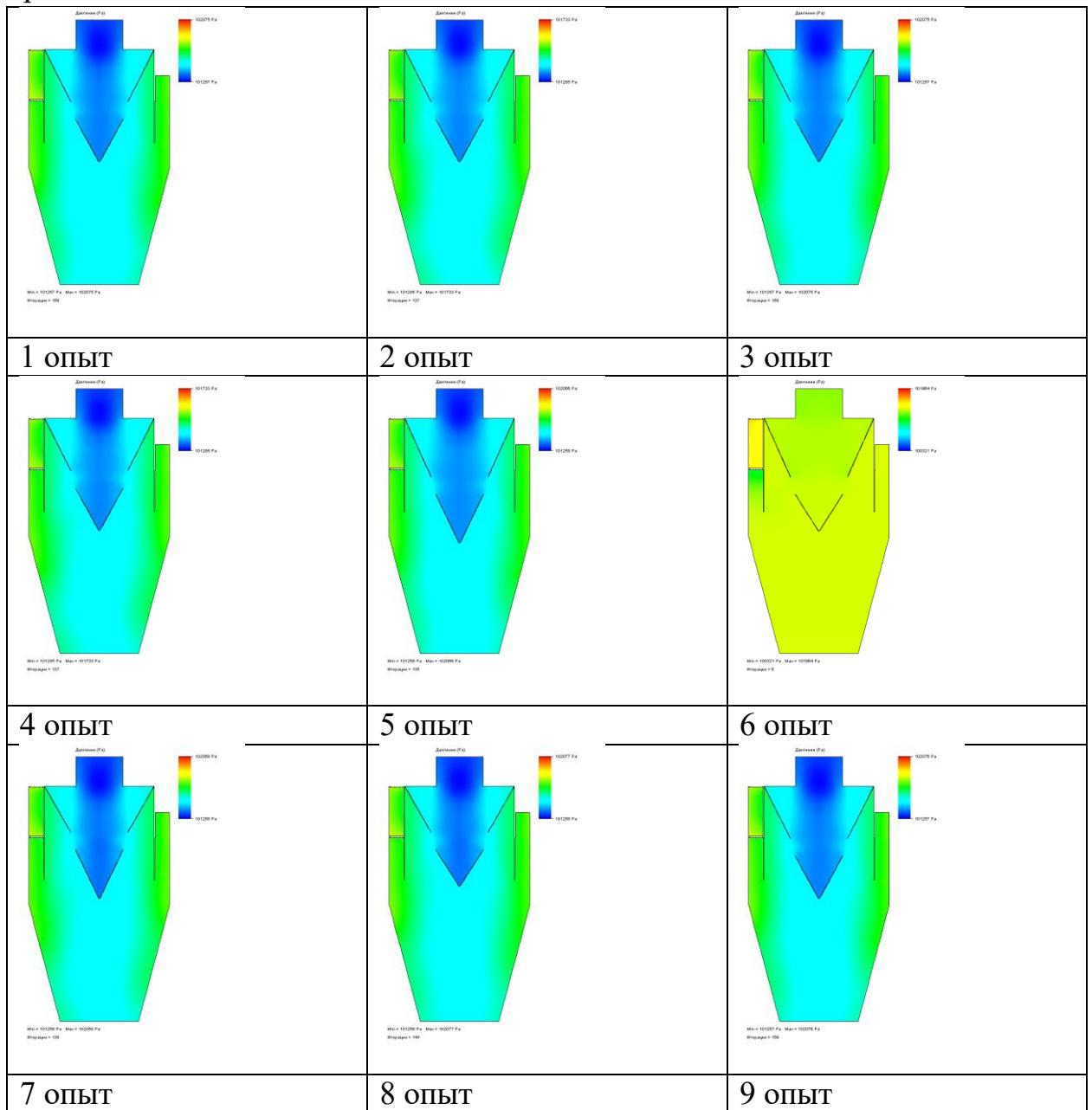
| | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|
| 23 | <u>2,85</u> | <u>2,86</u> | <u>3,00</u> |
|----|-------------|-------------|-------------|

