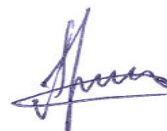


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

На правах рукописи



Полиефтова Анна Павловна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗА В КАМЕРЕ АППАРАТА
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Седяров Олег Иванович

Санкт-Петербург – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА КАМЕРЫ АППАРАТА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ОТ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЫЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Краткая характеристика технологических процессов, сопровождающихся выделением пыли при селективном лазерном сплавлении	10
1.2. Классификация аппаратов очистки газов и анализ их эффективности	13
1.3. Постановка задачи исследования	18
Выводы по главе 1	19
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЦИКЛОНОВ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ РАБОТУ	21
2.1. Исследование влияния особенностей пыления на параметры циклона и режимы его работы с учетом характеристик пыли	21
2.1.1. Обоснование диаметра циклона.....	22
2.1.2. Оценка минимального размера частиц, улавливаемых циклоном	29
2.1.3. Критерии подобия	31
2.2. Математическое моделирование процесса пылеулавливания	35
2.2.1. Описание движения жидкости	38
2.2.2. Механизмы турбулентности.....	40
2.2.3. Численное моделирование потока газ-твёрдое тело	46
Выводы по главе 2	58
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНЕ	60
3.1. Современные подходы и программное обеспечение для моделирования внутренней аэродинамики циклона	60
3.2. CFD моделирование циклона	63
3.2.1 Подготовка модели.....	63
3.2.2. Выбор решателя.....	66
3.3. Обработка результатов моделирования.....	73
Выводы по главе 3	80
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНЕРЦИОННОГО ПЫЛЕУЛАВЛЕНИЯ.....	82
4.1. Разработка и внедрение циклона в аппарат селективного лазерного сплавления	82
4.2. Экспериментальное исследование циклона	86
4.3. Оценка экономической эффективности использования конического циклона для аппарата селективного лазерного сплавления.....	90
Выводы по главе 4	94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методы порошковой печати	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Координаты для построения параметрического циклона ...	115
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты проведения эксперимента	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт об использовании результатов исследования.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении результатов работы в учебный процесс	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования: аддитивные технологии, как часть индустрии 4.0., значительно изменили подход к производству. Данная отрасль отдельно отмечена Распоряжением Правительства РФ от 14.07.2021 № 1913-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».

В процессах селективного лазерного сплавления критически важным условием для поддержания качества изготавливаемой продукции является обеспечение качества среды в рабочей камере принтера. Витаящие в процессе печати частицы, а также образующиеся продукты пиролиза в виде сажи, летучих фракций и т.п., интенсивно поглощают и рассеивают лазерное излучение. Это приводит к нарушению геометрии ванны расплава, сбоям работы оптического оборудования и как следствие, к образованию дефектов на конечном продукте.

Актуальной задачей является решение проблемы поддержания качества среды печати путём установки пылеулавливающего оборудования, что не только улучшит качество изделий, но и минимизирует воздействие принтера на окружающую среду. Один из аппаратов, позволяющих решить поставленную задачу – инерционный пылеуловитель, являющийся классическим образцом гидромеханического аппарата, реализующий базовый гетерогенный гидромеханический процесс разделения фаз.

Учитывая, что современные математические модели демонстрируют высокую степень соответствия реальным гидродинамическим процессам, подбор и исследование циклона для аппарата селективного лазерного сплавления предлагается осуществлять на основе численного моделирования.

Степень разработанности темы исследования.

Данные об исследованиях циклонов, предназначенных для сепарации тонкодисперсных пылей приведены в справочных материалах Перри Дж.Г., Русанова А.А., статьях Сайреда Н., Коузова П.А., Сажина Б.С., и др. Значительный вклад в области численного моделирования гидродинамики воздушных потоков внесли Колмогоров А.Н., Гупта А.К., Страус В., Кутателадзе С.С. Обзор литературы показывает, что количество работ, посвященных инерционным пылеуловителям достаточно велико, однако, большая их часть касается улавливания твердых частиц из продуктов сгорания при атмосферном давлении, а процесс селективного лазерного спекания реализуется при избыточном давлении 50 кПа и более.

Вопросы численного моделирования циклонов в настоящее время активно исследуются такими авторами как Баскаков А.П., Асламова В.С., Логинов В.И., Yoshida H., Schneiderbauer S., Wei J., Zhou X., и др. Вопрос деградации среды в аппаратах селективного лазерного сплавления изучался такими учеными как Chen C., Kolb C.D., и др., однако, в работах не предлагается путей решения проблемы. Таким образом, вопрос методов повышения эффективности работы аппарата инерционной очистки газа от побочных продуктов печати в аппаратах селективного лазерного сплавления в литературе освещен слабо и требует дополнительных исследований.

Объект исследования – аппарат инерционной очистки газа от побочных продуктов печати в аппаратах селективного лазерного сплавления.

Предмет исследования – влияние конструктивных параметров циклона и характеристик газодисперсного потока на показатели эффективности очистки газа в аппаратах селективного лазерного сплавления.

Цель исследования состоит в повышении эффективности циклонной очистки газа в камере аппарата селективного лазерного сплавления на основе

математического моделирования конструктивных параметров циклона с учетом режимов и характеристик пыления.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния исследований в области разработки циклонов для улавливания пыли из газового объема камер аппаратов селективного лазерного сплавления.
2. Обзор современных математических моделей, позволяющих описывать многофазные турбулентные закрученные потоки и взаимодействия газа с твердыми частицами, и твердых частиц между собой.
3. Уточнение модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона для получения данных о фракционной эффективности очистки.
4. Разработка и создание опытно-экспериментальной установки для исследования эффективности работы циклона, проведение экспериментов на указанной установке и сравнение результатов эксперимента с данными расчета.
5. Оценка экономической эффективности внедрения циклонной очистки газа в камере селективного лазерного сплавления.

Научная новизна:

1. Теоретически обоснован и численно верифицирован метод крупных вихрей в сочетании с модифицированной моделью RNG k-ε для расчета фракционной эффективности и гидродинамических параметров циклона, функционирующего внутри аппарата селективного лазерного сплавления.
2. Впервые получены экспериментальные данные об эффективности улавливания циклоном пыли титана диаметром 5-200 мкм в инертной среде камеры аппарата селективного лазерного сплавления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. подтверждена возможность применения конического циклона для аппарата селективного лазерного сплавления;

2. уточнена модель турбулентного движения двухфазной смеси внутри циклона, позволяющая получить данные о фракционной эффективности аппарата;
3. разработаны рекомендации по использованию аппарата в производственных условиях;
4. результаты исследования были использованы при разработке конструкции циклона, установленного в аппарат селективного лазерного сплавления АО «НПО «ЦНИИТМАШ»»;
5. отдельные результаты научных исследований были внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина».

Методология и методы исследования. Для описания процесса улавливания частиц были использованы методы механики сплошных сред и гидрогазодинамики. Применялись дифференциальные уравнения движения твердых частиц и уравнения Навье-Стокса, аналитические и численные методы математического моделирования с применением свободного программного обеспечения. Была применена статистическая обработка данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. математическая модель, характеризующая процесс инерционного пылеулавливания для установок послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления с учетом конструктивных особенностей аппарата и его эксплуатационных характеристик, влияющих на эффективность пылеулавливания;
2. разработанная конструкция циклона для очистки газового состава камеры аппарата селективного лазерного сплавления.

Достоверность и обоснованность результатов работы

В процессе исследования использовалась действующая нормативная база и применялся современный математический аппарат для математического моделирования массообменных процессов.

Соответствие паспорту специальности. Тема «повышение эффективности очистки газа в камере аппарата селективного лазерного сплавления на основе численного моделирования» соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий:

п.2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химикотехнологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов;

п.3. Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах;

п.10. Методы изучения, совершенствования и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, в том числе разработка химико-технологических процессов переработки отходов.

Апробация результатов работы.

Основное содержание диссертации и результаты работы докладывались и обсуждались: на межд. науч.-тех. симпозиуме «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина», на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук», Москва, 29 октября – 01 ноября 2019 года, на межд. науч.-тех. симпозиуме, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 20–21 октября 2021 года; на всероссийской конф. «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020), Москва, 14–16 апреля 2020 года; на междунар. науч.-техн. конф., Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020), Москва, 2020, на междунар. науч.-техн. конф., Дизайн,

технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022), Москва, 2022,

Личный вклад автора заключается в определении целей и задач исследования, постановке и проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса улавливания частиц в циклонном аппарате. При непосредственном участии автора была разработана и смонтирована экспериментальная установка, были сформулированы основные выводы работы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано **9** печатных работах, из которых **2** - в журналах, рекомендованных ВАК, **1** – в журнале, рецензируемом в Scopus.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 142 наименований и приложений, содержит 26 рисунков и 15 таблиц. Общий объем диссертации - 120 страниц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА КАМЕРЫ АППАРАТА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ОТ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЫЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Краткая характеристика технологических процессов, сопровождающихся выделением пыли при селективном лазерном сплавлении

Современная экономика находится в стадии быстрых изменений не без участия в данном процессе активной цифровизации, которую также называют Индустрией 4.0 или Четвертой промышленной революцией. Наряду с робототехникой и интеллектуальными системами, аддитивные технологии [1-7], то есть трехмерная печать, является одной из ключевых технологий индустриального перехода. По данным Research and Markets [8], объем мирового рынка аддитивных технологий, в 2021 году составлял \$14,4 млрд. К 2030-му он может увеличиться в несколько раз, до \$83,6 млрд.

На сегодняшний день существует масса способов 3D печати различными видами материалов, включающих в себя печать металлом. Популярность подобных технологий обусловлена рядом экономических и технологических факторов, включающих в себя малые финансовые затраты и времени на подготовку производства, относительно высокую скорость изготовления изделий, возможность изготавливать изделия с существенными различиями между образцами (кастомизация изделий). Помимо этого, технология 3D печати позволяет изготавливать детали, которые невозможно изготовить с помощью классических технологий за один производственный цикл (закрытые полости и т.п.) [9].

Самыми популярными методами печати металлами являются SLS (селективное лазерное спекание), SHS (выборочное тепловое спекание), SLM (селективное лазерное плавление), DMLS (прямое лазерное спекание), EBM

(электронно-лучевое плавление) методы. Все методы относятся к порошковой печати. Данный способ позволяет сберегать материалы, которые имеют высокую стоимость, путем повторного их применения. Помимо этого, использование приведенных методов не требует использования подпорок (подпорки используются только для нависающих элементов), что упрощает последующую обработку изделий. Подробнее с каждым из методов печати можно ознакомиться в источниках [10]. Сводная таблица по методам печати представлена в приложении А.

Все из представленных методов применяются в различных отраслях промышленности, конечный метод реализации печати выбирается исходя из потребностей предприятия.

Наибольший интерес с точки зрения процесса пылеулавливания представляет SLM-метод. Процесса селективного лазерного сплавления проходит в инертной среде (аргон), при повышенной температуре порядка 548,15 К и давлении 152 кПа. Установлено, что выброс пыли титана размером 5-200 мкм образуется в процессе печати, формируясь из частиц титана, попадающих в газовый объем при прохождении роллера, сплавленных частиц и образующихся в процессе сгорания примесей, входящих в состав порошка титана, при этом концентрация порошка в газе может достигать 0,01 кг/м³. Примеси налипают на готовые изделия, что ухудшает их качество, а также препятствует точной работе печатающей головке принтера.

Выброс полидисперсных металлических частиц с примесями продуктов горения происходит в камере принтера в процессе печати (рис.1). Перед запуском печати камера принтера продувается и заполняется инертным газом. Процесс начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои 20-100 мкм. ПО принтера получает информацию о каждом слое в формате 2D и на основе этих данных запускает цикл печати.

Цикл состоит из:

- 1) Нанесения с помощью роллера слоя (толщиной 20-100 мкм) порошка на производственный стол.

- 2) Сканирования области с последующим плавлением лучом лазера сечения слоя изделия.
- 3) Опускания платформы вглубь колодца на величину, соответствующую толщине построенного слоя.

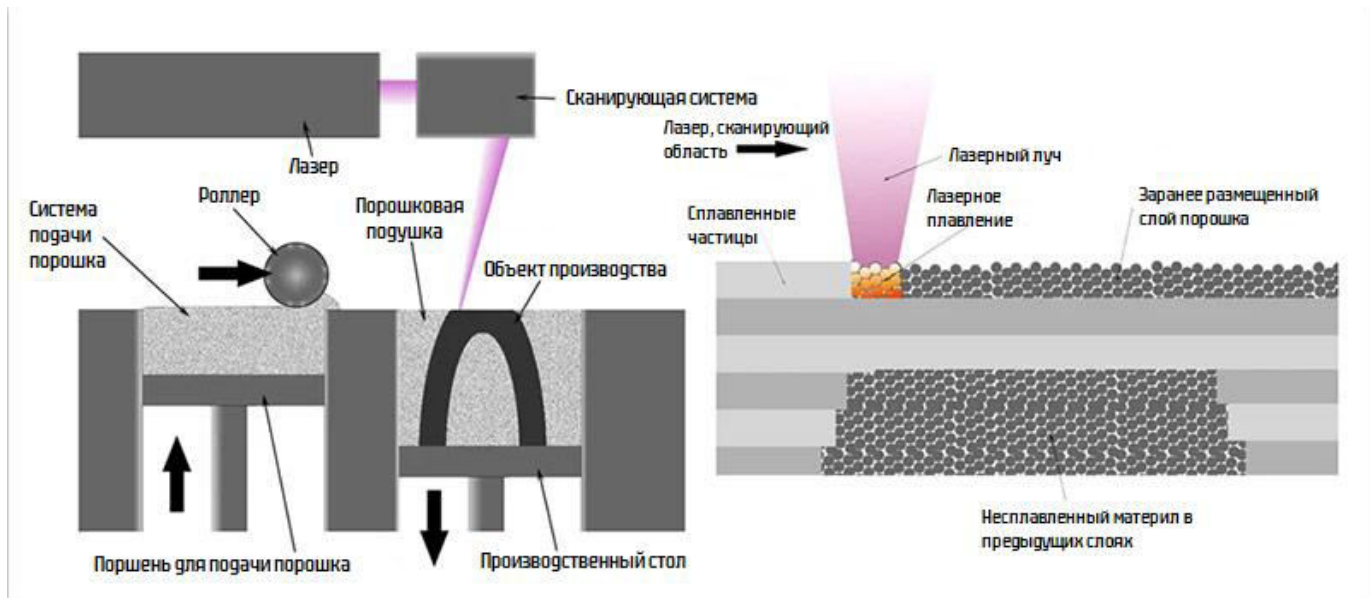


Рисунок 1. Послойный синтез методом селективного лазерного плавления

Данный цикл повторяется до полного построения детали. При этом, в процессе прохождения роллера в инертную среду попадают частицы титана. Помимо этого, в газе оказываются сплавленные частицы, а также продукты сгорания примесей (находящихся в составе металлических порошков), попадающие в инертную среду. Данное явление ухудшает качество изделия (из-за налипания витающих частиц на поверхность изделия), а также мешает работе печатающего устройства (могут возникать проблемы с позиционированием печатающей головки), поэтому все попадающие в среду частицы требуют удаления. Для этого все современные принтеры оснащаются очистным рециркуляционным оборудованием, способным поддерживать качество инертной среды. Вопрос деградации среды в аппаратах селективного лазерного сплавления изучался такими учеными как Chen [87], Kolb и др.

При выборе пылегазоочистного оборудования необходимо учитывать состав рабочей среды, температуру печати, ограниченный конструкционный размер, наличие замкнутого цикла (очищенный газ должен поступать обратно в камеру принтера), стоимость обслуживания аппарата.

1.2. Классификация аппаратов очистки газов и анализ их эффективности

После определения условий пылеулавливания встаёт вопрос о подборе пылегазоочистного оборудования для очистки запыленного газа.

Согласно ГОСТ 25199-82 [11] пылегазоочистное оборудование может быть разделено на две категории: аппараты сухой и мокрой очистки (таблица 1). В связи с наличием рециркуляции в рассматриваемой системе, применение мокрых способов очистки не рассматривается. Сухие пылеуловители могут классифицироваться различными способами, применим классификацию на типы в зависимости от используемой силы:

Таблица 1. Классификация сухих пылеуловителей согласно ГОСТ 25199-82

Сухие пылеуловители				
Механические				Электрические
Гравитационные	Инерционные	Центробежные	Фильтрационные	
Пыleosадочные камеры	Жалюзийные пылеотделители	Пылеуловители ротационного действия	Волокнистые фильтры	Однозонные сухие
			Тканевые фильтры	Трубчатые
	Камерные	Циклоны	Зернистые фильтры	Пластинчатые
			Воздушные фильтры	

Для подбора конкретного аппарата необходимо знать характеристики улавливаемых частиц пыли, особенности техпроцесса, ограничивающие факторы, исходя из которых выбирается конкретный тип узла уловителя, захваты, трубопроводы, подбирается мощность вентилятора.

Среди всех приведенных в таблице 1 типов аппаратов наибольшее распространение имеют циклонные установки [12]. Их популярность обусловлена

простотой изготовления и обслуживания, высокой степенью очистки запыленного газа, низкой стоимостью изготовления и возможностью компактного аппаратного исполнения. Циклоны способны работать при повышенных температурах и избыточном давлении без существенных изменений в конструкции аппарата.

Подобным решением сегодня пользуются многие производители аппаратов селективного лазерного сплавления в мире [13-15]. Однако, существующие на рынке аппараты подходят под действующие линейки принтеров определенных производителей и не подходят для встраивания в проектируемые принтеры. Помимо циклонных аппаратов конструкция, как правило, дополняется фильтрами для улавливания тонкодисперсных частиц.

Существует масса конструкций циклонов, подробнее ознакомиться с ними можно в источниках [12]. В данное время тема хорошо раскрыта в литературных источниках. Проблематикой эффективности пылегазоочистки с применением циклонов, занимались такие ученые, как Асламова В.С., Баскаков А.П., Вальдберг А.Ю., Гудим Л.И., Кочетов Л.М., Коузов П.А., Мисюля Д.И., Мухленов И.Н., Пирумов А.И., Сажин Б.С., Старк С.Б., Стефаненко В.Т., Тарат А.Я., Теверовский Е.П., Ужов В.Н., Шиляев М.И., Швыдкий В.С., среди зарубежных исследователей можно особенно выделить работы Шеферда и Лаппле, Фирста, Александра, Калверта, Перри, Инглунда, Страуса, Сайреда и многих других ученых.

Первые попытки исследования циклонных установок были предприняты в 1930-х – 1950-х годах, тогда и была обнаружена чрезвычайная сложность исследований внутреннего течения циклона, что положило начало огромному количеству экспериментальных и теоретических работ по данной теме. Сегодня же циклоны используются почти во всех отраслях промышленности, обеспечивая процессы пылеудаления, сушки, а также множество других процессов производства.

Основным интересом исследователей является определение эффективности сепарации, поэтому расчет циклона, как правило, подразумевает под собой подбор уже существующей модели циклона и адаптация её диаметра под индивидуальную задачу. Фактором, отягчающим процесс исследования циклона,

является недостаточная изученность аэродинамических процессов, именно поэтому теоретические методы расчета не дают полного ответа на вопросы, связанные с проектированием циклонов, а также не существует формул, позволяющих точно определить наилучшие параметры для циклона, поэтому существует множество конструкций одиночных и групповых циклонов. Все они разработаны на основе сочетания имеющейся теоретической базы и экспериментальных данных. Подробнее с многообразием отечественных и зарубежных циклонных установок можно ознакомиться в статье [12].

В России и СНГ существует стандартизированный ряд внутренних диаметров циклона D : 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм. При этом размеры циклона вычисляются исходя из внутреннего диаметра, конечный результат будет зависеть от выбранной модели циклона. Согласно ряду источников [12, 17, 18], наибольшее распространение получили циклоны разработанные НИИОгазом (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24, СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М, СЦН-40, СЦН-60) [19]. Наряду с ними успешно используются циклоны ВЦНИИОТ, СИОТ, ОЭКДМ, ЦНИИХпром, батарейные циклоны ЦКТИ, БЦУ, БЦУ-М и др.

Циклоны СДК-ЦН-33 (рис.2), СДК-ЦН-34, СДК-ЦН-40 имеют удлиненную коническую часть, спиральный входной патрубок в виде улитки и малое отношения диаметра выходной трубы к диаметру корпуса цилиндра, равное 0,33, 0,34 и 0,40 соответственно. Перечисленные модели популярны в промышленности и используются при очистке газа от мелкой пыли (медианным диаметром $5\div 6$ мкм), показывая высокую эффективность очистки. В литературе содержатся данные о применении данных циклонов в условиях повышенного давления и высокой температуры поступающего на очистку газа [18], следовательно, данный тип циклона предположительно может быть полезен для очистки газового объема камеры аппарата селективного лазерного сплавления в процессе печати, так как печать происходит при повышенной температуре, а пыль титана преимущественно тонкодисперсная.

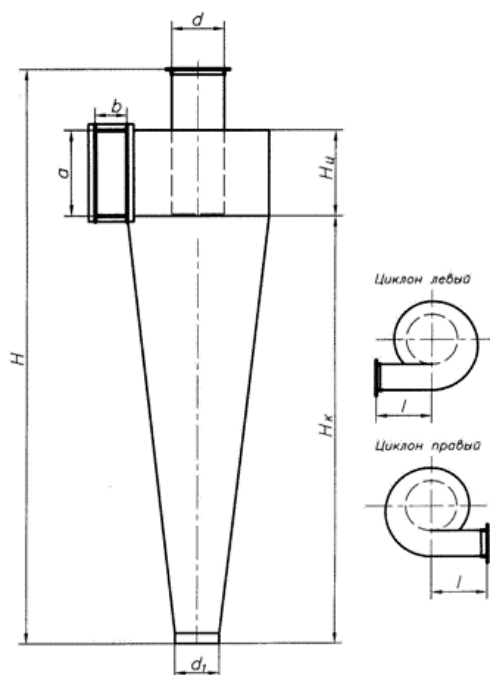


Рисунок 2. Циклон серии СДК-ЦН, СДК-ЦН-33.

В настоящее время существует множество методов расчёта эффективности циклонных сепараторов, среди которых, помимо классических методов Липпла, Барта, Лейта и Лихта, следует отметить метод определения критического диаметра [20], методы расчета, основанные на экспериментальных данных [20-28], широкое распространение получили методы расчета полной и фракционной эффективности циклонных сепарационных устройств, основанные на учете не только силовых, но и случайных факторов, такой как метод расчета фракционной эффективности, основанный на уравнении Эйнштейна-Фоккера [29,30]. В отечественной литературе, инженерный подход проектированию циклонов был детально разработан и нормативно закреплен в трудах ведущих специалистов института НИИОГАЗ (включая фундаментальные научно-практические работы Г. М.-А. Алиева, В. Н. Ужова и др.) [22, 29, 30].

В работах [31-34] показана связь коэффициента очистки с определяющими числами подобия Стокса, Фруда и Эйлера.

Экспериментальные исследования закрученных течений чрезвычайно осложняются необходимостью введения в поток пневмометрических и термоаномостатических датчиков, которые существенно искажают осредненную

и пульсационную структуры потока. Доплеровская анемометрия и метод PIV (Particle Image Velocimetry) также плохо подходят для закрученных потоков. Данные по экспериментальным исследования закрученных потоков можно найти в источниках [21, 28, 35, 36, 39-46], однако их применение относительно других размеров и геометрии циклонов с использованием метода анализа размерностей и теории подобия затруднительны.

На сегодняшний день в зарубежной и отечественной литературе накоплен колоссальный опыт проектирования циклонов. Сформирован широкий спектр инженерных методик и существуют разнообразные подходы к численному моделированию процесса инерционного пылеулавливания. Однако подавляющее большинство фундаментальных и прикладных работ ориентировано на стандартные условия. Помимо этого, несмотря на то, что существуют работы, посвященные влиянию на процесс сепарации повышенных температур, специфики инертных сред и дисперсного состава твёрдой фазы, как правило, данные вопросы изучались изолированно, а литературе практически отсутствуют решения, реализующие комплексный учет всей совокупности указанных факторов, которые важны при реализации аддитивных технологий.

В сложившейся ситуации, обращение к численному методу исследования, по мнению автора, следует считать наиболее рациональным, так как он не только позволяет учитывать комплекс проблем, которые ставит реализация аддитивных технологий, но и упрощает дальнейшее использование результатов исследования для решения аналогичных задач. Появляется возможность масштабирования (например, процесс печати в 3D принтерах подразумевает разный расход газа), облегчается подбор оборудования для поддержания качества среды (например, в системе может быть изменен побудитель потока (компрессор), либо фильтры, которыми дополняется аппарат селективного лазерного спекания).

Подробнее о численном исследовании инерционных сепараторов будет изложено во 2 и 3 главе настоящего диссертационного исследования.

1.3. Постановка задачи исследования

Процесс обеспыливания газового объема камеры аппарата селективного лазерного сплавления – важная задача, призванная обеспечить надлежащее качество изделий аддитивного производства, а также способствовать сохранению ресурсов (металлов), снижая негативное воздействие производства на атмосферу. Для подбора аппарата очистки газа потребуется провести обзор современного состояния исследований в области разработки циклонов для очистки газового объема камер аппаратов селективного лазерного сплавления.

В результате проведения обзора литературных источников в качестве пылеулавливающего аппарата был выбран циклон серии СДК-ЦН спроектированный НИИОГАЗ. Выбор циклона основывался на данных, показывающих его эффективность при улавливании тонкодисперсных пылей, имеющих высокую температуру (пыль ТЭС). Однако, из-за отсутствия общей методики проектирования циклонов, выдвинутая гипотеза о применимости данных циклонов требует проверки.

Широко известна [17,18,20-25] зависимость эффективности пылеулавливания от геометрии циклона, поэтому в работе предлагается использовать имеющиеся теоретические данные для повышения эффективности пылеулавливания частиц титана в аппаратах селективного лазерного спекания. А для учета большего числа факторов в работе предлагается использовать математическое моделирование. Для этого сформулирована задача проведения обзора современных математических моделей, позволяющих описывать сложные многофазные турбулентные закрученные потоки и моделей взаимодействия газа с твердыми частицами, и твердых частиц между собой.

Не смотря на многообразие существующих моделей, в данной задаче особое внимание стоит уделить дисперсному составу частиц, который может несущественно разниться от печати к печати, однако остается в пределах известных (5-200 мкм) значений. Математическая модель должна подразумевать возможность изменения дисперсного состава, быть сбалансированной

относительно требований к вычислительным мощностям, не теряя в точности оценки эффективности пылеулавливания. Для этого требуется уточнение модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона для получения данных о фракционной эффективности очистки при работе циклона;

Помимо этого, задачей является разработка опытно-экспериментальной установки для исследования эффективности работы циклона и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, для последующего внедрения циклона в аппарат селективного лазерного сплавления.

В заключении автором исследования предлагается провести оценку экономической эффективности внедрения циклонного аппарата в аппарат селективного лазерного сплавления.

Выводы по главе 1

Первая глава исследования посвящена литературному обзору имеющихся на момент исследования источников, посвященных раскрываемой в диссертационном исследовании теме. Приведено краткое описание технологического процесса селективного лазерного сплавления. Определено, что выброс полидисперсных металлических частиц с примесями продуктов горения появляется в камере установки послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления в процессе печати, при движения печатающей головки и нанесения слоя сплавляемого материала (металла). При этом необходимо учитывать, что рабочая температура процесса печати составляет порядка 275 °С, а также в камере присутствует избыточное давление (151,988 кПа). Дополнительным условием является необходимость возвращения очищенного газа в камеру принтера.

Подняты вопросы классификации и оценки эффективности аппаратов пылеулавливания. Проведен обзор отечественных и зарубежных работ в области оценки эффективности циклонных сепараторов. Приведены критерии подбора оборудования. Анализ данных показал, что наиболее рациональным решением является выбор инерционного пылеуловителя с использованием центробежной силы. По результатам проведенного обзора автором подобраны циклоны

СДК-ЦН-33, СДК-ЦН-34, СДК-ЦН-40 ВНИИОгаз ввиду их показанной высокой эффективности для очистки мелкодисперсионной пыли и простоты конструкции, а также соответствие данных циклонов эксплуатационным требованиям.

В заключающей части главы проведена постановка задач исследования.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЦИКЛОНОВ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ РАБОТУ

Исходя из данных, представленных в Главе I диссертации, в качестве аппарата очистки запыленного газа, был выбран конический циклон.

Подбор циклона будет проводиться для обеспечения процесса обеспыливания камеры принтера при условиях, указанных в таблице 2.

Таблица 2. Параметры газа и твердой фазы

№п/п	Параметр	Значение
1	Состав газа	Аргон (Ar)
2	Температура газа, °К	548,15
3	Давление газа в камере, кПа	151,988
4	Расход газа, м ³ /с	0,022, 0,044
5	Максимальная концентрация частиц порошка в газе, кг/м ³	0,01
6	Дисперсный состав порошка, мкм	5-100
7	Состав порошка	сплавы Ti
8	Плотность порошка, кг/м ³	4500
9	Масса частицы, кг	$2,38 \cdot 10^{-12}$

2.1. Исследование влияния особенностей пыления на параметры циклона и режимы его работы с учетом характеристик пыли

В настоящее время существуют десятки вариаций циклонов, используемых в промышленности по всему миру. Они отличаются друг от друга рядом конструктивных особенностей, таких как форма, соотношение размеров элементов и т.д. Однако, все они схожи по принципу своей работы: в теле устройства частицы, попадающие в циклон через воздухопровод, осаждаются под действием центробежной силы, силы тяжести и инерции. Поток частиц, переносимый газом, подвергается закручиванию (как правило, с помощью использования тангенциального входа в круглую камеру), при этом возникающие инерционные силы стремятся выбросить частицы из потока.

Подобные аппараты приобрели популярность благодаря простоте конструкции, надежности эксплуатации и малым затратам как сборки, так и

эксплуатации. Они способны работать при высоких температурах, повышенном давлении обеспечивая от 80 до 95% фракционной эффективности обеспыливания от частиц размером более 10 мкм.

Несмотря на большое количество материалов, посвященному циклонам, после проведения литературного обзора можно заключить, что в настоящее время отсутствует обобщенная методика проектирования циклонов.

2.1.1. Обоснование диаметра циклона

На территории России и стран СНГ практикуют расчеты методом последовательных приближений [22, 37, 38, 47-51].

При проведении расчета задаются типом циклона (расчет в данной работе производится для циклона СДК-ЦН-34) и вычисляют диаметр циклона [52]:

Вычисляют требуемую эффективность очистки:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \quad (2.1)$$

$C_{\text{вх}}$ - запыленность газа на входе, кг/м³

$C_{\text{вых}}$ - запыленность газа на выходе, кг/м³

Затем вычисляют необходимую площадь циклона (м²):

$$F = \frac{Q_p}{v_{\text{опт}}} \quad (2.2)$$

где: Q_p – расход газа, м³/с, $v_{\text{опт}}$ – оптимальная скорость движения среды.

И определяется диаметр циклона, м:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} \quad (2.3)$$

где: N – количество циклонов.

Вычисляют действительную скорость газа в циклоне:

$$v = \frac{Q_p}{0,785ND^2} \quad (2.4)$$

По таблицам [52] принимают коэффициент гидравлического сопротивления для данного циклона:

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3 \quad (2.5)$$

Где ζ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления циклона диаметром 500 мм, а K – поправочные коэффициенты на диаметр, запыленность и компоновку циклонов при их групповом размещении.

Определяют потери давления в циклоне, Па:

$$\Delta P = \zeta_0 \frac{\rho_g v^2}{2} \quad (2.6)$$

где ρ_g – плотность газа, кг/м³

Если потери приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

Приняв по справочным данным значения d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}^T$ для табличных условий, определяют d_{50} при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) по уравнению:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{\eta T}}{\rho_{\eta}} \frac{\mu}{\mu_{\eta}} \frac{v_T}{v}} \quad (2.7)$$

где: μ_g – динамическая вязкость газа, Па·с

ρ_{η} – плотность частиц, кг/м³

Определяют параметр x по формуле:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\eta}} \quad (2.8)$$

По графику определяют значение функции $\Phi(x)$ и находят эффективность циклона η

$$\eta = 0,5(1 + \Phi(x)) \quad (2.9)$$

Полученное значение сравнивают с требуемым. Если оно меньше, чем требуемое, то принимают другой циклон, и рассчитывают его аналогичным образом. Замена одного типа циклона на другой, при условии сохранения

сопротивления газового тракта постоянным, производится за счет изменения диаметра циклона.

Диаметр нового циклона определяется из следующей формулы:

$$D^2 = D_1^4 \sqrt{\frac{\zeta_{02}}{\zeta_{01}}} \quad (2.10)$$

После установления нового диаметра, необходимо пересчитать согласно [18], соотношения размеров (в долях диаметра) для циклона. Для этого воспользуемся таблицей 3:

Таблица 3. Соотношение размеров в циклоне СДК-ЦН-34

Тип циклона СДК-ЦН-34		
№ п/п	Наименование	Соотношение
1	Внутренний диаметр цилиндрической части, D	До 3500 мм
2	Высота цилиндрической части, H _ц	0,535
3	Высота конической части, H _к	3,0
4	Внутренний диаметр выхлопной трубы, d	0,334
5	Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия, d ₁	0,334
6	Ширина входного патрубка, b	0,264
7	Высота внешней части выхлопной трубы, h _в	0,2-0,3
8	Высота установки фланца, h _{фп}	0,1
9	Высота входного патрубка, a	0,535
10	Длина входного патрубка, l	0,6
11	Высота заглубления выхлопной трубы, h _т	0,535
12	Текущий радиус улитки, ρ	D/2+bφ/2π

Циклон (рис. 3) выбран по данным источника [19] и признан одним из самых эффективных для улавливание мелкофракционной пыли (менее 5 мкм). Данная модель имеет удлиненную коническую часть и спиральный входной патрубок.

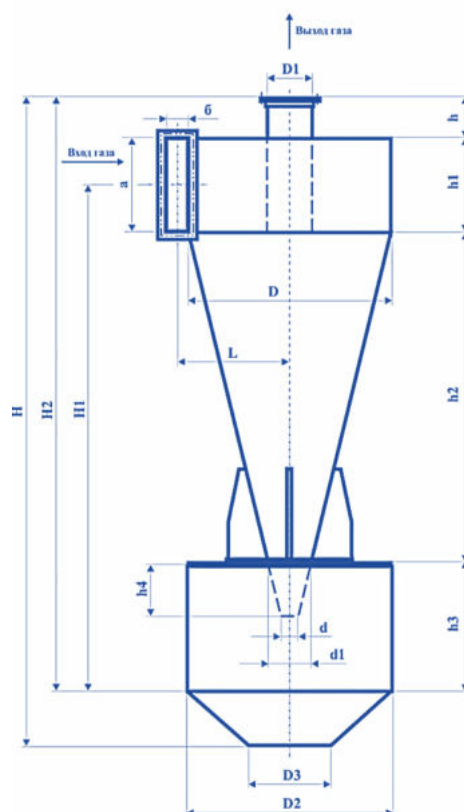


Рисунок 3. Конический циклон серии СДК-ЦН

Циклон обладает высокой эффективностью (рис. 4) и был разработан для очистки запыленных газов от сажи.

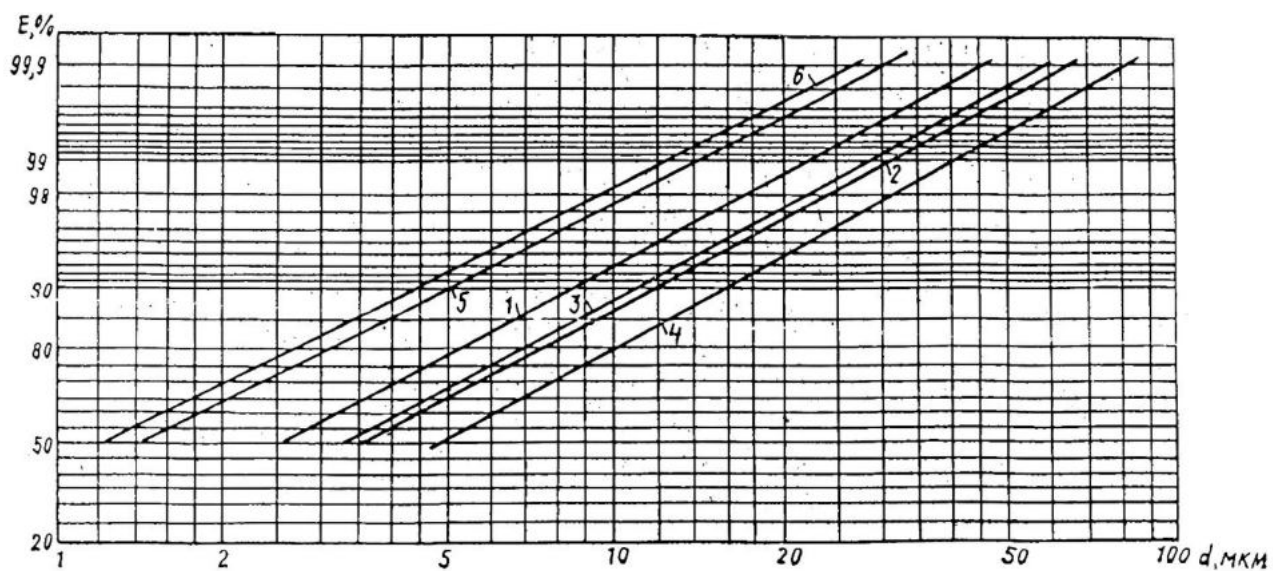


Рисунок 4. Фракционная эффективность циклонов ЦН НИИОГаз:
1 - ЦН-11; 1 - ЦН-15; 3 - ЦН-15у; 4 - ЦН-24; 5 - СДК-ЦН-33; 6 - СК-ЦН-34 [19].

Расчет проводился в соответствии с данными, указанными в таблице 3, главы 2 настоящей диссертации, полученные сведения для удобства чтения сведены в таблицу 4, представленную ниже.

Таблица 4. Полученные параметры адаптированного циклона СДК-ЦН (рис. 5), предназначенного для очистки запыленного аргона от частиц титана в процессе печати изделий на аппарате селективного лазерного сплавления

№ п/п	Параметр	Размер (мм)
1	D	125
2	D1	фланец KF50
3	D2	138
4	D3	50
5	d	26
6	d1	34
7	L	76
8	H	539
9	H1	398
10	H2	461
11	h	31
12	h1	65
13	h2	264
14	h3	101
15	h4	19
16	a	65
17	b	27

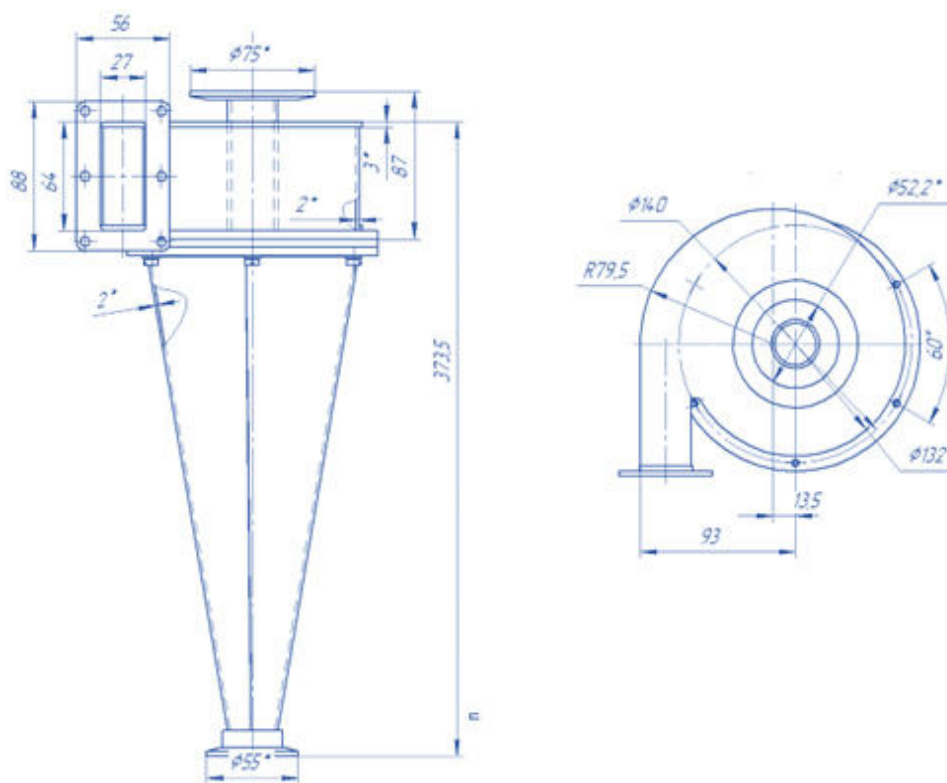


Рисунок 5. Конструкция рассчитанного циклона с указанием размеров

Расчетная эффективность циклона (η) представлена на рисунке 6.

Расчет проводился согласно [53]:

Вначале рассчитывается средний диаметр улавливаемых частиц:

$$d_{pc} = [9\mu V_c / 2\pi n_t v_i (\rho_p - \rho)]^{0.5} \quad (2.11)$$

где: μ – динамическая вязкость газа;

V_c – размер выходного отверстия;

n_t – количество эффективных оборотов;

v_i – скорость газа;

ρ_p – плотность частиц,

ρ – плотность газа.