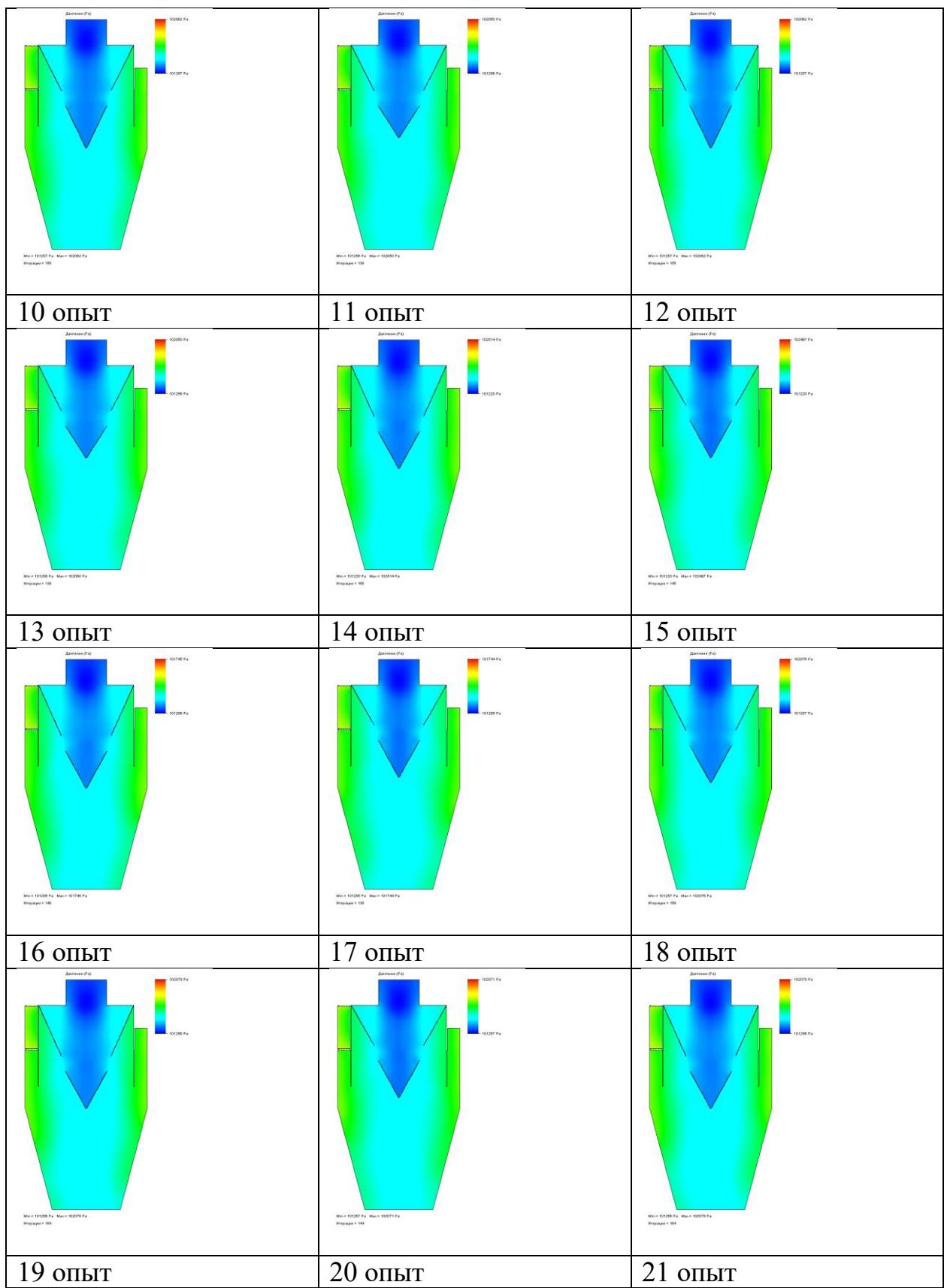
Результаты вывода итогов статистической обработки для Y_2