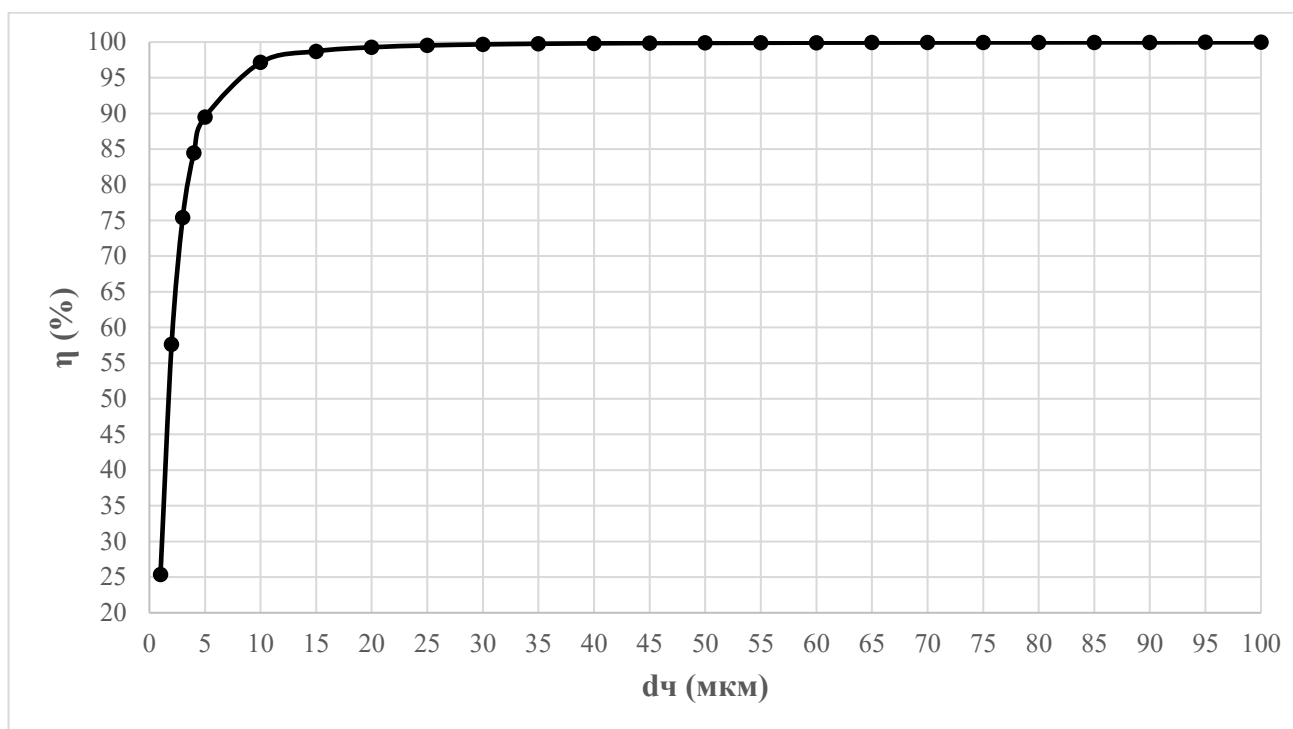
Затем рассчитывается отношение диаметра частиц к среднему диаметру d_p/d_{pc}

Эффективность определяется с помощью кривой Лаппла, либо согласно уравнению:

$$E = 1.0 / [1.0 + (d_{pc}/d_p)^2] \quad (2.12)$$

Таблица 5. Зависимость эффективности пылеулавливания от размера частиц

d_ч	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40
η (%)	25,38	57,64	75,38	84,48	89,48	97,14	98,71	99,27	99,53	99,67	99,76	99,82
d_ч	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
η (%)	99,86	99,88	99,9	99,92	99,93	99,94	99,95	99,95	99,96	99,96	99,97	99,97

Рисунок 6. График зависимости эффективности пылеулавливания η (%) от диаметра частиц $d_{ч}$ (μm)

Среднее значение эффективности улавливания частиц размером от 5 до 100 мкм $\eta_{\text{ср}} = 99,138$ %.

2.1.2. Оценка минимального размера частиц, улавливаемых циклоном

Большая часть существующих моделей базируется на определении критического диаметра – минимального характерного размера частиц, улавливаемых циклоном с вероятностью 100%. Определение минимального размера улавливаемых частиц является сложной задачей, решение которой должно учитывать множество факторов, именно поэтому для расчетов потребуется ряд допущений:

- 1) частицы пыли принимаются сферической формы;
- 2) частицы входящие в циклон равномерно распределены по сечению;
- 3) частицы, достигающие стенки циклона – осаждаются;
- 4) не учитывается коагуляция частиц в циклоне.

Теоретическое обоснование процесса очистки пока несовершенно и не удовлетворяет современным требованиям, поэтому при разработке конструкций во многом приходится ориентироваться на полученные экспериментальные данные.

Центробежная сила, действующая на частицу, может быть определена из выражения:

$$F_{ц} = \frac{mv_T^2}{R} \quad (2.14)$$

А сила сопротивления среды по формуле:

$$F = 3\pi v_p d \mu \quad (2.15)$$

где v_T – тангенциальная скорость пылевой частицы, принимаемая равной скорости газового потока при входе в циклон, м/с;

v_p – скорость движения частицы в радиальном направлении, м/с;

R – расстояние от центра вращения газового потока (оси циклона) до частицы, м;

m – масса шаровой частицы, равная $m = V\rho = \frac{\pi d^3}{6}\rho$, кг;

d – диаметр частицы, м;

ρ – плотность части, кг/м³;

μ – вязкость газа, Н·с/м².

После входа потока запыленного газа в циклон, силы $F_{\text{ц}}$ и F уравниваются.

$$\frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_p d \mu \quad (2.16)$$

При этом частица движется в радиальном направлении с постоянной скоростью, которую можно определить из написанного выше равенства:

$$v_p = \frac{mv_T}{3R\pi d \mu} = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18R\mu} \quad (2.17)$$

Из всех, движущихся в потоке, частиц наибольший путь пройдет частица, находившаяся при входе в циклон вблизи выхлопной трубы. Ее путь будет равен $R_2 - R_1$, где R_1 – радиус выхлопной трубы циклона, м; R_2 – радиус цилиндрической части циклона, м.

Время, затрачиваемое частицей на прохождение этого пути:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p} \quad (2.18)$$

В формуле, выражающей v_p , величина R – переменная. Она изменяется в пределах $R_1 < R < R_2$, и ее среднее значение можно принять как $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$.

Подставляем это значение R в уравнение (2.18):

$$v_p = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18 \frac{R_1 + R_2}{2} \mu} \quad (2.19)$$

Или:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p} = \frac{18(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{2v_T^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_T^2 d^2 \rho} \quad (2.20)$$

Из этой формулы можно найти минимальный размер частиц, улавливаемых данным циклоном. Согласно допущению, улавливаются все частицы, осевшие на стенках циклона, то есть успевшие пройти путь $R_2 - R_1$ за время прохождения циклона газовым потоком, то есть за время нахождения частицы в циклоне.

$$d_{min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{\rho v_T^2 \tau}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi\rho v_T R n}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2 - R_1)}{\pi\rho v_T n}} \quad (2.21)$$

где n – число оборотов, которые совершает газовый поток в циклоне. Обычно принимают $n = 2$.

Расчет проводился для данных, приведенных в таблице 2 настоящего исследования, тангенциальная скорость пылевой частицы принимается равной скорости газового потока при входе в циклон. Результат расчета отражен в таблице 6, приведенной ниже.

Таблица 6. Результат теоретического расчета критического размера частиц, улавливаемых циклоном

	Тангенциальная скорость пылевой частицы (м/с)	
	12,5	25
$d_{min}, (м)$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$

2.1.3. Критерии подобия

В работах [54, 55, 58] исследователями показана связь параметров моделирования с определяющими числами подобия: Маха, Рейнольдса, Фруда, Стокса и Эйлера.

Число Маха рассчитывается по формуле:

$$M = v/a \quad (2.22)$$

где: v – скорость потока в точке;

a – скорость распространения звука в среде.

$$a = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_{\text{аргона}}}}$$

γ – показатель адиабаты, M – молярная масса. Число Маха определяет меру влияния сжимаемости газа на параметры потока. Поток газа считается **несжимаемым** при числе Маха ($M \leq 0,3$) газ можно считать несжимаемым.

$$M = 0,059$$

Число Рейнольдса представляется в общем виде:

$$Re = \frac{\rho v D_{\Gamma}}{\eta} = \frac{v D_{\Gamma}}{\nu} = \frac{Q D_{\Gamma}}{\nu A} = \frac{V d}{\nu} \quad (2.23)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³;

v – характерная скорость, м/с;

D_{Γ} – гидравлический диаметр, м;

η – динамическая вязкость среды, Па·с или кг/(м·с);

ν – кинематическая вязкость среды ($\nu = \eta/\rho$), м²/с;

Q – объёмный расход потока, м³/с;

A – площадь сечения канала, например, трубы, м².

V – характерная скорость, м/с;

d – внутренний диаметр трубы, м.

Значения критических чисел Рейнольдса:

для течения в круглой трубе $Re_{кр} \approx 2300$;

для внешнего обтекания $Re_{кр} > 1,5 \cdot 10^6$;

для компрессора ГТД $Re_{кр} > 0,2 \cdot 10^5$.

Число Рейнольдса – безразмерная величина, характеризующая отношения инерционных сил к силам вязкого трения в вязких жидкостях и газах. Оно играет огромное значение в характеристике движения (при достижении критического значения числа Рейнольдса движение жидкости меняется с ламинарного на переходное, а с переходного на турбулентное). Из уравнения 2.23 можно заключить, что при достижении высоких чисел Рейнольдса силы вязкости снижаются. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления сферы от числа Рейнольдса показана на рисунке 7.

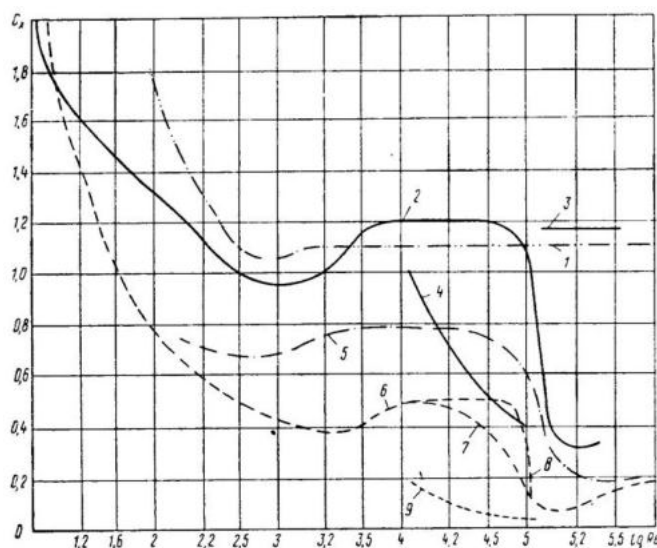


Рисунок 7. Коэффициент лобового сопротивления тел в зависимости от числа Рейнольдса. 1 – круглый диск; 2 – цилиндр; 3 – квадратная пластина; 4 – цилиндр шероховатый; 5 – цилиндр гладкий, $l/d=5$; 6 – шар; 7 – шар в турбулентном потоке; 8 – шар в ламинарном потоке; 9 – крыло самолёта [56]

По результатам расчета согласно данным таблицы 2 $Re_{12,5}=4,7 \cdot 10^4$, $Re_{25}=9,8 \cdot 10^4$.

Расчетная формула числа Фруда:

$$Fr = w_0^2 / (g l_0) \quad (2.24)$$

Число Фруда характеризует отношение силы инерции к силе тяжести. Если данное число $Fr > 10$, характеристика потока зависит только от числа Рейнольдса [57]. $Fr_{12,5}=147$, $Fr_{25}=637$.

Расчетная формула числа Стокса:

$$Stk = \frac{d_q^2 \rho_q w_0}{\mu_r l_0} \quad (2.25)$$

Или, согласно [58-60]:

$$Stk = \frac{d_q^2 \rho_q u_{m0}}{18 \mu_r R_0} \quad (2.26)$$

где: u_{m0} – скорость газа на оси начального сечения струи радиусом R_0 .

Число Стокса характеризует инерционность частиц и используется в качестве критерия подобия для критериальных уравнений. Данная характеристика помогает определить границы применимости моделей,

например в статье [61] в зависимости от отношения времени динамической релаксации частиц к лагранжеву временному масштабу турбулентности (Ω_u), которое является аналогом числа Стокса.

Подробнее об использовании числа Стокса можно ознакомиться в статье [57]. В предложенном материале показано, что при значении числа Стокса $Stk < 0,14$ пульсационные скорости частиц различного размера и различной плотности становятся равными пульсационным скоростям газа, то есть частицы в этом случае становятся пассивной примесью, размер которой не влияет на параметры газовой фазы. А при $Stk > 0,14-0,15$ при одном и том же значении числа Стокса на изменение параметров фаз двухфазной струи сильное влияние оказывает критерий относительной плотности фаз ($\rho^* = \rho_{f0}/\rho_0$) и менее выраженное влияние – критерии Рейнольдса ($Re = \rho_0 u_0 D_{f0}/\mu_0$) и критерий геометрического подобия ($D_f^* = D_{f0}/D_0$). Влияние двух последних критериев на результаты расчетов двухфазной струи возрастает при увеличении величины числа Стокса.

Рассчитанное число Стокса $Stk < 0,14$

Число получено для диаметра частиц в 100 мкм.

Расчетная формула числа Эйлера:

$$Eu = \Delta p_n / (\rho_{\text{ч}} w_0^2) \quad (2.27)$$

$$\text{Или } \zeta = 2Eu \quad (2.28)$$

где: w_0 – характерная скорость, м/с;

l_0 – линейный размер циклона, м;

ζ – коэффициент сопротивления.

Данные критерии важны для последующего математического моделирования процесса пылеулавливания в циклонном сепараторе, как опорные данные для выбора и корректировки решателя, выбираемого в качестве инструмента численного моделирования.

2.2. Математическое моделирование процесса пылеулавливания

В основном моделирование циклонов проводят с целью получить лучшее представление о физике потока и факторах, влияющих на два важных рабочих параметра циклонов: **перепад давления и эффективность разделения**.

Общие потери давления в коническом циклоне с обратным потоком можно разделить на три составляющие:

1. Потеря давления на входе;
2. Потеря давления в теле циклона;

3. Потеря давления, связанная с выходным патрубком. [62-64]

Помимо этого, на эффективность разделения влияет загрузка частиц. Подробнее об этом можно прочитать в статьях [62, 65, 66].

Согласно существующим экспериментальным исследованиям циклонов, как общая эффективность, так и эффективность фазового разделения улучшаются за счет увеличения коэффициента массовой загрузки твердых частиц на входе. Хоффманн и Штейн, сообщили об общем улучшении эффективности улавливания почти всех размеров частиц при увеличении массовой загрузки частиц на входе с $3,7 \times 10^{-3}$ до $2,6 \times 10^{-2}$ кг_т/кг_г. Однако они заявили, что эффективность разделения при высокой массовой загрузке частиц в некоторой степени зависит от скорости газа на входе в циклон, т.е. от силы завихрения. Общая эффективность разделения в зависимости от загрузки твердых частиц на входе в выбранных экспериментальных исследованиях представлена на рисунке 8. На этом рисунке показано улучшение эффективности сепарации с повышением числа Рейнольдса, что видно из экспериментальных данных при фиксированном значении времени кинематической реакции частиц $\tau_p = \frac{\rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2}{18 \mu_{\text{г}}} = 0,1$ мс. Улучшение более заметно при более низких массовых нагрузках, то есть ниже 0.01 кгт/кгг. Значения времени кинематической реакции частиц (рис 8), использованные в исследовании Фассани и Гольдштейна несколько выше по сравнению с результатами других

исследований. Данный фактор приводит к очень высокой эффективности разделения.

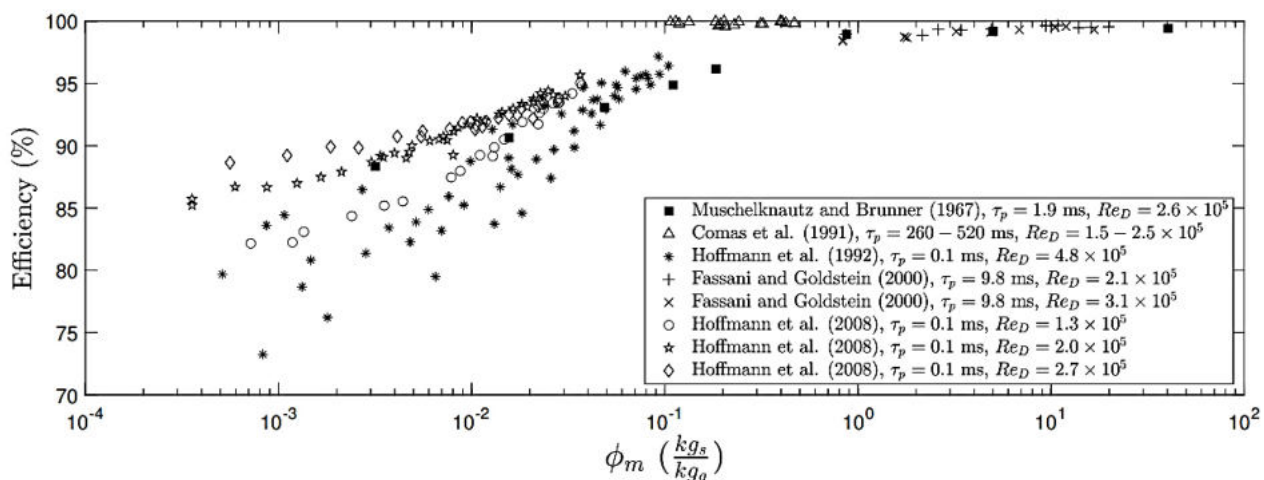


Рисунок 8. Общая эффективность сепарации циклона в зависимости от коэффициента массовой загрузки на входе в циклон для выбранных экспериментальных данных в литературе [67]. Число Рейнольдса рассчитывается на основе скорости на входе и диаметра корпуса циклона.

Баскаков и соавторы [68], Мушелькнаутц и Брюннер [66] сообщили об уменьшении перепада давления при определенном уровне загрузки твердых частиц с последующим его [перепада давления] увеличением. Аналогичная тенденция наблюдается и в других экспериментальных исследованиях [69] и исследованиях, посвященных CFD моделированию [70, 71]. Такое поведение объясняется увеличением потерь давления на трение из-за присутствия частиц вблизи стенок. Хотя одновременно с увеличением скорости трения о стенки циклона интенсивность закрутки ослабевает, потери давления, связанные с выходным патрубком, уменьшаются. Мушелькнаутц и Брюннер сообщили о снижении пика тангенциальной скорости на 85% за счет увеличения содержания твердых частиц с 0 до примерно 20 кг_т/кг_г. При низких массовых нагрузках снижение потерь давления в выходном патрубке более выражено, что приводит к уменьшению общей потери давления, тогда как при достаточно высокой массовой нагрузке потери давления в выходном патрубке становятся пренебрежимо малыми из-за очень слабой тангенциальной закрутки, а падение давления на трение все еще увеличивается с нагружением частиц. Как следствие, общий

перепад давления начинает увеличиваться с достижением минимальной концентрации твердых частиц в потоке.

В данном диссертационном исследовании особое внимание уделено исследованиям, посвященным циклонам, работающим при повышенных температурах.

Как правило, при повышении температуры газа его плотность уменьшается, а вязкость увеличивается. При фиксированном объемном расходе газа, следствием этого изменения свойств газа является уменьшение числа Рейнольдса и интенсивности закрутки в циклоне, работающем при повышенных рабочих температурах. В результате снижается перепад давления в циклоне [72-74].

Одной из проблем, которые могут возникнуть на внутренних стенках циклонов, особенно, работающих при повышенных температурах, является эрозия из-за столкновения стенки с частицами и/или коррозия из-за присутствия в газе агрессивных примесей и агентов, проходящие даже в присутствии прочной огнеупорной футеровки. Вероятнее всего коррозия разовьётся на стенке циклона в области входа газа, вызванная самым первым ударом твердых тел о стенку циклона с последующим изменением направления движения частиц [75]. Непосредственным следствием эрозии стенок циклона являются более шероховатые поверхности внутренних стенок циклона, влияющие на перепад давления и эффективность отделения частиц. Обычным решением этой проблемы являются «аппаратные» изменения в циклонной системе в период технического обслуживания, например, замена изнашиваемых пластин и подвергшихся эрозии материалов. Особое внимание нужно уделять материалу изготовления циклона.

Экспоненциальный рост производительности компьютеров в последние два десятилетия позволил добиться значительных успехов в области вычислительной аэродинамики, однако, расчет турбулентных течений по-прежнему остается одной из самых сложных расчетных задач. При этом, существующие модели не дают надежного предсказания характеристик турбулентного потока, что объясняется его стохастическим характером, широким спектром пространственно-временных масштабов и принципиально трехмерным

нестационарных характером течений. Подробнее ознакомиться с историей исследования турбулентных течений можно в источнике [76].

Значительный вклад в развитие теории в рассматриваемой области был внесен исследователями: Гольдштик, Гупта, Драйст, Дуглас, Карман, Колмогоров, Кутателадзе, Лаке, Лойцянский, Лондер, Никурадзе, Патанкар, Прандтль, Рейнольдс, Ричардсон, Россби, Самарский, Сполдинг, Тэйлор, Устименко, Хинце, Шлихтинг, Экман, Яненко, Юн и др.

Несмотря на то, что применяемые метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation или DNS), метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation или LES) и метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS) успешно применяются в различных отраслях промышленности, требующих расчетов турбулентных течений, все они до сих пор ограничены вычислительными мощностями современных компьютеров [77], а следовательно, каждой из них требуется адаптация и определение пределов применимости.

2.2.1. Описание движения жидкости

Для описания движения сплошной среды можно использовать метод Лагранжа. Материальные координаты частиц x_i задаются как функции времени t , а индивидуализация частиц происходит за счет задания координат каждой из них (a_1, a_2, a_3) . Кинетические уравнения движения записывают, как:

$$x_i = x_i(a_1, a_2, a_3, t) \quad (2.28)$$

Метод Эйлера описывает поведение сплошной среды в фиксированных точках пространства. При подходе Эйлера задается поле вектора скорости $\vec{u}$ с проекциями u_1, u_2, u_3 :

$$u_i = u_i(x_1, x_2, x_3, t) \quad (2.29)$$

Фундаментальные уравнения механики газа основаны на универсальных законах сохранения массы, импульса и энергии.

Уравнение неразрывности описывает нестационарность потока и конвективный перенос:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.30)$$

Уравнение изменения количества движения описывает нестационарность потока, конвективный перенос, учитывают градиент давления, молекулярную диффузию, силу гравитации и для вращающейся системы добавляются кориолисовы силы и центробежное ускорение. Уравнение записывается в форме системы уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + f^* \quad (2.31)$$

Где градиент давления p^* определяется как:

$$p^* = p - 0,5(x_i x_j)(\Omega_k \Omega_k) + 0,5(\Omega_i x_i)(\Omega_k x_k) \quad (2.32)$$

Ω – угловая скорость вращения;

А массовые силы с кориолисовым ускорением записываются как:

$$f_i^* = f_i - 2\rho e_{ijk} \Omega_j u_k \quad (2.34)$$

e_{ijk} – перестановочный оператор.

$$e_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{для } ijk = 123, 231, 312 \\ -1 & \text{для } ijk = 213, 132, 321 \\ 0 & \text{другое} \end{cases} \quad (2.35)$$

Уравнение сохранения энергии описывает нестационарность потока, конвективный перенос, перенос за счет теплопроводности, диссипацию энергии, приток и отток энергии:

$$\rho \frac{\partial c_p T}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_j c_p T}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij} u_i}{\partial x_j} + S \quad (2.36)$$

где:

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.37)$$

c_p – удельная изобарная теплоёмкость, T – температура, t – время, q_i плотность теплового потока, τ_{ij} – тензор вязких напряжений, S – удельное объемное тепловыделение, λ – коэффициент теплопроводности среды.

Для учета массовой и объемной концентрации частиц используются уравнения:

$$\Phi = \frac{V_{p\Sigma}}{V_\Sigma} \quad (2.38)$$

$$M = \frac{m_{p\Sigma}}{m_\Sigma} \quad (2.39)$$

где индекс $p\Sigma$ относится к объему и массе частиц, Σ к общему объему и массе [78].

2.2.2. Механизмы турбулентности

Основным механизмом генерации энергии турбулентности принято считать каскадный механизм передачи энергии (посредством нелинейных взаимодействий крупномасштабные структуры передают часть своей энергии структурам меньшим). Особых успехов в изучении мелких турбулентных структур добился Андрей Николаевич Колмогоров, он выявил, что средняя скорость диссипации ε , которая характеризует среднее количество энергии, переходящей в тепло в единицы массы жидкости за единицу времени, определяется следующим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \nu * \sum_{i,j} \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right)^2}, u'_i = u_i - \bar{u}_i \quad (2.40)$$

где: ν – коэффициент вязкости; u_i – актуальная скорость. Чертой сверху обозначено осредненное её значение, штрихом – пульсационная скорость. Диссипацией энергии осредненного течения под влиянием молекулярной вязкости при больших числах Рейнольдса пренебрегают.

Колмагоров выдвинул гипотезу об универсальности статического режима мелкомасштабной турбулентности и его зависимости только от диссипации ε и

коэффициента вязкости ν , а также соображения размерности позволяют оценить нижнюю границу линейных, скоростных и временных масштабов структур (вихрей), участвующих в процессе диссипации энергии:

$$\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}, V_{\eta k} = (\nu\varepsilon)^{\frac{1}{4}}, t_{\eta k} = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

Названный колмогоровским масштаб η_k , характеризует линейные размеры структур, на которые вязкость еще оказывает существенное влияние. Степень многомасштабности процессов турбулентного переноса можно оценить, соотнося наибольший характерный размер течения L с колмогоровским масштабом η_k . Из соображений размерности ясно, что отношение L/η_k пропорционально числу Рейнольдса в степени $3/4$, т.е.

$$L/\eta_k \sim \text{Re}_L^{3/4} \quad (2.42)$$

Важнейшим результатом колмагоровской теории стало установление равенства:

$$E_1(k) = C\varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.43)$$

также называемого законом «пяти третей». Данный закон стал ключом в понимании общих закономерностей процессов переноса в турбулентных потоках и стал основой методов LES и DES.

Первая попытка описания процессов переноса количества движения в турбулентных потоках принадлежит Буссинеску. Модель Буссинеска предполагает линейную связь тензора турбулентных напряжений с тензором осредненных скоростей деформаций.

О. Рейнольдсом впервые было предложено представлять мгновенные значения всех гидродинамических величин в турбулентном течении в виде суммы осредненных (регулярных) и пульсационных составляющих.

Упомянув Рейнольдса, следует вспомнить систему уравнений Фридмана-Келлера. Они предложили общий метод построения на основе уравнений движения жидкости, дифференциальных уравнений для моментов произвольного

порядка, гидродинамических полей турбулентных течений. Предложенная Фридманом-Келлером система утверждает, что уравнения для моментов младшего порядка всегда содержат моменты более старшего порядка. Поэтому любая конечная система этих уравнений всегда является незамкнутой. Вся последующая история статистической теории турбулентности была во многом связана с проблемой замыкания. Для решения этой проблемы потребовалось проведение необычайно широкомасштабных экспериментальных исследований свойств турбулентности при течениях в трубах, каналах, пристенных пограничных слоях и свободных струйных течениях. На основе представлений, полученных в этих исследованиях, были построены так называемые полуэмпирические теории турбулентности.

Осреднение по Рейнольдсу уравнений динамики вязкой жидкости (уравнений Навье-Стокса) приводит к уравнениям Рейнольдса, чаще называемым уравнениями первых моментов. В общем случае проблема замыкания этих уравнений сводится к установлению связи тензора турбулентных (рейнольдсовых) напряжений с тензором осредненных скоростей деформаций.:

$$\tau_{jk}^T = \rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

Теория Прандтля предполагает, что местное изменение осредненной скорости определяется только первой производной скорости и вводит понятие масштаба турбулентности (λ).

$$\tau_{xy}^T = -\rho \overline{u'v'} = \rho \lambda^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (2.45)$$

Теория Кармана утверждает, что локальные свойства потока определяются первой и второй производными от осредненной скорости по поперечной координате.

$$\tau_{xy}^T = -\rho \kappa^2 * \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^4 / \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 \quad (2.46)$$

где эмпирическая постоянная Кармана (κ)=0,41.

Принципиальное теоретическое и практическое значение для решения проблемы замыкания уравнений для первых моментов имела полученная Клаузером формула турбулентной вязкости для внешней области пограничного слоя. В качестве скоростного и линейного масштабов были использованы динамическая скорость v и интегральный дефект скорости δ .

$$v_{To} = k v_* \Delta = k v_e \delta^*, k = 0.018, \delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_e} \right) dy \quad (2.47)$$

Здесь k – эмпирическая константа Клаузера, δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя, U_e – скорость на внешней границе пограничного слоя.

Распространение также получили двухпараметрические модели, в которых вместо уравнения для масштаба турбулентности используется уравнение для скорости диссипации энергии турбулентности ε . Семейство этих моделей получило наименование k - ε моделей турбулентности. Уравнение для ε можно строго получить из уравнений Навье-Стокса путем соответствующей процедуры, включающей осреднение по Рейнольдсу. Это уравнение оказывается незамкнутым. Для замыкания необходимы модельные представления отдельных его членов.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial s_j} = \frac{\partial}{\partial s_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial s_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_T \left(\frac{\partial u_k}{\partial s_j} + \frac{\partial u_j}{\partial s_k} \right) - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.48)$$

Стандартные значения эмпирических постоянных: $\sigma_\varepsilon=1.3$, $c_{\varepsilon 1}=1.44$, $c_{\varepsilon 2}=1.92$.

Уравнение 2.48 может быть использовано совместно с другими уравнениями для описания развитых турбулентных течений, т.е. течений, на которых не сказываются вязкостные, пристеночные эффекты. Применительно к турбулентным пограничным слоям это означает возможность их применения к областям течения, лежащим вне вязкого подслоя и переходной области.

Опыт использования высокорейнольдсовой версии k - ϵ модели (с использованием различных модификаций пристеночных функций) связан с проблемами, связанными с описанием пристеночных эффектов при больших продольных перепадах давления, при малых и переходных числах Рейнольдса, в трехмерных течениях. В связи с этим получили распространение низкорейнольдсовые версии k - ϵ – моделей, в которых используется многообразие форм демпфирующих множителей, так или иначе учитывающих влияние вязкости на характеристики турбулентности в окрестности стенки.

Проблематика k - ϵ моделей связана с особенностями скорости диссипации ϵ как параметра турбулентности и условиями «настройки» уравнения для ϵ на определенный тип «закона стенки», отражающего характер профиля скоростей в пристеночной области.

Средством, позволившим существенно улучшить описание пристенных течений в рамках рассматриваемого класса моделей турбулентности, явилось использование вместо уравнения для скорости диссипации ϵ уравнения для параметра $\omega = \epsilon / c_\mu k$. Этот параметр, иногда называемый «псевдозавихренностью», имеет размерность частоты (1/с) и характеризует величину скорости диссипации, приходящуюся на единицу кинетической энергии турбулентности.

Разработка k - ω модели стала крупным успехом в моделировании пристенных течений при больших продольных перепадах давления. Однако конкуренцию однопараметрическим k - ϵ и k - ω составила двухпараметрическая двухзональная k - ω модель Ментера (SST). В рамках этой модели во внутренней области использовалась модифицированная k - ω модель Уилкокса, а во внешней – стандартная k - ϵ модель. В середине пограничного слоя используется формула Брэдшоу. Данная модель показывает высокую эффективность и по сей день.

Следует отметить, что помимо представленных моделей существуют другие модели турбулентности, однако здесь приведены только те, что по мнению автора исследования имеют ключевое значение для развития тех моделей, что лучше других подходят для описания течений в циклоне, предназначенном для процесса пылеулавливания частиц титана из камеры аппарата селективного лазерного

сплавления. Существуют и другие модели, например, существует широко используемая модель Спаларта-Аллармаса, которая содержит ряд важных поправок, позволяющая применять её в случаях, где необходимо учитывать кривизну, вращение, шероховатость и т.д.

Метод прямого численного моделирования турбулентных течений на основе трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса (**DNS**) базируется на превосходстве пространственно-временных масштабов молекулярных движений над пространственно-временными масштабами турбулентности. Большая величина отношения наибольших характерных масштабов течения к наименьшим при высоких числах Рейнольдса (Re_L) – основной недостаток метода. Именно по этой причине современное состояние ЭВМ не позволяет производить расчеты методом DNS для больших чисел Рейнольдса.

Основная идея метода **LES** заключается в формальном математическом разделении крупных и мелких структур посредством той или иной операции. Чаще всего в качестве такой операции используется операция фильтрации, согласно которой переменные ячеечного масштаба определяются уравнением

$$\bar{f}(r, t) = \int_V G(r, r') f(r', t) dV \quad (2.49)$$

а подсеточные переменные – как

$$f'(r, t) = f(r, t) - \bar{f}(r, t) \quad (2.50)$$

где V – объем, по которому проводится интегрирование; $G(r, r')$ – функция фильтра с характерным масштабом длины Δ . Наиболее часто используемыми фильтрами являются фильтр Гаусса, коробчатый фильтр (box), фильтр Фурье.

За время существования метода было проведено достаточно большое количество исследований подсеточных моделей, фильтров и граничных условий, однако они не внесли полную ясность в механизм выбора наилучшего варианта подсеточной модели и размеров фильтра. Помимо вышеуказанных факторов метод LES испытывает трудности вычислительной реализации. В связи с этим

вероятно наиболее предпочтительной в практическом плане является «алгебраическая» по сути модель Смагоринского.

В ее основание положены два соображения. Первое из них, во многом сходное с соображениями Колмогорова, предполагает, что турбулентная вязкость T_v определяется средним значением скорости диссипации энергии турбулентности ϵ , приходящейся на единицу объема. В этом случае из соображений размерности следует $\nu t \sim \epsilon^{1/3} \cdot \Delta^{4/3}$, где Δ – характерный линейный масштаб фильтра.

Второе соображение базируется на особенностях инерционного интервала спектра энергии турбулентности. В случае, если этот интервал выражен достаточно отчетливо (длинный интервал), скорость диссипации может быть выражена через среднюю скорость деформации ячеечного масштаба.

Наряду с этим в рамках метода LES велись разработки моделей подсеточного масштаба второго порядка, аналогом которых в методе Рейнольдса являются модели для компонент тензора напряжений Рейнольдса. Однако это направление, в том числе и в связи с трудностями его вычислительной реализации, не получило такого же развития, как и моделирование подсеточных масштабов первого порядка.

Идея метода отсоединенных вихрей (**DES**) заключается в использовании метода Рейнольдса только в тех областях потока, где размер используемой вычислительной сетки Δ недостаточен для разрешения турбулентных структур с линейными масштабами L_T , меньшими Δ , т. е. $L_T < \Delta$ (например, L_T – характерная толщина пограничного слоя); остальной области течения, где $\Delta < L_T$ используется метод LES. Данный метод предполагает решение низкорейнольдсовой проблемы.

2.2.3. Численное моделирование потока газ-твёрдое тело

Исходя из вышеизложенного материала, можно сделать вывод, что хотя моделирование и является ценным инструментом в исследовании явления турбулентности и, как следствие, процесса сепарации твердых частиц в циклоне,

практическая реализация численного исследования существенно затруднена отсутствием подходящих вычислительных мощностей и (или) недостатками подходов.

Прежде всего необходимо учитывать, что моделирование систем газ-твердое тело необходимо разделять на однонаправленный (моделируется только поток газа), двунаправленный (описывается взаимодействие среды и частицы) и четырехнаправленный (моделируется взаимодействие частиц с потоком с учетом взаимодействия частиц между собой) режимы (рис. 9).



Рисунок 9. Схема режимов взаимодействия газа с твердыми частицами в турбулентных течениях. τ_p и τ_e — время кинетического отклика частиц и временной масштаб крупных вихрей в турбулентном потоке соответственно [79].

Границы применимости различных моделей в источнике [80] оцениваются по объемной концентрации частиц. При объемной концентрации частиц не превышающей 10^{-6} можно не учитывать влияния частиц на параметры газовой фазы. При концентрации $10^{-6} - 10^{-3}$ необходимо учитывать движение частиц, а при объемной концентрации более 10^{-3} необходимо учитывать и взаимодействие частиц при их соударениях. В работе [58] проводить оценку применимости

моделей возможно по значению числа Стокса, критерию ρ (критерий относительной плотности фаз) и числа Re .

При наиболее фундаментальном подходе для моделирования используется прямое численное моделирование (DNS). Само DNS моделирование можно разделить на два подхода: модель Эйлера-Лагранжа (E-L), например, метод погруженной границы (взаимодействия между жидкостью и обтекаемым объектом), и подход Лагранжа-Лагранжа (L-L), использующий молекулярную динамику, например, решетку Больцмана, применимый для моделирования потоков газа и твердых тел в чрезвычайно малых масштабах. 0,01 и 0,001 м соответственно. При использовании подхода Эйлера-Эйлера (E-E) обе фазы описываются как сплошная среда и решаются в эйлеровой области, в то время как взаимодействия газ-твердое тело учитываются с помощью модели сопротивления, а взаимодействия между частицами - с помощью моделей давления и вязкости твердого тела, например, кинетическая теория гранулированных течений (KTGF). Однако, данный подход плохо подходит для полидисперсных смесей. Однако существует несколько подмоделей, таких как модель баланса популяции (PBM), которые можно добавить к основным уравнениям E-E для учета различных размеров частиц, что требует более высоких вычислительных затрат, поскольку отдельные уравнения импульса и неразрывности должны быть решены для каждого узла сетки. Кроме того, некоторые сложные физические явления, такие как агломерация и разрушение частиц, могут быть смоделированы в сочетании с PBM.

В (неразрешенном) подходе Эйлера-Лагранжа (E-L), также называемом моделью дискретных частиц (DPM), поле потока газа-носителя рассматривается как сплошная среда и решается с использованием формулировки Эйлера. По сравнению с разрешенной моделью E-L, классифицируемой в этом исследовании как DNS, пограничный слой поверхности частицы не учитывается в неразрешенной модели E-L, а размер расчетной сетки значительно больше размера частицы. Одним явным преимуществом этой модели по сравнению с подходом E-E является прямое разрешение движения частиц, т. е. для

моделирования частиц используется меньше моделей замыкания, что делает модель более точной. Кроме того, с помощью метода E-L можно легко моделировать полидисперсные системы. Взаимодействия между частицами в модели E-L обычно применяются как модель твердой сферы или модель мягких сфер (точечных центров отталкивания). В модели твердых сфер столкновения происходят мгновенно и могут использоваться как в стохастическом, так и в детерминированном подходах. Таким образом, он подходит для газовых потоков с включением твердых частиц, в которых происходят бинарные столкновения. И наоборот, эта модель не подходит для случаев, когда частицы одновременно испытывают несколько столкновений с другими частицами. Модель дискретных элементов (DEM), представляет собой детерминированный подход к столкновениям частиц, которая учитывает параллельные столкновения частицы и может включать несколько одновременных столкновений. По мере увеличения загрузки частиц в системе газ–твердое тело подход E-L становится дорогостоящим в вычислительном отношении, особенно если используется модель DEM.

В качестве альтернативы взаимодействие частица-частица может быть смоделировано с использованием гибридных подходов E-E и E-L, таких как метод многофазных частиц в ячейке (MP-PIC) и модель плотной дискретной фазы (DDPM).

Достоинства и недостатки методов приведены в таблице 7.

В связи с относительно высокой загрузкой циклона моделирование однофазного потока в данной работе не рассматривается. В них используются **классические модели** турбулентности первого порядка стационарных и нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (URANS).

При двунаправленном моделировании в работах используется E-L подход. Частицы отслеживаются либо после достижения стационарного режима, либо на этапе постобработки, либо в переходном режиме во время нестационарного моделирования. Согласно [81-84], существует тенденция к занижению эффективного диаметра частиц при расчетах с помощью моделей LES и

завышению в расчетах с RSTM. Эффективность разделения прогнозируется более точно при использовании LES благодаря лучшему прогнозу средних и пульсирующих полей скоростей. В целом, можно заключить, что **RSTM предпочтительнее** других моделей турбулентности **с точки зрения** соотношения точности и **вычислительных затрат**, но **LES** оказался более точным в прогнозировании эффективности сепарации **для частиц малого размера**, благодаря улучшенному прогнозу колебаний скорости и турбулентной дисперсии.

Если разрешаемые масштабы имеют масштаб времени сравнимый с кинематическим временем отклика частиц (при использовании LES и DNS), турбулентная дисперсия разрешается напрямую и не требует дополнительной модели турбулентной дисперсии, при этом влиянием структур подсеточного масштаба (SGS) при движении частиц в LES, обычно можно пренебречь. Однако, для моделирования в рамках URANS обычно применяется стохастическая модель турбулентной дисперсии. Точное предсказание флуктуаций скорости газа, т.е. среднеквадратичных скоростей, важно для правильного разрешения дисперсии частиц в условиях турбулентности. В некоторых из существующих исследований сообщается, что даже при том, что средние скорости правильно фиксируются RSTM, среднеквадратичные колебания поля скоростей недооцениваются по сравнению с измерениями из-за проблем в точности прогнозирования поведения PVC, которое влияет на среднеквадратичные скорости, особенно в центральных областях циклона. Шукла и др. [85] сообщили о повышенной эффективности разделения частиц меньшего размера из-за недооценки флуктуаций скорости. С другой стороны, LES может правильно фиксировать как среднюю, так и среднеквадратичную скорость, что позволяет точно прогнозировать эффективность разделения по сравнению с измерениями. Подробнее можно ознакомиться в источниках [85, 86].

И метод Эйлера-Эйлера и метод Эйлера-Лагранжа используются как для двунаправленного, так и для четырехнаправленного моделирования, однако из-за локальной неоднородности частиц в теле сепаратора, предпочитается подход Эйлера-Лагранжа. На практике, для **четырёхнаправленного** (а во многих

случаях и для двунаправленного) моделирования **используются гибридные модели** [87-93].

Помимо моделирования потока и влияния соударения частиц в процессе сепарации, необходимо учитывать также **эффект слипания (агломерации) частиц**. Для этого существуют **объемно-эквивалентный** (агломерация по объему равна сумме частиц) и **инерционно-эквивалентный** (при расчете агломераций учитывается инерция частиц) **способы учета агломерации** при CFD моделировании. Предполагается, что единственным движущим фактором межчастичной адгезии является сила Ван-дер-Ваальса. Подобный эффект необходимо учитывать при расчете частиц диаметром менее 2 мкм.