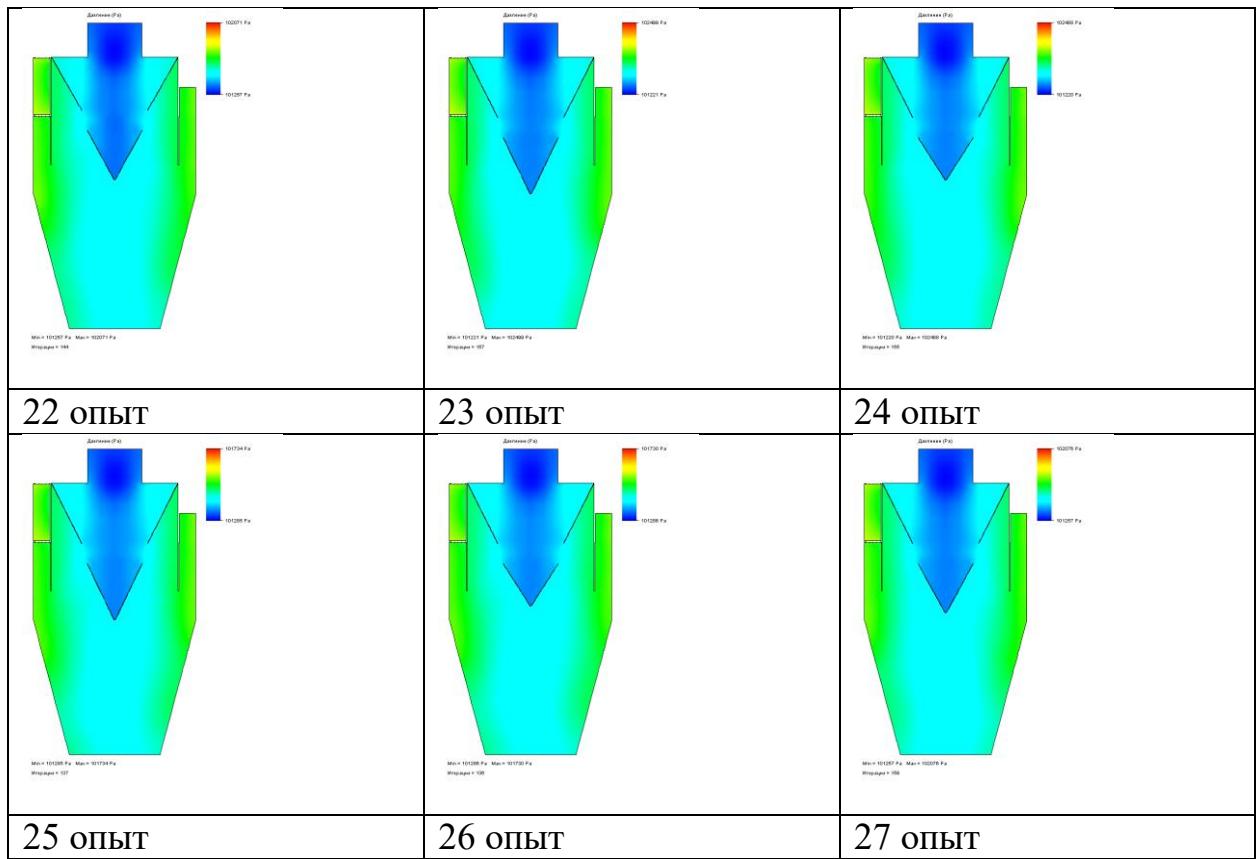
| Множественны й R | 0,906498718 | | | |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| R-квадрат | 0,821739926 | | | |
| Нормированный R-квадрат | 0,613769839 | | | |
| Стандартная ошибка | 0,041248491 | | | |
| Наблюдения | 27 | | | |
| Дисперсионный анализ | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> |
| Регрессия | 14 | 0,094119082 | 0,006722792 | 3,951240963 |
| Остаток | 12 | 0,020417256 | 0,001701438 | |
| Итого | 26 | 0,114536339 | | |
| | | | | |
| | <i>Коэффициенты</i> | <i>Стандартна я ошибка</i> | <i>t-статистика</i> | <i>P-Значение</i> |
| Y-пересечение | 3,00035261 | 0,023814827 | 125,9867458 | $4,19443 \cdot 10^{-20}$ |
| Переменная X ₁ | $-8,19681 \cdot 10^{-18}$ | 0,011907414 | $-6,88379 \cdot 10^{-16}$ | 1 |
| Переменная X ₂ | 0,043725073 | 0,011907414 | 3,672088123 | 0,003194736 |
| Переменная X ₃ | 0,025366341 | 0,011907414 | 2,130298101 | 0,05452591 |
| Переменная X ₄ | 0,008928343 | 0,011907414 | 0,749813817 | 0,467813148 |
| Переменная X ₅ | -0,043875646 | 0,017861121 | -2,456489001 | 0,03023212 |
| Переменная X ₆ | -0,02041594 | 0,017861121 | -1,143038025 | 0,275315056 |
| Переменная X ₇ | 0,02294962 | 0,017861121 | 1,284892507 | 0,223077688 |
| Переменная X ₈ | -0,079977336 | 0,017861121 | -4,477733404 | 0,0007554 |
| Переменная X ₉ | $-1,38778 \cdot 10^{-17}$ | 0,020624246 | $-6,72887 \cdot 10^{-16}$ | 1 |
| Переменная X ₁₀ | $3,59036 \cdot 10^{-18}$ | 0,020624246 | $1,74084 \cdot 10^{-16}$ | 1 |