Таблица 7. Сводная таблица доступных подходов к моделированию вычислительной гидродинамики (CFD) течений с фазами газ-твёрдое тело с включением моделей замыкания, учитываемых в каждом подходе [67]

Шкала степени решаемости Сходимость модели замыкания	CFD подходы газ-тв.тело	Модели замыкания	Комментарий
	Квазиоднофазная модель (модель смешения)	- Модель свойств смешения - Модель скорости скольжения (проскальзывания) - Модели учитывающие сопротивления	- Применяется только для систем с очень разжиженными фазами - Как правило, не даёт точных результатов
	Модель Эйлера-Эйлера (двух жидкостная модель)	-Замыкание вязкостного давления (например, модель на основе кинетической теории) - Модели сопротивлений	- Гипотеза континуума должна быть верной, т.е. газовая и твердая фазы должны быть в достаточном количестве в каждом контрольном объеме. - Обычно применяется для монодисперсных частиц, поскольку от размера частиц зависят вычислительные затраты
	Гибридные модели (например, MP-PIC и DDPM)	- Модели сопротивлений - Модель напряжения столкновений частиц	- Умеренные вычислительные затраты по сравнению с моделями E-L, с учетом столкновения частиц
	Неразрешенная модель Эйлера-Лагранжа (DPM)	- Модели сопротивлений - Стохастическая или детерминированная модель столкновений	- Требуется больших вычислительных мощностей при моделировании больших систем, особенно с детерминированными моделями столкновений
	Прямое численное моделирование: • Разрешенная модель Эйлера-Лагранжа (например, модели с погруженными границами) • Лагранж-Лагранж модель (например, решетка Больцмана)	Не замкнутая	- Очень дорого - Может использоваться для разработки модели замыкания, например модели сопротивлений

Как было упомянуто выше, повышение температуры отрицательно сказывается на процессе пылеулавливания циклонов. Из-за усложнения физики течения газа внутри циклона (теплопередачи, переменной плотности и вязкости газа в локальных областях) при CFD моделировании процесса необходимо решение дополнительного уравнения, что повышает требования к

вычислительным мощностям. Однако, чтобы избежать этой сложности, *моделирование может проводиться при фиксированной температуре газа, а значения плотности и вязкости газа изменяются в соответствии с рабочей температурой*. В источниках [94, 95] сообщается, что при использовании этого метода прогнозируемое падение давления имеет приемлемую точность по отношению к измерениям. Для трекинга частиц при дву/четырёхнаправленном моделировании **при повышенных температурах целесообразно применять подход DDPM-KTGF** [96, 97], это позволяет учитывать теплообмен, рационализируя вычислительные затраты.

Как показано в таблице 7, по соотношению качества решения к вычислительным затратам наиболее подходящими являются гибридные методы моделирования.

В мультифазном методе частиц в ячейке (MPPIC) для непрерывной фазы решаются уравнения массы и импульса, а для добавленной фазы (частиц) решается уравнение Лиувилля для получения функции распределения положения частиц, их скорости и размеров. Для упрощения задачи принят ряд допущений: во-первых, пренебрегают флуктуацией частиц (не учитываются их столкновения), во-вторых, пренебрегают недиагональными элементами тензора напряжений твердых тел, в-третьих, пренебрегают средней силой, действующей на частицу в результате столкновений частиц. Дополнительные упрощения заключаются в том, что газ принимается как идеальный, не вязкий, плотность частиц одинакова для всех частиц, а между фазами нет массообмена.

Уравнения массы и импульса для газовой фазы имеют вид:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_G)}{\partial t} + \nabla_x * (\epsilon\rho_G u_G) = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_G u_G)}{\partial t} + \nabla_x * (\epsilon\rho_G u_G u_G) + \nabla_x p = -F + \epsilon\rho_G g \quad (2.52)$$

где ϵ - объемная доля газа, F - скорость обмена импульсом на единицу объема от газа к фазе частиц. Давление и плотность газа связаны отношением:

$$\frac{p}{\rho_G^{\gamma}} = const$$

Эволюция частиц регулируется уравнением Лиувилля для функции распределения частиц $f(x, v, m, t)$, где x – положение частицы, v – скорость частицы, m – масса частицы.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_x * (fv) + \nabla_v * (fA) = 0 \quad (2.53)$$

В этом уравнении $A=dv/dt$ – ускорение частицы

$$A = D(u_G - v) - \frac{1}{\rho_s} \nabla_x p + g - \frac{1}{\theta \rho_s} \nabla_x \tau \quad (2.54)$$

где D – функция сопротивления

$$D = C_d \frac{3 \rho_G}{8 \rho_s} \frac{|u_G - v|}{r} \quad (2.55)$$

где

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(\epsilon^{-2.65} + \frac{Re^{2/3}}{6} \epsilon^{-1.78} \right), Re = \frac{2 \rho_G |u_G - v| r}{\mu_G}, r = \left(\frac{m}{\frac{4}{3} \pi \rho_s} \right)^{1/3} \quad (2.56)$$

Для изотропного напряжения твердых тел τ принимаем выражение Харриса и Крайтона:

$$\tau = P_s \frac{\theta}{\theta_{cp} - \theta} \quad (2.57)$$

где P_s – константа с единицами давления, θ — объемная доля частиц, а θ_{cp} — объемная доля частиц при плотной упаковке. Объемная доля частиц связана с функцией распределения f следующим соотношением:

$$\theta = \iint f \frac{m}{\rho_s} dm dv \quad (2.58)$$

Тогда ϵ и θ связаны соотношением:

$$\epsilon + \theta = 1.0. \quad (2.59)$$

И тогда F :

$$F = \iint f m \left[D(u_G - v) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p \right] dm dv \quad (2.60)$$

Существует две особенности, отличающие уравнения, используемые в методе **MPPIC**: функция передачи импульса между фазами более детализирована в сравнении с обычными уравнениями движения сплошной среды. В последних, как правило, скорость передачи импульса пропорциональна разнице между среднemasсовыми скоростями фаз. Помимо этого, уравнения включают уравнение 2.54, что редко встречается в других методах. Как правило, его не учитывают по причине того, что пришлось бы неявно связать расчет $\tau(\theta)$ с движением каждой отдельной частицы, что сделало бы вычисление очень затратным. Метод **MPPIC** решает уравнения массы и импульса для группы частиц:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta \rho_s u_s)}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\theta \rho_s u_s u_s) + \nabla_x \tau + \theta \nabla_x p \\ &= \theta \rho_s g + \iint f m D(u_G - v) dm dv - \nabla_x \left[\iint f m (v - u_s)(v - u_s) dm dv \right] \end{aligned} \quad (2.61)$$

Где усредненная скорость частиц u_s представлена как:

$$u_s = \frac{1}{\theta \rho_s} \iint f m v dm dv \quad (2.62)$$

Данное уравнение показывает, что метод **MP-PIC** учитывает кинематическое напряжение, которое возникает из-за локальных колебаний скорости частиц относительно средней скорости. Подробнее с данным методом автор рекомендует ознакомиться в статьях [98, 99].

В методе **дискретных частиц (DPM)** твердая фаза представлена отдельными Лагранжевыми частицами, тогда как газовая среда описывается следующими уравнениями сохранения массы, импульса и энергии Эйлера [100]:

для массы:

$$\frac{\partial(\theta_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f u_f) = \delta \dot{m}_{pf} \quad (2.63)$$

для моментов:

$$\frac{\partial(\theta_f \rho_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f u_f u_f) = -\theta_f \nabla p + \theta_f \rho_f g + \nabla \cdot (\theta_f \tau_f) + F \quad (2.64)$$

для компонентов:

$$\frac{\partial(\theta_f \rho_f Y_{f,i})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f Y_f u_f) = \nabla \cdot (\rho_f D \theta_f \nabla Y_{f,i}) + \delta \dot{m}_{p,chem} \quad (2.65)$$

Где: Y – массовая доля компонента; D – коэффициент диффузии; $\delta \dot{m}_{p,chem}$ – скорость изменения массы за счет фазовых переходов.

для энергии:

$$\frac{\partial(\theta_f \rho_f h_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f h_f u_f) = \theta_f \frac{Dp}{Dt} - \nabla q + Q + S_h \quad (2.66)$$

h_f – удельная энтальпия; Q – удельный объем тепловыделения.

Каждая частица отслеживается с помощью следующих уравнений:

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = f_i + m_i g \quad (2.67)$$

$$I_i \frac{d^2 \omega_i}{dt^2} = t_i \quad (2.68)$$

Для массы m частицы i , ее положения r и силы f , вызванной сопротивлением среды и контактом со стенкой и другими частицами, за исключением силы тяжести. I и t – момент инерции и полный крутящий момент для i -той частицы. f_i задается как сумма силы сопротивления (f_c), силы контакта (f_k), и силы давления окружающего газового потока. f_c задается моделью Юрген-Вена и Юу для учета эффекта объемной доли газа в плотном слое частиц. f_k — сумма нормальной и тангенциальной сил контакта, $f_{норм}$ и $f_{танг}$, оцениваемая как:

$$f_{норм} = k\delta + \lambda_0 v_n \quad (2.69)$$

$$f_{танг} = -k_t \xi - \lambda_t v_t \quad (2.70)$$

где $f_{норм}$ задается линейной контактной моделью, тогда как $f_{танг}$ задается моделью трения скольжения.

k , λ_0 , δ и v_n — это, соответственно, коэффициент нормальной жесткости, коэффициент демпфирования, перекрытие в модели мягкой сферы и относительная скорость в нормальном направлении. k_t и λ_t — тангенциальная жесткость пружины и параметр тангенциального рассеяния. ξ и v_t — тангенциальное перекрытие и тангенциальная относительная скорость. Сила

трения моделируется как $f_{\text{friction}} = \mu f_{\text{norm}}$ для коэффициента трения μ . Тангенциальная сила трения $f_{\text{танг}}$ представлена как:

$$f_{\text{танг}} = \min(f_k, |f_{\text{танг}}|) \quad (2.71)$$

В DPM каждый вычислительный участок представляет собой n идентичных частиц, чтобы снизить требования к вычислительным мощностям. Сила f_{in} , исключая контактную силу на участке, учитывается как:

$$f_{in} = n f_{i1} \quad (2.72)$$

где f_{i1} — сила, действующая на каждую отдельную частицу согласно экспериментальной корреляции. Тепло- и массоперенос в пакете моделируются аналогично.

$$de_n = n de_1 \quad (2.73)$$

$$dm_n = n dm_1 \quad (2.74)$$

где de_1 и dm_1 — оценки для каждой отдельной частицы по экспериментальным корреляциям.

Теоретическая эффективность циклона (η) = 99,13. Расчетный минимальный размер частиц равен 4,17 мкм.

Проведенный обзор выявил недостаточность теоретических данных для точной оценки эффективности пылеулавливания циклона и показана необходимость проведения численного эксперимента для исследования внутренней структуры потока циклона, а также для более точной оценки эффективности работы циклона. С целью определения границ применимости математических моделей в главе приведен расчет чисел подобия (Рейнольдса, Фруда, Стокса и Эйлера).

В главе приведен обзор математических моделей, используемых численного решения задач моделирования внутренней аэродинамики циклона и процесса сепарации частиц. Выявлено, что при наиболее фундаментальном подходе для моделирования используется прямое численное моделирование (DNS), однако из-за высоких требований к вычислительным мощностям его применение ограничено. Альтернативой для моделирования являются гибридная модель MPPIC и модель DPM, в качестве решателей, направленных на описание взаимодействия частица-жидкость и частица-частица (двухнаправленное моделирование).

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОНЕ

3.1. Современные подходы и программное обеспечение для моделирования внутренней аэродинамики циклона

Исходя из полученных данных, изложенных в главе 2 настоящего исследования, автором был проведен обзор существующего программного обеспечения (далее – ПО) для моделирования процесса обеспыливания газа.

Современные CFD исследования проводятся по принципу, описанном автором ранее в статьях [101, 102]. Для его реализации процесс моделирования делится на четыре этапа: подготовка CAD модели к моделированию (pre-processing), решение, обработка результатов исследования (post-processing) и этап оптимизации.

В приведенных выше литературных источниках также содержится информация и описание существующих программ коммерческого сектора и программ, относящихся к свободному программному обеспечению. Каждое из них имеет свои преимущества и недостатки, однако, в условиях современного состояния рынка ПО, свободное программное обеспечение несомненно заслуживает большего внимания в сравнении с коммерческими продуктами.

На сегодняшний день десятки программ позволяют создавать модели и даже сетки различных форм, с разной степенью детализации и работающих на любых операционных системах. Особое внимание следует уделить продуктам **AUTODESK** [103], в виду их популярности среди инженеров всего мира и предоставления уникальной возможности совместной работы над проектом, **САПР Kompas-3D** [104], свободному программному обеспечению **SALOME PLATFORM** [105].

Каждая из приведенных программ позволяет создавать геометрию и сохранять её в требуемом для решателей формате STL, создавать

параметрические модели устройств, редактировать ранее созданные модели и задавать необходимые размеры проектируемого аппарата.

Одним из самых важных и сложно реализуемых на практике этапов является построение сетки для проведения дальнейшего моделирования аэродинамики аппарата. Это обусловлено недостаточной изученностью данного вопроса (например, в литературе не приводится точных данных о требуемых для решения размерах сетки, а имеющиеся сведения отрывочны и не дают полной картины), отсутствием явных линейных зависимостей форм и размера сетки к полученным результатам моделирования. Следовательно, нет ограничений, запрещающих использование того или иного ПО для генерации сетки. Рациональным подходом в данном случае будет выбор наиболее совместимого с решателем сеточного генератора, либо выбор ПО, отвечающего требуемым свойствам.

В существующих исследованиях, посвященных моделированию аэродинамики, выделяют программный комплекс **Ansys Meshing** [106], который позволяет генерировать, уточнять, обновлять и проверять построенную сетку на целостность. Помимо этого, данный продукт позволяет создавать гибридные сетки. Среди свободного программного обеспечения сеточными генераторами может выступать как САД программа **Salome Meca**, так и открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред – **OpenFOAM** [107].

Задавать граничные условия позволяет любой из существующих на рынке решателей, например **ANSYS FLUENT** и **OpenFOAM**. Обе программы подходят для решения поставленных в диссертационном исследовании задач, что подтверждается исследованиями, упомянутыми в главе выше. **ANSYS FLUENT** является коммерческим продуктом, позволяющим провести полный цикл исследования в одной программе. Неоспоримым плюсом является наличие пользовательского интерфейса, большой пользовательской базы, поддержки, а также наличие большой выборки исследований, проведенной с помощью данного ПО. В последние годы активно появляются компании, предоставляющие

поддержку и интерфейс для пакета OpenFOAM, что облегчает использование программы рядовыми пользователями.

Для моделирования взаимодействия частиц с потоком существует пакет **LIGGGHTS** [108], основанный на методе дискретных элементов (DEM). Данный пакет позволяет учитывать шероховатость частиц.

Обработка полученных результатов, полученных с помощью OpenFOAM, проходит в открытом графическом кроссплатформенном пакете для интерактивной визуализации **Paraview** [109].

При необходимости корректирования геометрии и поиска оптимального геометрического решения существует Dakota [110]. ПО работает по алгоритму, приведенному на рис. 11.

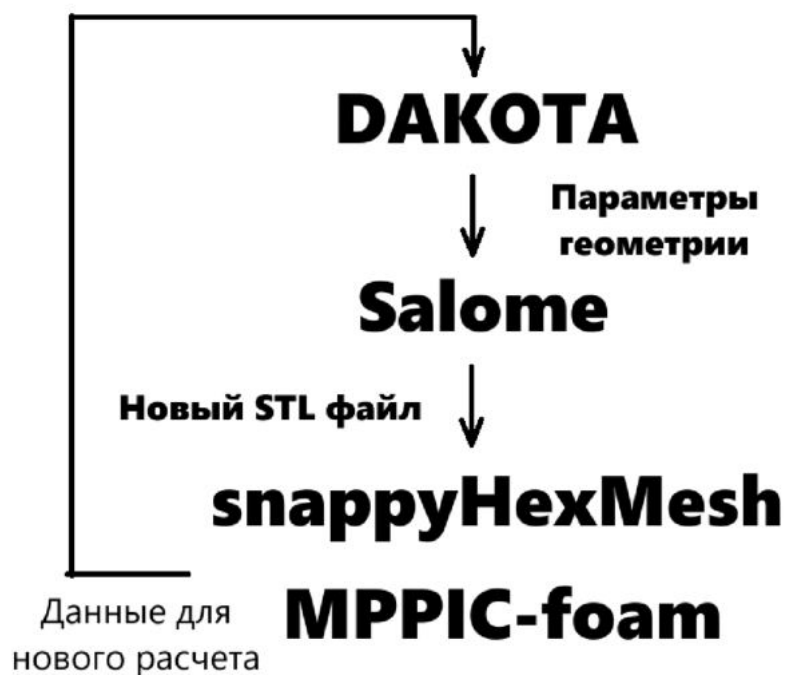


Рисунок 11. Схема оптимизации для связки Dakota – Salome – OpenFOAM

1. Пользователь создаёт геометрию в САПР и сохраняет скрипт. Далее создается копия скрипта.
2. Dakota генерирует параметры, которые будут использоваться на текущем шаге, и записывает их в файл settings.in.

3. Скрипт `dprepro python`, предоставленный Dakota, считывает параметры и переписывает исходный скрипт САПР, вставляя параметры в файл шаблона.
4. САПР считывает измененный сценарий, изменяет модель в соответствии с новыми параметрами и генерирует новый файл STL.
5. `snappyHexMesh` получает новый STL файл и генерирует новый `OpenFOAMesh`.
6. Решатель (например, `pimpleFoam` и т. п.) считывает сетку и производит расчет.
7. Функциональные части расчета (задаются индивидуально, в зависимости от расчета) вычисляют целевую переменную и передают ее в Dakota.
8. Дакота сравнивает текущее значение и предыдущие значения и решает, какое значение использовать на следующем шаге.

3.2. CFD моделирование циклона

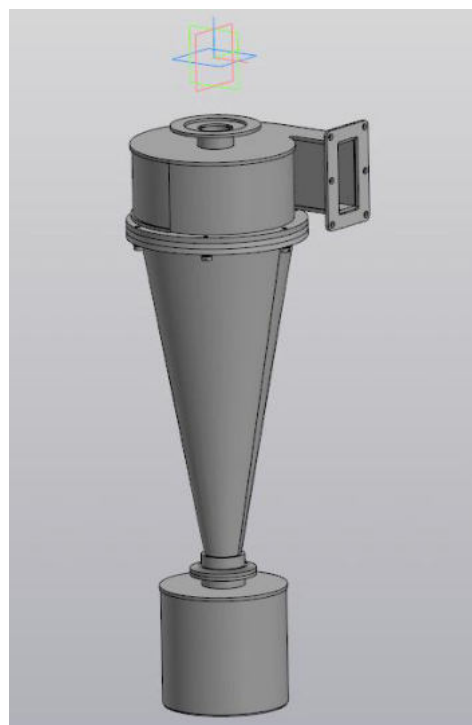
3.2.1 Подготовка модели

Построение 3-D модели для численного моделирования проводилось в ПО «Salome Меса». Для удобства дальнейшего использования модели было принято решение создать параметрическую модель. Точки и координаты для построения представлены в Приложении В диссертационного исследования. Построение параметрической модели важно для этапа автоматической корректировки модели при необходимости использования инструментов оптимизации. Например, так можно автоматически изменять диаметр циклона, длину патрубка, вихреискателя и т.д.

Для построения модели (рис. 12), подходящей для сборки готового изделия, используется САПР КОМПАС компании АСКОН. В данной модели отображены все конструкционные детали проектируемого циклона.



а)



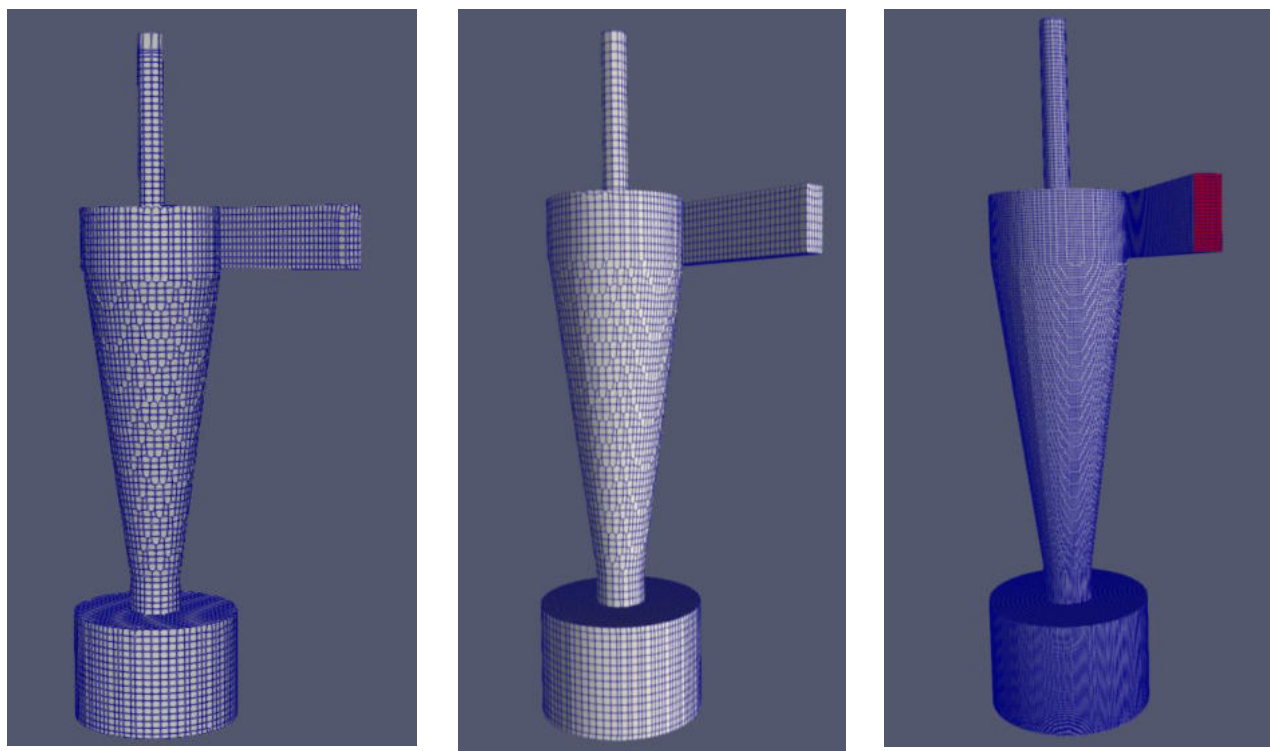
б)

Рисунок 12. Модель циклона

- а) представлена в формате STL для проведения численного моделирования;
 б) представлена в виде сборочной модели.

OpenFOAM базируется на методе конечных объемов и может работать с сетками произвольной структуры. Для генерации сетки был выбран инструмент *blockMesh* и *snappyHexMesh*. Построение сетки проводилось с импортом файла формата .STL в среду OpenFOAM.

Качество сетки определяет качество решения, ибо влияет на стабильность и сходимость моделирования. Подробности о построении сетки градуировочной (*blockMesh*) и гексаэдральной (*snappyHexMesh*) сеток содержатся в документации [111, 112]. В настоящее время нет однозначных данных о корректном подборе сеток, однако есть множество работ, посвященных влиянию сеток на результаты моделирования, необходимо отметить, что сходимость и стабильность моделирование не на прямую коррелируют с размером сеток. В литературе приведены лишь отрывочные данные о требуемых размерах ячеек, в этой связи были созданы несколько вариантов сетки, для последующей её калибровки.



а) размер сетки 50x30x100 с 2 добавленными уровнями б) размер сетки 50x50x100 в) размер сетки 100x65x256

Рисунок 13. Построенная сетка утилитами blockMesh и snappyHexMesh

В общем случае, количество секторов градуировочной сетки влияет на конечное количество ячеек в модели, однако помимо градуировки в модель можно вводить подсеточные структуры, а также уточнять некоторые участки модели. Сложность состоит в автоматической генерации сетки. Например, пользователь не может уточнить только зону улитки или укрупнить сетку в области бункера, где расчет не так важен. На рисунке 13 отображены результаты построения, где на варианте а применена самая крупная (с наименьшим количеством ячеек) градуировочная сетка, однако проведена операция уточнения сетки, что сделало её схожей по качеству с сеткой с более мелкой градуировкой (б), в третьем варианте (в) построения использована мелкая градуировка для получения схожего с размером частиц размера ячеек. Все варианты были проверены на наличие ошибок с помощью инструмента *meshQualityControls*. На данном этапе для модели были указаны входное и выходные отверстия, вся геометрия отмечена как

твердая стенка. После построения сетки можно приступить непосредственно к моделированию процесса.

3.2.2. Выбор решателя

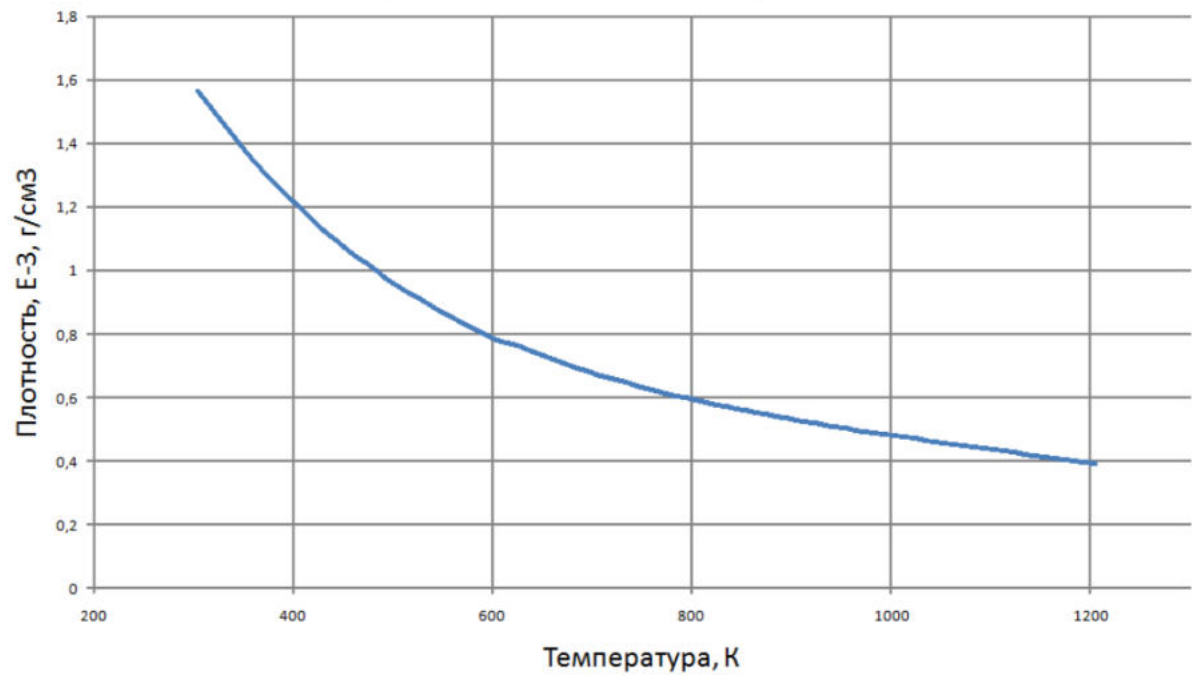
Согласно проведенному в главе 2 настоящего исследования анализу литературы, можно заключить, что исходя из полученных численных значений числа Стокса ($Stk < 0.14$), поток частиц можно моделировать совместно с движением газа. Массовая концентрация части C_m достигает $1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$, что свидетельствует о важности учета взаимодействия частиц с потоком, поэтому потребуется двунаправленное или четырехнаправленное моделирование.

Прочие данные для расчета получены из таблицы 2 главы 2. Процентное содержание частиц определенного размера в твердой фазе приведено в главе 4 диссертации. Расчет для максимального количества частиц приведен в таблице 8. Расчет будет проводиться для 25 000 и 1 135 000 (что соответствует диаметру в 200 и 55 мкм соответственно) частиц. В соответствии с количеством частиц проводится и корректировка распределения частиц, подающихся в циклон (рис. 15b).

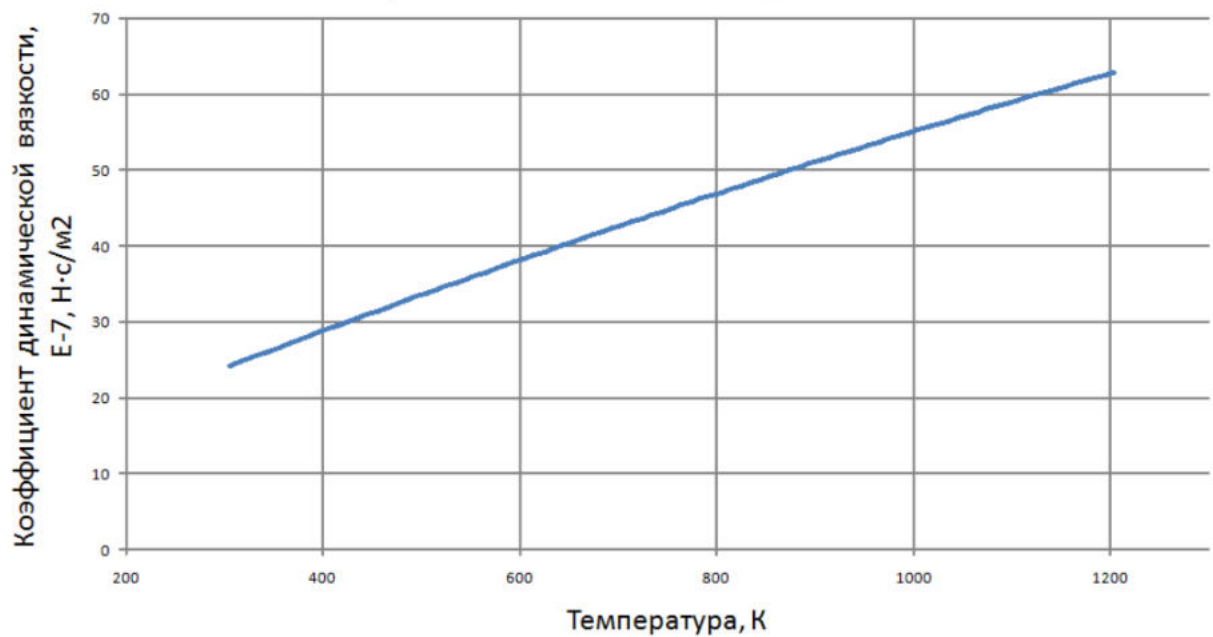
Таблица 8. Количество частиц в потоке при скорости $v=25 \text{ м/с}$

		1	2	3	4	5	6	7
<i>D</i>	<i>мкм</i>	5	10	20	55	75	100	200
<i>D</i>	<i>м</i>	5,00E-06	1,00E-05	2,00E-05	5,50E-05	7,50E-05	1,00E-04	2,00E-04
<i>r</i>	<i>м</i>	2,50E-06	5,00E-06	1,00E-05	2,75E-05	3,75E-05	5,00E-05	1,00E-04
<i>ρ</i>	<i>кг/м³</i>	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
<i>V(част)</i>	<i>м³</i>	6,54E-17	5,23E-16	4,19E-15	8,71E-14	2,21E-13	5,23E-13	4,19E-12
<i>m(част)</i>	<i>кг</i>	2,94E-13	2,36E-12	1,88E-11	3,92E-10	9,94E-10	2,36E-09	1,88E-08
<i>Расход газа</i>	<i>м³/ч</i>	160	160	160	160	160	160	160
<i>Расход газа</i>	<i>м³/с</i>	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
<i>C (част)</i>	<i>кг/м³</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>C (масс)</i>	<i>кг/с</i>	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
<i>N (част)</i>	<i>шт/с</i>	1,5E+09	1,9E+08	2,4E+07	1,1E+06	4,5E+05	1,9E+05	2,4E+04

Изменение температуры (нагрев до 548,15 °К) скажется на плотности и вязкости среды, данные (рис. 14) о вязкости получены из источника [113]:



a)



b)

Рисунок 14. Температурная зависимость плотности (а) и динамической вязкости (b) аргона

Подходящими по вычислительным затратам и точности моделирования являются неразрешенная модель Эйлера-Лагранжа (DPM) или гибридные модели (MP-PIC и DDPM). Для моделирования автором исследования был выбран пакет OpenFOAM версии 22.12. Как показано в главе 2, решатели DPMfoam и MPPICfoam, соответствующие одноименным моделям, обладают схожестью в

части моделирования потока твердых частиц, движущихся в газообразной фазе, принципиальное отличие состоит в их подходе к обработке потока твердых тел. Метод MPPIC рассматривает примесь частиц как «облако» данных, что существенно облегчает требования к вычислительным мощностям.

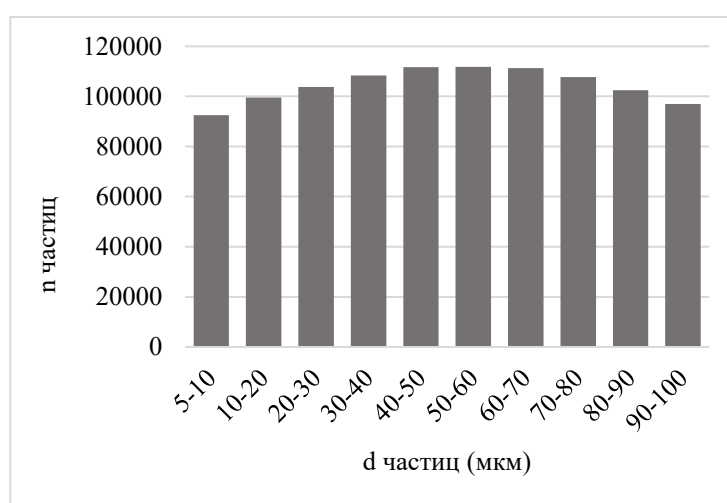
При построении учитываются следующие допущения:

- 1) для использования формулы Стокса частицы считаются шаром идеального размера (более 90% частиц титана имеют сферическую форму);
- 2) в расчете пренебрегается силой Архимеда из-за намного более высокой плотности частиц в сравнении с плотностью газа;
- 3) механическая энергия частиц одинакова во всем потоке, а поток стационарный и осесимметричный;
- 4) моделирование проводится при фиксированной температуре, а значения плотности и вязкости газа изменяются в соответствии с рабочей температурой;
- 5) температура частиц равна температуре газа;
- 6) в расчете не учитывается теплообмен между газом и стенками.

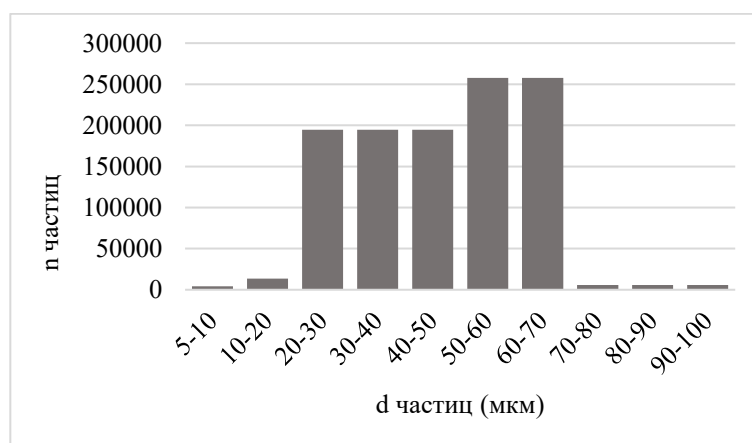
Заданные параметры дискретной фазы (частицы титана) соответствуют табличным данным, подробные данные приведены в таблице 2 главы 2 настоящего исследования.

Введение частиц контролировалось подмоделью впрыска частиц. Данная подмодель учитывает время начала впрыска частиц (SOI) (слишком раннее введение твердой фазы может привести к искажению расчета), массу всех поступивших в циклон частиц, количество частиц, поступивших в секунду времени, их скорость и размер. Размер частиц задается распределением от минимального до максимального с указанием математического ожидания размера частиц. Частицы, в данном случае, будут количественно распределены со сдвигом в сторону математического ожидания (рис. 15, а). Вторым способом задать количество элементов является задание точного числа частиц твердой фазы в потоке (рис. 15, b) [114]. Данное решение необходимо, так как известно, аппараты

циклонного типа хуже улавливают тонкодисперсные порошки (менее 10 мкм), а очищенный газ должен возвращаться в камеру, где происходит процесс печати, что в конечном итоге скажется на качестве изделий. В случае использования стандартной подмодели впрыска данные будут искажены, так как проведенный анализ фракционного состава частиц показал, что процент частиц размером менее 10 мкм составляет всего 0,37% от общего объема частиц. Однако, наличие замкнутого контура в аппарате селективного лазерного сплавления, не позволяет игнорировать даже низкие концентрации мелкодисперсной пыли.



a)



b)

Рисунок 15. а) распределение размера частиц с помощью задания медианного диаметра; б) распределение размера частиц при точном указании количества частиц требуемого диаметра.

Разные данные по диаметру частиц, а также их варьирующееся количество необходимы для исследования процесса пылеулавливания на разной массовой загрузке частицами. К сожалению, имеющиеся вычислительные мощности не предоставляют возможности расчета слишком большого количества частиц, однако, в процессе печати в тело циклона, как правило, не попадает большое количество частиц одновременно, поэтому автор считает выбранное количество частиц достаточным для исчерпывающего исследования эффективности работы циклона.

В качестве модели сопротивления выступает объединенная модель Ergun (1952) и Wen-Yu (1966) [115-116]. Общеизвестно, что гибридная модель Wen-Yu и Ergun хорошо предсказывает поведение частиц как в разреженных, так и в потоках с высокой концентрацией частиц, однако, в стандартной модели частицы распределяются равномерно, что не соответствует реальным условиям. В статье [117] приводятся данные о том, что введение поправочных коэффициентов (ур. 3.2.) в стандартную модель позволит неявно учитывать структуру потока, соответственно более корректно описывает динамику областей с высокой концентрацией частиц за счет адаптивного переключения между Wen-Yu и Ergun моделями. Данное уточнение позволяет частично решить типичную проблему «занижения» эффективного диаметра при моделировании за счет учета кластеризации частиц мелкого диаметра.

Для $Re > 1000$ $C_d = 0.44\theta_g^{-2.65}$

$$D_1 = 0.75C_d \frac{\rho_g |u_g - u_p|}{\rho_p d} \quad (3.1)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p |u_g - u_p|}{\mu_g} \quad (3.2)$$

$$D_2 = \left(\frac{180\theta_p}{\theta_g Re} + 2 \right) \frac{\rho_g |u_g - u_p|}{\rho_p d}$$

$$\text{При } \theta_p < 0.75\theta_{CP}, D = D_1 \quad (3.3)$$

$$\text{При } 0.75\theta_{CP} \leq \theta_P \leq 0.85\theta_{CP}, D = \frac{\theta_P - 0.85\theta_{CP}}{0.85\theta_{CP} - 0.75\theta_{CP}} (D_2 - D_1) + D_1$$

$$\text{При } \theta_P < 0.85\theta_{CP}, D = D_2$$

где: C_d – коэффициент сопротивления; D – сила сопротивления ($\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), D_1 – сила сопротивления в модели Wen-Yu ($\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), D_2 – сила сопротивления в модели Ergun ($\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$); d_p – диаметр частицы; Re – число Рейнольдса; ρ_g – плотность газа, ρ_p – плотность частицы, u_p , u_g – скорость частицы и газа, θ_g , θ_p – объемные доли газа и частиц, θ_{CP} – объемная доля частиц и фазы при плотной упаковке.

Для рассматриваемого в диссертации случая, в связи с низкой загрузкой частиц, будет хорошо применима модель Wen-Yu.

В решении для моделирования турбулентности используется метод больших вихрей (LES). Подробнее о решаемых уравнениях изложено в главе 2 данного диссертационного исследования. Роль фильтра в данном случае играет сетка.

Для подсеточного уровня была использована RNG модификация стандартной k - ε модели [118], корректировка выполнена согласно данным, приведенным в статье [119] с целью повышения прогностической способности модели за счет корректировки коэффициентов вязкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mu k}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho \nu k r}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_k}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial \rho \mu \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho \nu \varepsilon r}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + (C_1 - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} G_{k=\mu_t} &\left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(r \frac{\partial w/r}{\partial r} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

где: $C_1 = 1.42 - C_{1RNG}$, $C_2 = 1.68$, $C_\mu = 0.085$, $\sigma_k = 0.7179$, $\sigma_\varepsilon = 0.7179$, $\sigma_{\text{гф}} = 1.0$

$$C_{1RNG} = \frac{\eta(\eta_0 - \eta)}{\eta_0(1 + \beta\eta^3)} \quad (3.5)$$

где: $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.015$, $\eta = \sqrt{C_k/\mu_t} \frac{k}{\varepsilon}$

x , r – осевая и радиальные координаты, u , v – осевая и радиальная составляющая скорости газа, w – скорость вращения вихря G_k – генерация турбулентной кинетической энергии, σ – турбулентные числа Прандтля, C_1RNG – динамический поправочный коэффициент, η – отношение масштаба времени турбулентности к масштабу времени среднего течения, η_0, β – аналитические константы, полученные методом ренормализационной группы, C_1 , C_2 , C_μ – эмпирические константы модели.

Помимо этого, в рамках исследования выполнялось моделирование процесса сепарации 25 000 частиц циклоном с применением модели DPM. В качестве моделей турбулентности были протестированы модель LES с подсеточными моделями Смагоринского [120] и k - ε RNG, а также модель RANS (модель Ментера SST, сочетающую k - ε во внешнем потоке, k - ω модель в пристенной области и использующая формулу Бредшоу в середине пограничного слоя).