| | | | | |
|--------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-----------------|
| Переменная X 11 | $-2,35327 \cdot 10^{-18}$ | 0,020624246 | $-1,14102 \cdot 10^{-16}$ | 1 |
| Переменная X 12 | 0,014376207 | 0,020624246 | 0,69705374 | 0,49905104 8 |
| Переменная X 13 | 0,013303375 | 0,020624246 | 0,645035716 | 0,53104310 5 |
| Переменная X 14 | 0,040214545 | 0,020624246 | 1,949867446 | 0,07494506 8 |

Поля распределения давлений по матрице Бокса-Бенкена и номеру проведенного опыта.







ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Полученные данные и проверка значений по критерию Стьюдента, $t_{\text{табл}}=4,3$

| Масса пыли на фильтр-элементе, г | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| № | 1 повторность, n_1 | 2 повторность, n_2 | 3 повторность, n_2 | Среднее значение |
| 1 | 31,58940 | 30,21240 | 26,86680 | 28,5396 |
| 2 | 65,47380 | 63,35220 | 62,40360 | 62,8779 |
| 3 | 35,24100 | 34,95540 | 34,56780 | 34,7616 |
| 4 | 56,78340 | 55,99800 | 54,86580 | 55,4319 |
| 5 | 43,22760 | 43,20720 | 43,19700 | 43,2021 |
| 6 | 27,69300 | 26,32620 | 24,63300 | 25,4796 |
| 7 | 42,89100 | 41,44260 | 39,54540 | 40,4940 |
| 8 | 38,51520 | 35,74080 | 33,72120 | 34,7310 |
| 9 | 56,04900 | 55,92660 | 55,74300 | 55,8348 |
| 10 | 52,75440 | 51,52020 | 49,53120 | 50,5257 |
| 11 | 34,96560 | 34,86360 | 34,76568 | 34,8146 |
| 12 | 45,91020 | 44,84940 | 44,31900 | 44,5842 |
| 13 | 40,15740 | 38,92320 | 36,41400 | 37,6686 |
| 14 | 17,00340 | 16,28940 | 15,16740 | 15,7284 |
| 15 | 38,61720 | 37,14840 | 34,35360 | 35,7510 |
| 16 | 62,04660 | 60,41460 | 57,47700 | 58,9458 |
| 17 | 70,03320 | 67,60560 | 66,35100 | 66,9783 |
| 18 | 58,98660 | 55,92660 | 54,00900 | 54,9678 |
| 19 | 34,26180 | 34,07820 | 33,87420 | 33,9762 |
| 20 | 38,35200 | 36,95460 | 36,11820 | 36,5364 |
| 21 | 33,59880 | 31,82400 | 30,16140 | 30,9927 |
| 22 | 37,29120 | 36,60780 | 35,02680 | 35,8173 |
| 23 | 46,64460 | 46,34880 | 47,05260 | 46,7007 |
| 24 | 22,63380 | 22,42980 | 22,27680 | 22,3533 |
| 25 | 61,89360 | 59,79240 | 60,76140 | 60,2769 |
| 26 | 62,18940 | 62,14860 | 62,27100 | 62,2098 |
| 27 | 58,76220 | 52,02000 | 55,61040 | 53,8152 |

Продолжение таблицы

| № | Cр. n_2n_3 | $S^2(Y_u)_k$ | $t_{\text{расчн1}}$ | Сравн. | Cр. n_1n_3 | $S^2(Y_u)_k$ | $t_{\text{расчн1}}$ | Сравн. |
|---|-----------------|--------------|---------------------|--------|-----------------|--------------|---------------------|--------|
| 1 | 31,59 | 2,36 | 1,28 | <4,3 | 29,23 | 3,33 | 2,94*E-01 | <4,3 |
| 2 | 65,47 | 0,67 | 3,87 | <4,3 | 63,94 | 2,17 | 2,18*E-01 | <4,3 |
| 3 | 35,24 | 0,27 | 1,74 | <4,3 | 34,90 | 0,47 | 4,07*E-01 | <4,3 |
| 4 | 56,78 | 0,8 | 1,68 | <4,3 | 55,82 | 1,35 | 4,17*E-01 | <4,3 |
| 5 | 43,23 | 0,0072 | 3,53 | <4,3 | 43,21 | 0,021 | 2,35*E-01 | <4,3 |
| 6 | 27,69 | 1,19 | 1,84 | <4,3 | 26,16 | 2,16 | 3,91*E-01 | <4,3 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|-------|------|-----------|------|
| 7 | 42,89 | 1,34 | 1,78 | <4,3 | 41,22 | 2,36 | 4*E-01 | <4,3 |
| 8 | 38,52 | 1,42 | 2,64 | <4,3 | 36,12 | 3,38 | 2*E-01 | <4,3 |
| 9 | 56,05 | 0,12 | 1,64 | <4,3 | 55,90 | 0,21 | 4,24*E-01 | <4,3 |
| 10 | 52,75 | 1,40 | 1,58 | <4,3 | 51,14 | 2,27 | 4,36*E-01 | <4,3 |
| 11 | 34,97 | 0,06 | 2,18 | <4,3 | 34,87 | 0,14 | 3,46*E-01 | <4,3 |
| 12 | 45,91 | 0,37 | 3,53 | <4,3 | 45,11 | 1,12 | 2,35*E-01 | <4,3 |
| 13 | 40,16 | 1,77 | 1,40 | <4,3 | 38,29 | 2,64 | 4,73*E-01 | <4,3 |
| 14 | 17,00 | 0,79 | 1,60 | <4,3 | 16,09 | 1,29 | 4,32*E-01 | <4,3 |
| 15 | 38,62 | 1,97 | 1,45 | <4,3 | 36,49 | 3,01 | 4,63*E-01 | <4,3 |
| 16 | 62,05 | 2,07 | 1,49 | <4,3 | 59,76 | 3,23 | 4,54*E-01 | <4,3 |
| 17 | 70,03 | 0,88 | 3,44 | <4,3 | 68,19 | 2,6 | 2,40*E-01 | <4,3 |
| 18 | 58,99 | 1,35 | 2,96 | <4,3 | 56,50 | 3,51 | 2,72*E-01 | <4,3 |
| 19 | 34,26 | 0,14 | 1,97 | <4,3 | 34,07 | 0,27 | 3,72*E-01 | <4,3 |
| 20 | 38,35 | 0,59 | 3,06 | <4,3 | 37,24 | 1,57 | 2,64*E-01 | <4,3 |
| 21 | 33,60 | 1,17 | 2,21 | <4,3 | 31,88 | 2,43 | 3,42*E-01 | <4,3 |
| 22 | 37,29 | 1,11 | 1,31 | <4,3 | 36,16 | 1,6 | 4,93*E-01 | <4,3 |
| 23 | 46,64 | 0,49 | 0,11 | <4,3 | 46,85 | 0,28 | 1,21*E+00 | <4,3 |
| 24 | 22,63 | 0,10 | 2,59 | <4,3 | 22,46 | 0,25 | 3,03*E-01 | <4,3 |
| 25 | 61,89 | 0,68 | 2,35 | <4,3 | 61,33 | 0,8 | 6,05*E-01 | <4,3 |
| 26 | 62,19 | 0,08 | 0,23 | <4,3 | 62,23 | 0,05 | 1,06*E+00 | <4,3 |
| 27 | 58,76 | 2,53 | 1,94 | <4,3 | 57,19 | 2,22 | 8,05*E-01 | <4,3 |