Тензор турбулентных напряжений τ_c^t аппроксимируется с использованием гипотезы Буссинеска:

$$\begin{aligned} \tau_c^t &= -\alpha_c \rho_c R_{c,ij} \\ &= -\alpha_c \left[-\frac{2}{3} (\rho_c k_c + \mu_{t,c} \nabla \cdot u_c) \delta_{ij} + \mu_{t,c} (\nabla u_c + \nabla u_c^T) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Для вычисления k_c и $\mu_{t,c}$ решаются два уравнения переноса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c k_c) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_c \rho_c u_c k_c) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_c \Gamma_k \frac{\partial k_c}{\partial x_j} \right) + \alpha_c f_r G_k - \alpha_c Y_k \\ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c \omega_c) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_c \rho_c u_c \omega_c) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_c \Gamma_\omega \frac{\partial \omega_c}{\partial x_j} \right) + \alpha_c f_r G_\omega - \alpha_c Y_\omega \end{aligned} \quad (3.7)$$

где: f_r – корреляция кривизны, $\Gamma = 2\pi r U_0$ – циркуляция в азимутальном течении, выступающий эффективным коэффициентом диффузии, α – объемная

доля, k_c – кинетическая энергия турбулентности, G – генерация, Y – диссипация, ω – удельная скорость диссипации.

Коррекция вращения происходит в соответствии с [121]:

$$e \equiv \frac{1}{2S_{mn}S_{mn}} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial U_k}{\partial x_i} + 2\varepsilon_{lki}\Omega_l \right] S_{jk} \left(\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_0 [\varepsilon_{iop}S_{jp} + \varepsilon_{jop}S_{ip}] \right) \quad (3.8)$$

Где: $S_{ij} = \partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i$ – тензор деформации, Ω – частота вращения системы, $\varepsilon_{ijk} = (i-j)(j-k)(k-i) - 2$ переменный тензор.

При расчете были применены методы, описанные в статьях и репозиториях [122-124] для ускорения расчетов с переносом их на графический процессор.

3.3. Обработка результатов моделирования

Полученные данные визуализируются и обрабатываются с помощью программы ParaView версии 5.12.0.

В работе были получены данные о значении перепада давления в циклоне. Данный параметр сравнивался с расчетным значением перепада, данные о полученном результате приведены в таблице 9. Данные, полученные методом DPM, более приближены к расчетным данным, однако расхождение невелико, поэтому любой из методов может применяться в качестве инструмента моделирования.

Таблица 9. Значения перепада давления в циклоне

	Теоретическое [125]	DPM	MPPIC
ΔP (Па)	1600	1770	1830

После проведения корректировки DPM решателя был проведен расчет общей эффективности работы циклонного сепаратора для 200 000 частиц. Результаты представлены в таблице 10 и расположены в порядке требуемых

вычислительных мощностей. Модель с применением метода крупных вихрей с использованием подсеточной модели Смагоринского склонна к занижению эффективности по сравнению с другими моделями, а модели SST и SST с использованием поправочного коэффициента Спаларта-Шура дают схожие с методом крупных вихрей результаты, требуя значительно больше вычислительных затрат. В связи с тем, что их применение нецелесообразно в виду сферической формы частиц, автором исследования было принято решение использовать метод крупных вихрей с применением k-ε RNG подсеточной модели.

Таблица 10. Эффективность сепарации циклона, рассчитанная для 200 000 частиц титана диаметром 5-100 мкм методом DPM с использованием разных моделей турбулентности

	LES Smagorinsky	LES k-ε RNG	SST	SST с поправочным коэффициентом
Количество частиц	200 000			
Эффективность (%)	86.3	95.46	95.17	96.92

Важной характеристикой, показывающей поведение частиц в циклоне, является их время пребывания и распределение в теле циклона (рис. 16, 17).

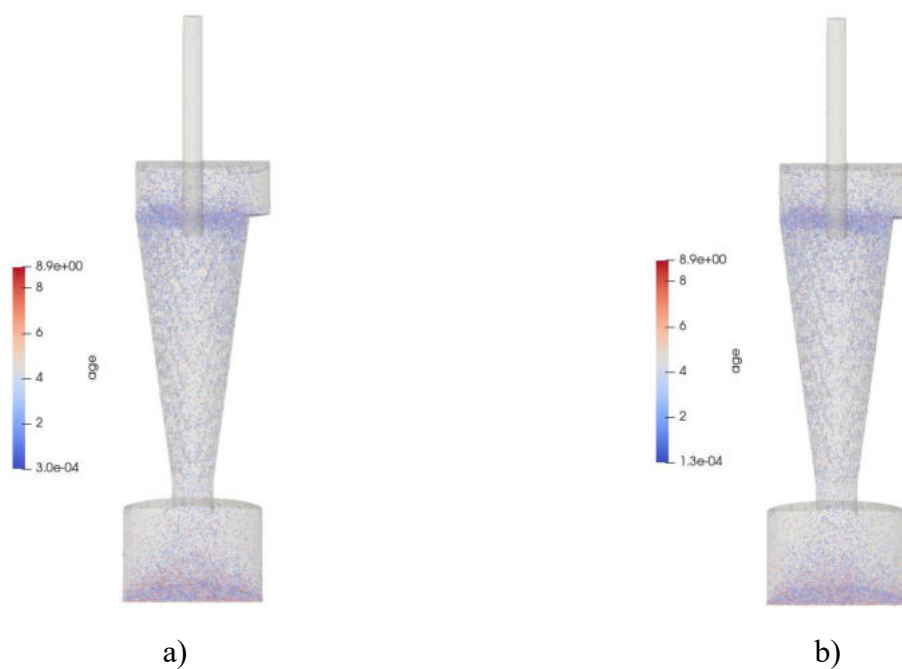


Рисунок 16. Распределение частиц в теле циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду

- a) моделирование выполнено с использованием решателя MPPIC;
 b) моделирование выполнено с использованием решателя DPM

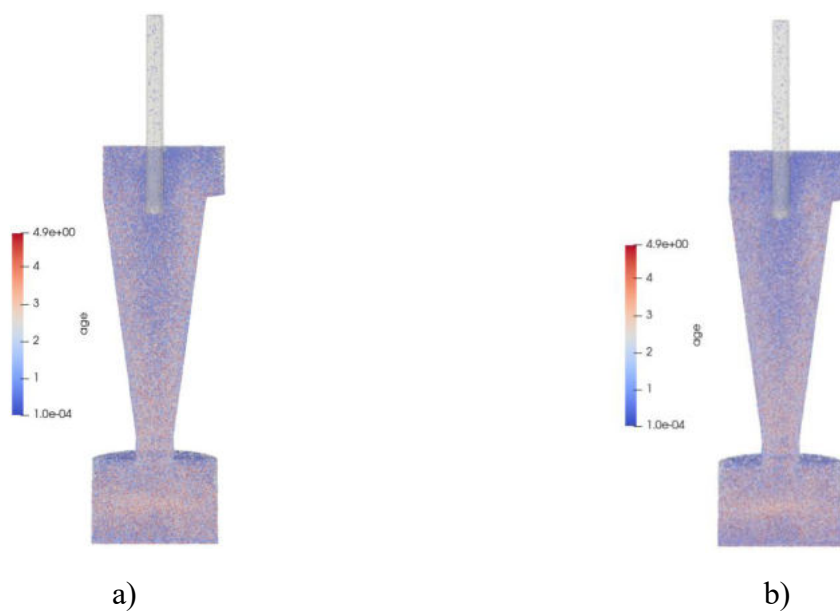


Рисунок 17. Распределение частиц в теле циклона при поступлении 1 135 000 частиц в секунду

- a) моделирование выполнено с использованием решателя MPPIC;
 b) моделирование выполнено с использованием решателя DPM

При обработке результатов моделирования были получены следующие зависимости (рис. 18):

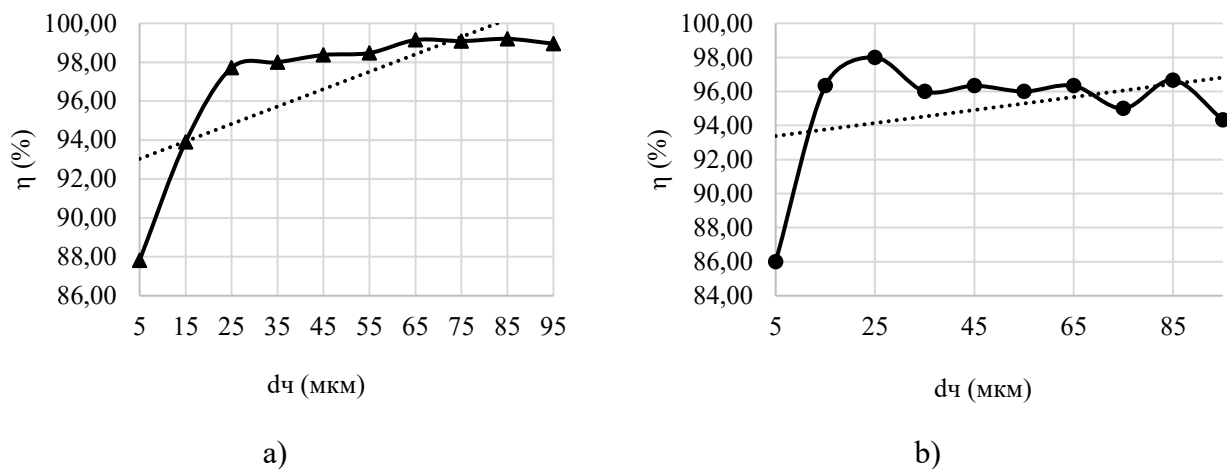


Рисунок 18. Фракционная эффективность циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду, полученная с использованием решателя а) DPM, б) MPPIC.

Как показано на рисунке 19, метод MPPIC хуже подходит для моделирования низкой загрузки частиц в циклоне, так как демонстрирует нестабильное распределение уносимых частиц, а также понижение эффективности циклона для фракций 25-100 мкм в сравнении с фракцией 25 мкм, что не соответствует известным теоретическим и эмпирическим данным, однако, низкие загрузки позволяют пользоваться методом DPM для решения инженерных задач.

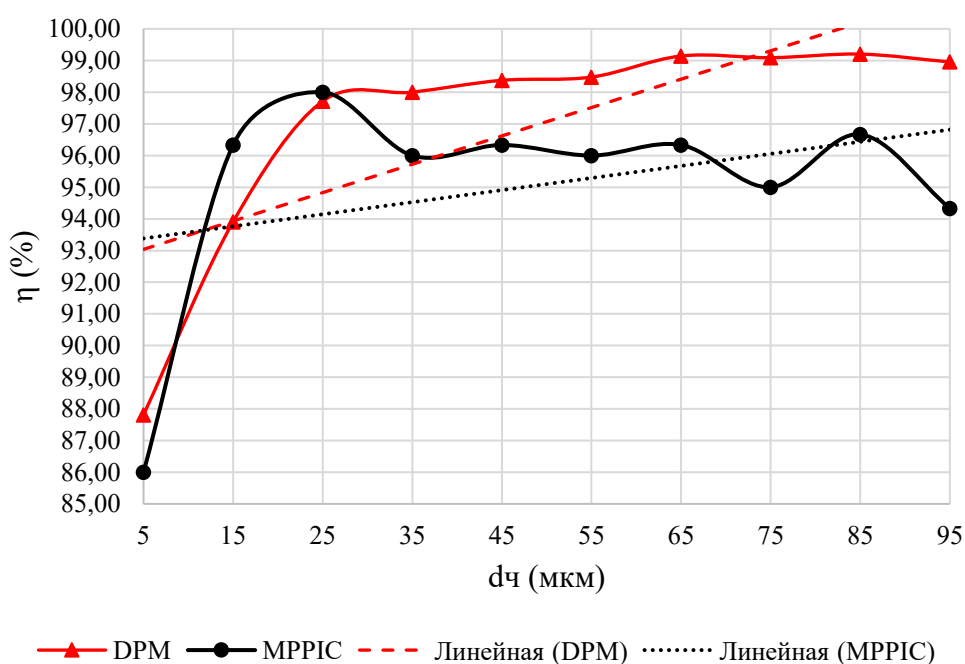


Рисунок 19. Сравнение полученных данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателя DPM и MPPIC.

В ходе работы было зафиксировано понижение эффективности сепарации по мере заполняемости бункера циклона, для этого была проведена оценка фракционной эффективности сепарации по прошествию 10 секунд и 650 секунд, после чего данные были проанализированы и представлены в виде графика (рис. 20). Сравнение показало небольшое снижение эффективности в ходе работы аппарата с 97,07% до 96,52 %.

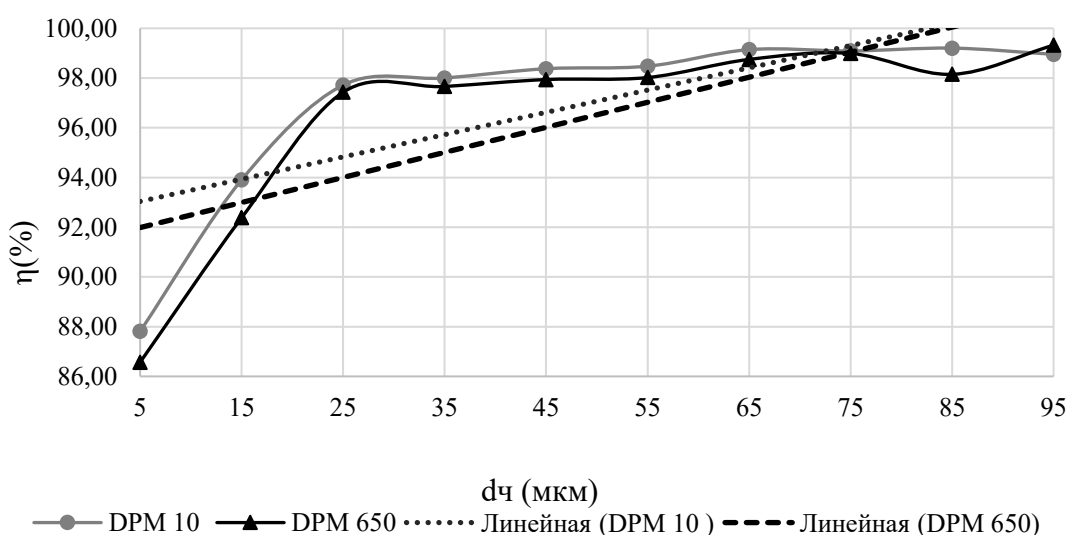


Рисунок 20. Сравнение полученных данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателя DPM по прошествии 10 и 650 секунд моделирования

Моделирование до полной заполняемости бункера циклона не проводилось.

Далее проводилось моделирование для высокой загруженности циклона частицами (рис. 21, 22), а также сопоставления полученных результатов моделирования (рис. 23).

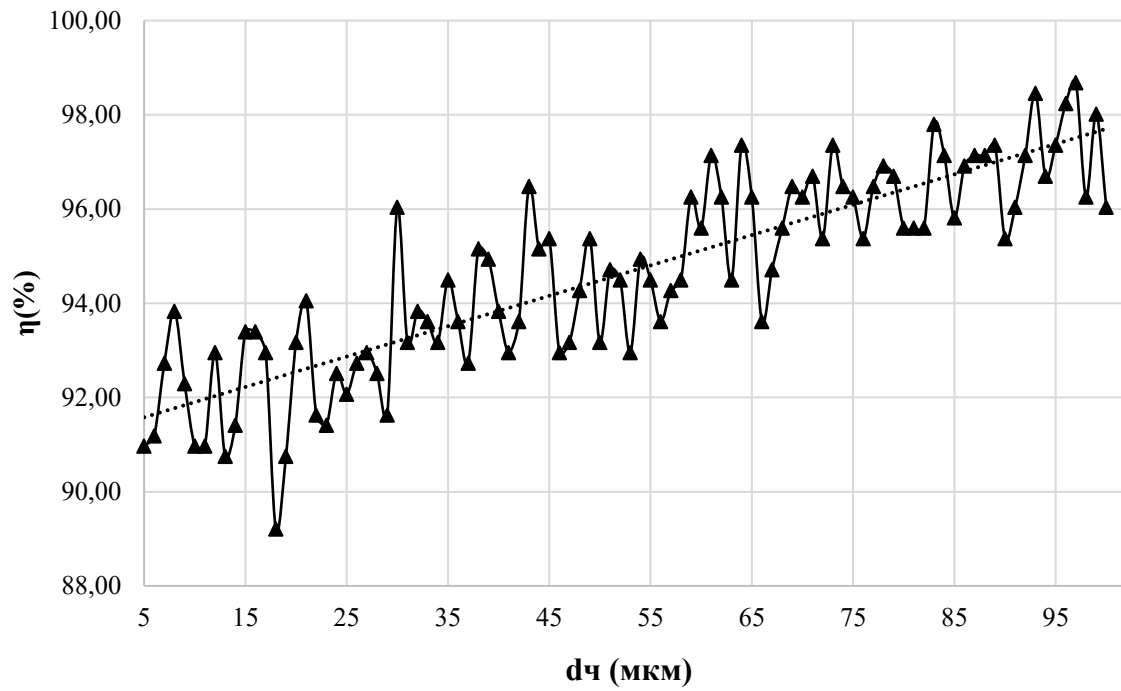


Рисунок 21. Фракционная эффективность циклона при поступлении 1 135 000 частиц в секунду, полученная с использованием решателя DPM

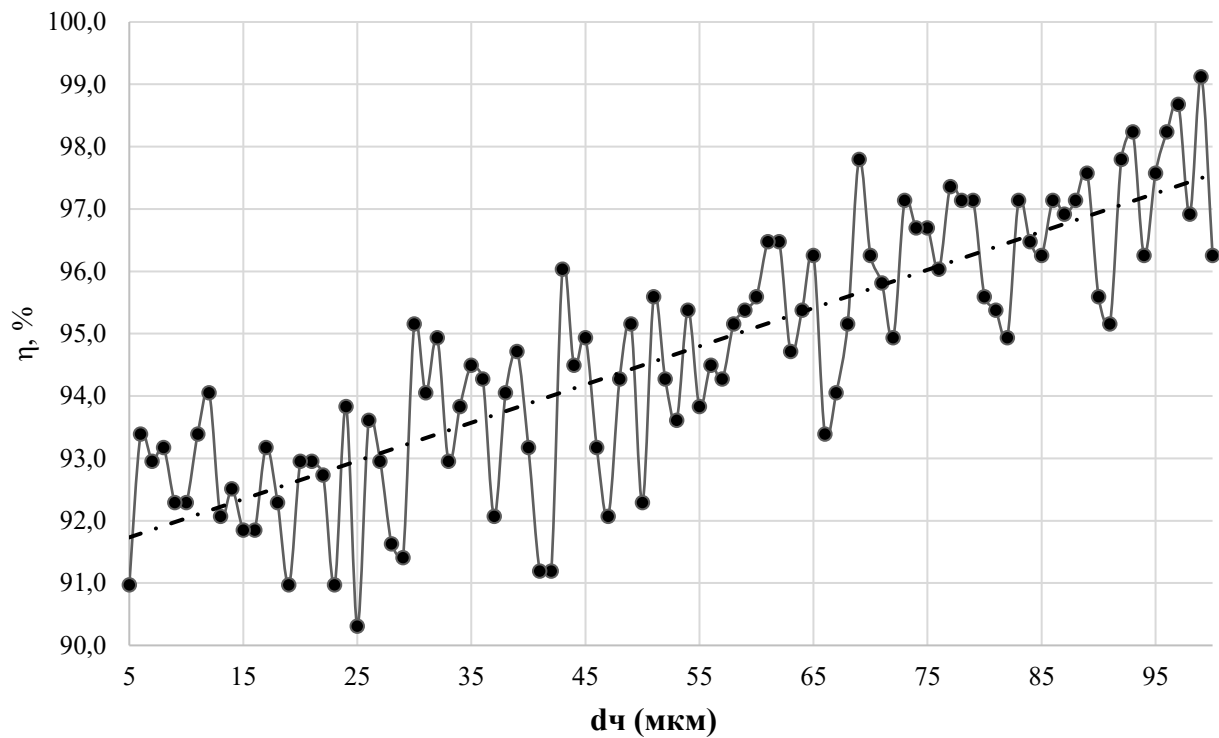


Рисунок 22. Фракционная эффективность циклона при поступлении 1 135 000 частиц в секунду, полученная с использованием решателя MPPIC

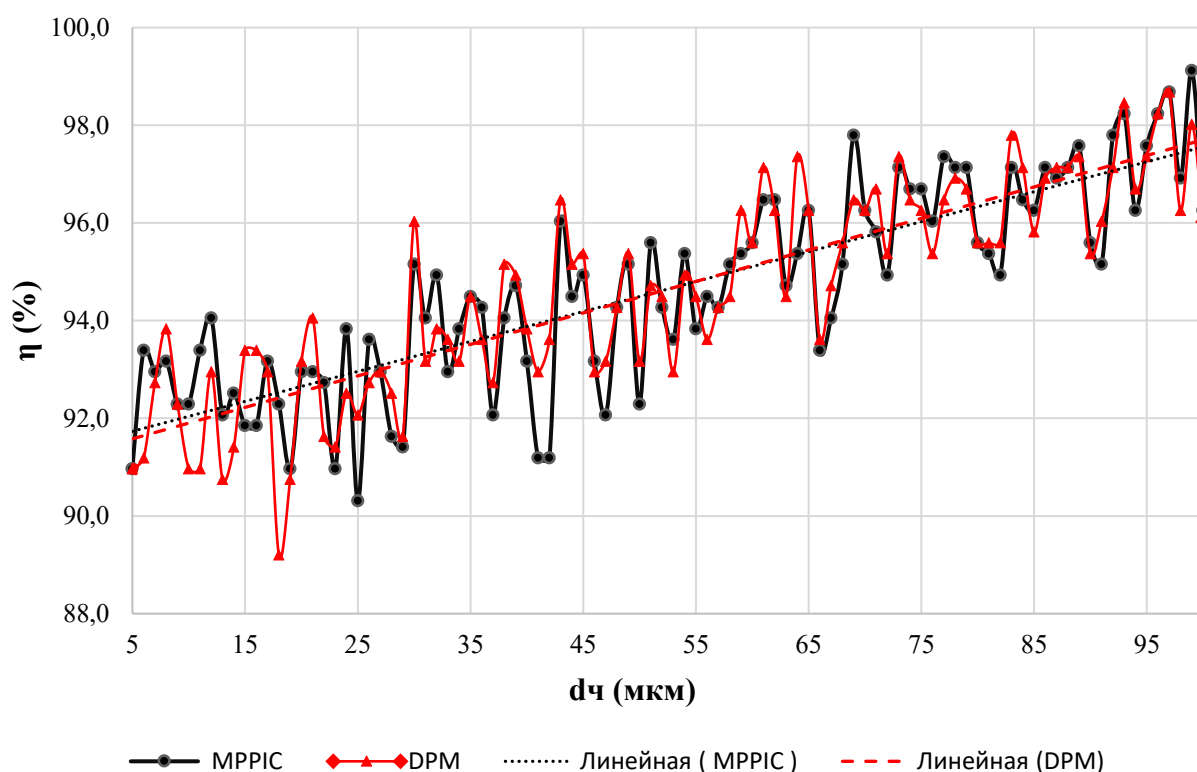


Рисунок 23. Сравнение полученных данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 1 135 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателя DPM и MPPIC.