Продолжение таблицы

| № | Cр. n ₂ n ₃ | S ² (Y _u) _k | t _{расч1} | Сравн. |
|----|-----------------------------------|---|--------------------|--------|
| 1 | 30,90 | 0,97 | -4,14 | <4,3 |
| 2 | 64,41 | 1,50 | -1,34 | <4,3 |
| 3 | 35,10 | 0,20 | -2,63 | <4,3 |
| 4 | 56,39 | 0,56 | -2,75 | <4,3 |
| 5 | 43,22 | 0,01 | -1,41 | <4,3 |
| 6 | 27,01 | 0,97 | -2,46 | <4,3 |
| 7 | 42,17 | 1,02 | -2,56 | <4,3 |
| 8 | 37,13 | 1,96 | -1,74 | <4,3 |
| 9 | 55,99 | 0,09 | -2,83 | <4,3 |
| 10 | 52,14 | 0,87 | -2,99 | <4,3 |
| 11 | 34,91 | 0,07 | -2,06 | <4,3 |
| 12 | 45,38 | 0,75 | -1,41 | <4,3 |
| 13 | 39,54 | 0,87 | -3,58 | <4,3 |
| 14 | 16,65 | 0,50 | -2,93 | <4,3 |
| 15 | 37,88 | 1,04 | -3,40 | <4,3 |
| 16 | 61,23 | 1,15 | -3,25 | <4,3 |
| 17 | 68,82 | 1,72 | -1,44 | <4,3 |
| 18 | 57,46 | 2,16 | -1,59 | <4,3 |

| | | | | |
|----|-------|------|-------|------|
| 19 | 34,17 | 0,13 | -2,28 | <4,3 |
| 20 | 37,65 | 0,99 | -1,55 | <4,3 |
| 21 | 32,71 | 1,25 | -2,03 | <4,3 |
| 22 | 36,95 | 0,48 | -3,98 | <4,3 |
| 23 | 46,50 | 0,21 | 2,66 | <4,3 |
| 24 | 22,53 | 0,14 | -1,77 | <4,3 |
| 25 | 60,84 | 1,49 | -0,05 | <4,3 |
| 26 | 62,17 | 0,03 | 3,54 | <4,3 |
| 27 | 55,39 | 4,77 | 0,05 | <4,3 |

Результаты вывода итогов статистической обработки для Y_{cr}

| Множественны й R | 0,981953711 | | | |
|--------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| R-квадрат | 0,964233091 | | | |
| Нормированны й R-квадрат | 0,922505031 | | | |
| Стандартная ошибка | 0,037460385 | | | |
| Наблюдения | 27 | | | |
| Дисперсионный анализ | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> |
| Регрессия | 14 | 0,453969163 | 0,032426369 | 23,10754653 |
| Остаток | 12 | 0,016839366 | 0,00140328 | |
| Итого | 26 | 0,470808528 | | |
| | | | | |
| | Коэффициент ы | Стандартна я ошибка | <i>t</i> - статистика | <i>P</i> -Значение |
| Y-пересечение | 99,45203333 | 0,021627764 | 4598,350311 | $7,53657 \cdot 10^{-39}$ |
| Переменная X 1 | -0,006656667 | 0,010813882 | -0,615566806 | 0,549677473 |
| Переменная X 2 | 0,150452778 | 0,010813882 | 13,91292977 | $9,15802 \cdot 10^{-9}$ |
| Переменная X 3 | 0,035902778 | 0,010813882 | 3,320063831 | 0,00610946 |
| Переменная X 4 | -0,055615556 | 0,010813882 | -5,142977949 | 0,000243801 |
| Переменная X 5 | 0,083382222 | 0,016220823 | 5,140443484 | 0,000244826 |
| Переменная X 6 | 0,005021389 | 0,016220823 | 0,309564378 | 0,762201781 |

| | | | | |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------------------|
| Переменная X 7 | 0,115504722 | 0,016220823 | 7,120768443 | $1,21228 \cdot 10^{-5}$ |
| Переменная X 8 | 0,064540556 | 0,016220823 | 3,978870668 | 0,00183000 |
| Переменная X 9 | 0,032416667 | 0,018730193 | 1,730717202 | 0,10910889 |
| Переменная X 10 | -0,003375 | 0,018730193 | -0,180190351 | 0,86001026 |
| Переменная X 11 | -0,024205 | 0,018730193 | -1,292298505 | 0,22058517 |
| Переменная X 12 | 0,030725 | 0,018730193 | 1,640399569 | 0,12685341 |
| Переменная X 13 | -0,0628 | 0,018730193 | -3,352875279 | 0,00574947 |
| Переменная X 14 | -0,028658333 | 0,018730193 | -1,530060786 | 0,15192668 |

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

на полезную модель

№ 227378

Циклон с эжектором

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)**

Авторы: **Пиленов Евгений Александрович (RU), Блескин Сергей Сергеевич (RU)**

Заявка № 2024106942

Приоритет полезной модели 18 марта 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 18 июля 2024 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 18 марта 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

на полезную модель

№ 233659

Циклон

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)*

Авторы: *Пшенов Евгений Александрович (RU), Блескин Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2025100030

Приоритет полезной модели **07 января 2025 г.**
 Дата государственной регистрации
 в Государственном реестре полезных
 моделей Российской Федерации **29 апреля 2025 г.**
 Срок действия исключительного права
 на полезную модель истекает **07 января 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы
 по интеллектуальной собственности


 Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 220965

Циклон с конической вставкой

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)*

Авторы: *Пиленов Евгений Александрович (RU), Блескин Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023110587

Приоритет полезной модели 25 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 октября 2023 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 25 апреля 2033 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

на полезную модель

№ 208117

Циклон

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный аграрный университет" (RU)*

Авторы: *Пиленов Евгений Александрович (RU), Мезенов Артем Анатольевич (RU), Вертай Михаил Леванович (RU), Диденко Александр Александрович (RU), Христенко Александр Геннадьевич (RU), Блескин Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2021106836

Приоритет полезной модели **15 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **03 декабря 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **15 марта 2031 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ильин





ПРИЛОЖЕНИЕ Е

УТВЕРЖДАЮ
 Директор АО «ЧКАЛОВСКОЕ»
 В.Ю. Спицын
 1 мая 2015 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 Гани Л.В., с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ канд. техн. наук, доцент Пшенов Е.А., ассистент Блескин С.С. с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов исследования по теме: *Обоснование конструктивно-режимных параметров двухступенчатого циклона-разгрузителя линии производства комбикормов*.

Проведены хозяйствственные испытания представленного ФГБОУ ВО Новосибирским ГАУ двухступенчатого циклона-разгрузителя, установленного в линию производства комбикормов вместо штатного циклона БЦР-450, на мини-заводе компании ООО «Агропоставка». В качестве сырья использовались ячмень влажностью 9% и зерносмесь влажностью 10%.

Результаты испытаний:

| | |
|---|----------|
| Пропускная способность, м ³ /час | 710-1190 |
| Удельные выбросы пыли в выходной патрубок, г/кг | 0,93 |
| Эффективность отделения продуктов дробления зерна, % | 99,9 |
| Удельные затраты энергии на измельчение ячменя, кВт·ч/т | 9,35 |

Внедрение двухступенчатого циклона в линию приготовления комбикормов позволило снизить потери до 3 кг с тонны перерабатываемого сырья, при средней производительности 800 кг/ч молотковой пневматической дробилки ДПМ-11, а также уменьшить количество пыли в цеху, что положительно сказалось на пожаробезопасности предприятия, условиях труда рабочего персонала и экологической обстановке в целом.

Представители ФГБОУ ВО Новосибирский НГАУ

Пшеноу Е.А.
Блескин С.С.

Представители АО «ЧКАЛОВСКОЕ»

Спицын В.Ю.
Гани Л.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

канд. техн. наук, доцент

В.Н. Бабин

«10» февраля 2025 г.

АКТ

о внедрении в образовательный процесс ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

результатов исследования

Результаты диссертационного исследования на соискание учёной степени кандидата технических наук Блескина Сергея Сергеевича по теме «Обоснование конструктивно-режимных параметров двухступенчатого циклона-разгрузителя линии производства комбикормов» внедрены в учебный процесс для студентов Инженерного института, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агрономия 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 «Агрономия».

директор Инженерного института
ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ,
д-р техн. наук, доцент

Ю.А. Гуськов