Общие данные по эффективности работы циклона (с пустым бункером) представлены в таблице 11.

Таблица 11. Полученная по результатам моделирования эффективность циклона для решателей DPM и MPPIC

DPM (25 000 частиц)	MPPIC (25 000 частиц)	DPM (1,1 млн частиц)	MPPIC (1,1 млн частиц)
97,07	95,10	94,85	94,86

По имеющимся в литературе, описанной в главе 2 данным, использование метода крупных вихрей ведет к занижению данных об эффективности процесса пылеулавливания, однако для точных выводов необходимо получение экспериментальных данных.

Выводы по главе 3

Глава 3 посвящена уточнению модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона для получения данных о фракционной эффективности работы циклона.

В первой части главы приводятся продукты, используемые для моделирования, и обосновывается их выбор. В качестве решателя было выбрано ПО с открытым исходным кодом OpenFOAM. Данный продукт использовался для генерации сетки, а также для непосредственного решения.

Во второй части главы были приведены данные для построения параметрической модели циклона, показана используемая для расчетов сетка, её размеры и параметры генерации. Приводится обоснование выбора и модификации решателя в части корректировки подмодели SOI с переходом к дискретному представлению фазы, а также параметры моделирования. В качестве решателя используются метод MPPIC и DPM. В качестве модели турбулентности предложен метод крупных вихрей LES с уточненной в части корректировки коэффициентов вязкости, скорости диссипации и затухания подсеточной моделью $k-\epsilon$ RNG. В качестве модели сопротивления выступает уточненная модель Ergun и Wen-Yu, учитывающая локальную пористость в потоке.

В третьей части главы представлены результаты моделирования, подтверждающие фракционную эффективность сепарации. Показано, что при слабой загрузке циклона метод DPM предпочтителен методу MPPIC, а при высокой степени загрузки два метода дают схожие результаты. Эффективность сепарации циклона частиц от 5 до 100 мкм при заданных условиях, согласно расчету, составляет ~95%. Показано, что при заполнении бункера эффективность пылеулавливания снижается.

Перспективными для дальнейшего исследования направлениями могут стать:

- 1) проведение сравнительного анализа сеток, генерируемых в разных пакетах. Литература содержит множественно различных данных по построению

сеток, но из-за отсутствия стройной теории требуется практическая проверка качества генерации сетки. Интерес представляет также сравнение сеток, реализованных на разном ПО в связи с разным подходом к генерации;

2) использование подхода DDPM-KTGF, позволяющего учитывать теплообмен, а следовательно, качественнее исследовать влияние температуры на процесс пылеулавливания;

3) проведение исследования с учетом шероховатости частиц. При улавливании частиц титана учет шероховатости не целесообразен из-за преобладания сферической формы частиц.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНЕРЦИОННОГО ПЫЛЕУЛАВЛЕНИЯ

4.1. Разработка и внедрение циклона в аппарат селективного лазерного сплавления

Разработка конструкции циклона проводится в несколько этапов, включающих в себя подготовку в виде сбора параметров пыли и данных о рабочих характеристиках аппарата послойного синтеза, этап подбора наиболее подходящей конструкции циклона, расчет эффективного диаметра аппарата, CFD моделирование циклона, подготовку документации и задания на изготовление циклона, экспериментальное исследование пылеуловителя и составление рекомендаций по его использованию.

Конструкция циклона, предложенная в Главе 2 настоящего исследования, состоит из следующих сборочных единиц:

- 1) верхней части циклона;
- 2) конуса;
- 3) бункера.

Бункер изготавливается в количестве двух (или более) штук.

Имеет прокладку, выполненную из паронита, в качестве детали, а также комплектуется стандартными изделиями:

- 1) 6 винтов М5 (ГОСТ Р 11738-84);
- 2) 7 шайб 5-С (ГОСТ 11371-78);
- 3) 6 шайб 5-Л. (ГОСТ 6402-70).

Фланцы принимаем типа шип-паз, стальные плоские приварные.

Прочие изделия:

- 1) кольцо уплотнительное KF-40;
- 2) кольцо центровочное KF-40;
- 3) заглушка KF-40.

Сборочные единицы изготавливаются по индивидуальным размерам циклона.

Подбор конструкционной стали осуществлялся по марочнику сталей [126].

Эксплуатация оборудования предполагает наличие повышенной температуры (свыше 250°C), а также требует повышенных антикоррозионных свойств от материала. Требуемая температура эксплуатации допускает применение не жаропрочных сталей согласно [127].

Подобранные подходящие марки стали представлены ниже в таблице 12.

Таблица 12. Марки конструкционной стали

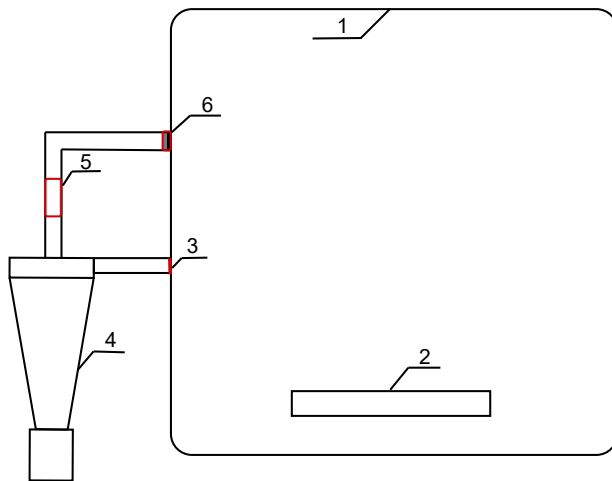
№	Марка стали	Свойства	Примечание
1	Нержавеющая сталь 08X18H10	Коррозионно-стойкая сталь	ГОСТ 5632-72
2	Нержавеющая сталь 12X18H9T	Коррозионно-стойкая сталь	ГОСТ 5632-72
3	AISI 304	Аустенитный класс. Коррозионно-стойкая сталь	
4	AISI SUS 410	Коррозионно-стойкая сталь	
5	DIN 1.4301	Коррозионно-стойкая сталь	

Целесообразным выбором для циклона станет нержавеющая сталь 08X18H10 ввиду её широкого распространения и низкой себестоимости. Вид готового изделия представлен на рисунке 24. Акт внедрения полученного изделия в промышленный аппарат послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления представлен в приложении Д.

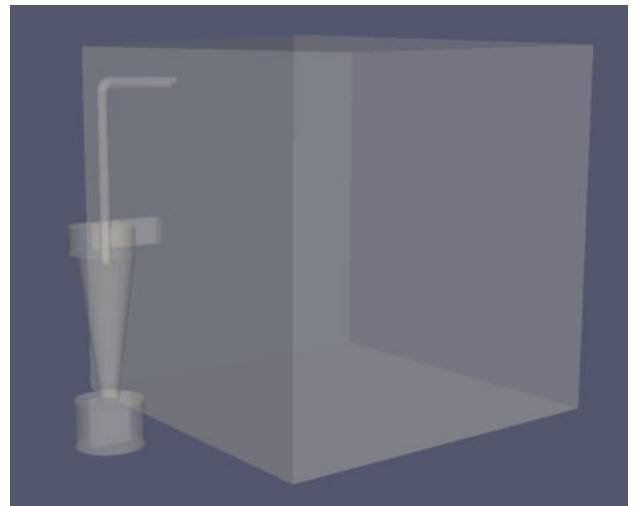


Рисунок 24. Конструкция изготовленного циклона с бункером в собранном виде

Готовый циклон монтируется к камере принтера (рис. 25) для осуществления непосредственной очистки запыленного газа при печати.



а)



б)

Рисунок 25. а) схема расположения циклона, 1 – камера принтера, 2 – стол печати, 3 – заслонка, 4 – циклон, 5 – канальный вентилятор, 6 - фильтр

б) трехмерное изображение, иллюстрирующее положение циклона к камере принтера.

Основными требованиями при эксплуатации являются своевременное освобождение бункера циклона от пыли, контроль величины газодинамического сопротивления аппарата. При необходимости конструкция может быть дополнена установкой сигнализаторов уровня пыли.

Предложенная выше система может дополняться фильтрами [128], использование которых позволяет уловить частицы, унесенные из циклона. Подобные фильтры особенно ценны при печати цветными металлами, стоимость которых крайне высока.

Разработанный циклон является стационарным решением, однако, предложенный в исследовании алгоритм позволяет подбирать циклоны для любых аналогичных принтеров.

Предложенный в данной работе циклон работает в автономном режиме, скорость подачи газа (расхода) регулируется с помощью реле, соединенного с канальным вентилятором. Для сохранения давления и аргона в камере в системе предусмотрены специализированные заслонки. Данное решение необходимо в случаях, когда печать длится продолжительное время и бункер циклона может быть переполнен. По окончании печати заслонки также не дают газу покинуть камеру. Бункер находится под постоянным воздействием высокой температуры в непосредственной близости от камеры печати, поэтому его замена производится с помощью специализированной техники, либо с помощью перчаток-манипуляторов. Существуют решения [129], когда подобные технологические решения выносятся за пределы основной конструкции и являют собой более простой в обслуживании автономный блок. Так, модульность позволяет подбирать размер пылеулавливающего оборудования в зависимости от поставленной задачи.

4.2. Экспериментальное исследование циклона

В связи с высокой стоимостью печатного оборудования, проведение эксперимента в лабораторных условиях затруднено, поэтому исследование было выполнено в промышленных условиях с применением промышленного оборудования.

Исследование проводилось с целью подтверждения работоспособности оборудования, а также получения данных о примерном проценте улавливаемого циклоном материала.

В эксперименте были задействованы:

- 1) аппарат послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления;
- 2) бюкс стеклянный для взвешивания;
- 3) мешалка стеклянная;
- 4) весы промышленного назначения с выполненной поверкой серии М-ER 122ACF-3000.05 3006. Класс точности: высокий II. Точность измерения 0.05 г;
- 5) циклон со съемным бункером-накопителем.

Процедура выполнения эксперимента состояла из отбора пробы порошка титана, прибывающего в камере принтера во время печати. Было подготовлено 5 навесок. Объем выбранного материала отражен в Приложении Г.

Затем бункер-накопитель был отделен от циклона с целью контрольного взвешивания. После выполненного замера бункер был прикреплен к телу циклона.

Навеска вносится в камеру после запуска аппарата селективного лазерного сплавления перед началом печати. К сожалению, произвести контролируемый замер в процессе печати невозможно по техническим причинам. Процесс улавливания контролировался с помощью манипуляционных перчаток в условиях, максимально приближенных к процессу печати. Температура внутри камеры согласно внутреннему датчику прибора составляла 479°K (206 °C),

давление в камере равно 121590 Па, инертный газ в камере принтера – аргон. Расход газа составлял 0,03 м³/сек. Скорость газа – 25 м/с.

По окончании процесса улавливания бункер-накопитель вновь помещен на весы. Разница между весом пустого бункера и бункера с уловленной пылью предположительно и является искомой величиной.

Полученные данные сведены в таблицу 13. Со статистической обработкой результатов измерений можно ознакомиться в Приложении Г.

Таблица 13. Результаты экспериментальных исследований циклона для пылеулавливания частиц титана и продуктов сгорания примесей в камере аппарата селективного лазерного сплавления

Масса пустого бункера, кг	Масса навески пыли, кг	Масса бункера после завершения работы циклона, кг	Искомая масса пыли, кг
1,571 ±0,002	0,106±0,003	1,675±0,003	0,105±0,003

По результатам проведенного эксперимента циклоном было уловлено ~ 99% пыли.

В ходе экспериментального исследования был апробирован циклон, используемый в процессе печати в камере аппарата селективного лазерного сплавления, была протестирована работа съемно-разъемного механизма. Дана оценка эффективности работы аппарата.

Для проведения любых исследований в области пылегазоочистки, необходимо иметь данные о характеристике улавливаемой пыли. Анализ формы и размера улавливаемых частиц был произведен методом лазерной дифракции согласно ГОСТ Р 8.777 (дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения) и методом динамического анализа изображений.

Анализ изображений даёт понимание формы исследуемого образца, что важно для этапа моделирования.

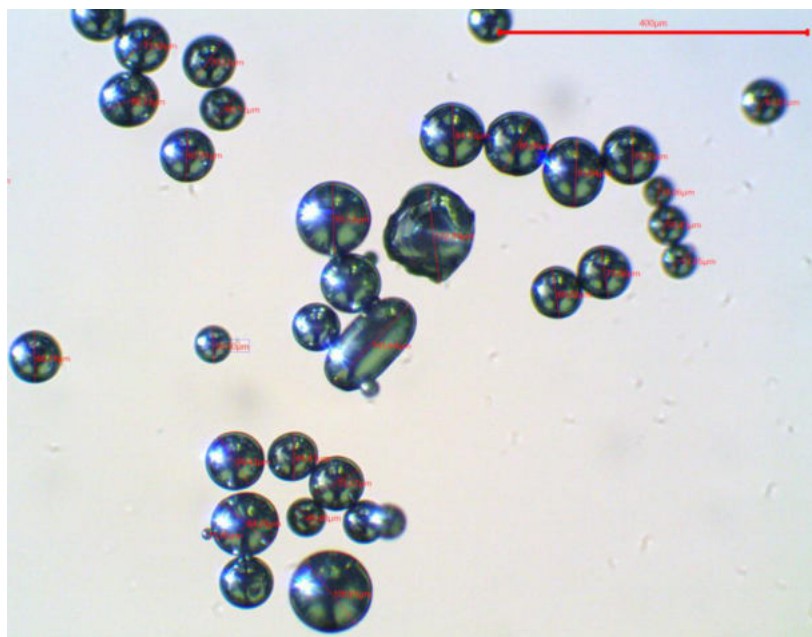


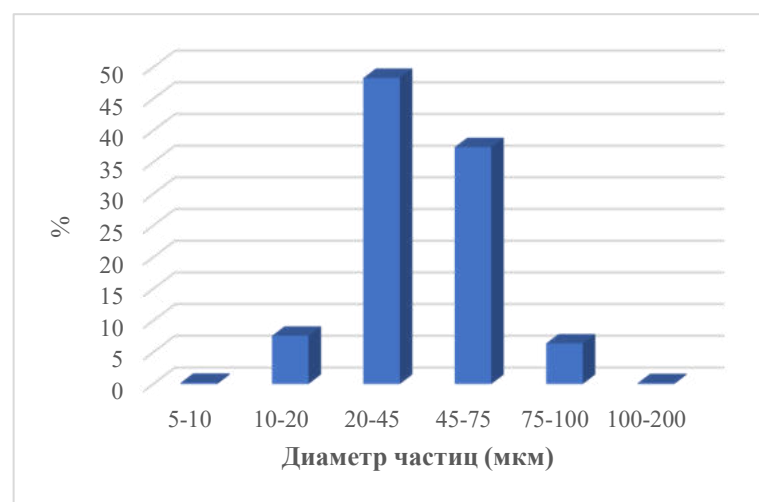
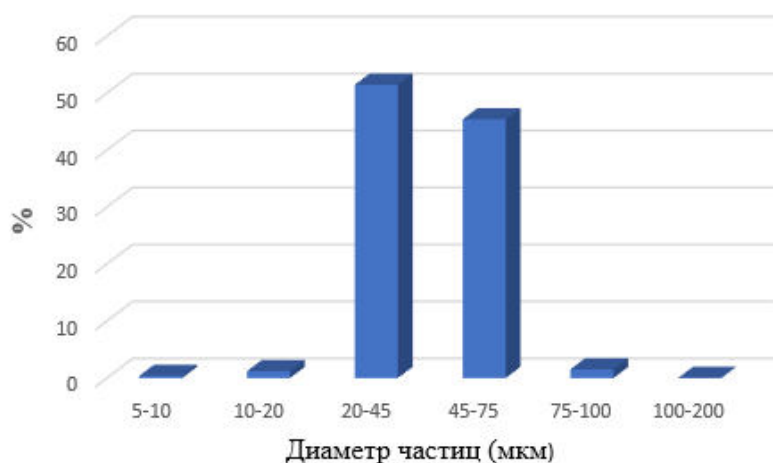
Рисунок 26. Микрофотография порошка титана. Освещение комбинированное, разрешение объектива 10х.

Метод лазерной дифракции основан на взаимодействии лазера (монохромного и когерентного света) с измеряемыми частицами. Существует связь между дифракцией и размером объекта: более крупные объекты рассеивают больше света в прямом направлении. Направление свечения крайне важно для измерения частиц размером менее 100 нм. Современные лазерные дифракционные системы позволяют определять интенсивность рассеяния в угловом диапазоне $0,02-165^\circ$, т. е. в прямом, боковом и обратном направлении. Данный эффект достигается благодаря наличию уникальной оптической системы, описанной в источнике [130]. Линзы Фурье (собираательные линзы) располагаются между лазером и частицами, а также между частицами и детекторами. Частицы взаимодействуют со светом под параллельным лазерным лучом. Это дает возможность получать проекции под несколькими углами, и, таким образом, даже очень маленькие частицы могут быть обнаружены и измерены точно. Таким образом, перед измерением не требуется выбирать подходящие линзы для соответствующего диапазона измерения размеров частиц, а также не возникает неточностей измерений из-за различных расстояний между частицами и детектором, если не все частицы лежат в одной плоскости.

Измерения проводятся в диапазоне от 0.01 мкм до 3500 мкм. Подробные данные об аппарате представлены в источнике [131]. Для удобства информации все данные по дисперсному составу частиц сведены в таблицу, приведенную ниже.

Таблица 14. Дисперсный состав частиц порошка титана до и после проведения очистки

Диаметр частиц (мкм)	% содержания до очистки
5-10	0,37
10-20	1,20
20-45	51,48
45-75	45,40
75-100	1,53
100-200	0,02
Диаметр частиц (мкм)	% содержания после очистки
5-10	0,19
10-20	7,6
20-45	48,3
45-75	37,38
75-100	6,4
100-200	0,13



Проведенный анализ фракционной эффективности показывает уменьшение доли мелких фракций, а также смещение медианы, из которой видно, что доли фракций в размере от 10 до 100 мкм улавливаются циклоном эффективнее.

4.3. Оценка экономической эффективности использования конического циклона для аппарата селективного лазерного сплавления

В связи с относительной новизной аддитивных технологий, вопросы экономической рентабельности их внедрения в производственный цикл вызывает трудности у специалистов. Внедрение подобных технологий на конкретном предприятии с точки зрения экономики рентабельно только в случае, когда при прочих равных условиях снижаются издержки производства на единицу продукции. То есть удельные ресурсные затраты становятся ниже существующих или планируемых. Однако, на практике, установки послойного синтеза активнее всего применяются в отраслях, где они становятся незаменимы по технологическим соображениям (например: медицина, станкостроение, авиа, военная, ювелирная промышленности).

При подобном подходе, где не стоит вопрос общей рентабельности применения аддитивных технологий, курс стоит на их опережающее развитие. Стоимость изделий, произведенных аппаратом селективного лазерного сплавления, складывается из следующих составляющих:

- 1) стоимость оборудования;
- 2) стоимость электроэнергии;
- 3) стоимость амортизации оборудования;
- 4) стоимость материалов печати;
- 5) стоимость расходных материалов;
- 6) стоимость обслуживающего персонала;
- 7) стоимость последующей обработки полученных изделий.

Несмотря на то, что внедряемое пылегазоочистное оборудование повышает стоимость аппарата и затраты электроэнергии, оно способно существенно снизить стоимость материалов печати, работы обслуживающего персонала, а также повысить качество изделий и уменьшить время, затрачиваемое на постобработку изготавливаемых деталей.

Также применение технологии очистки запыленного газа от частиц металла имеет немаловажный социально-экологический и экономический аспекты. Прежде всего это выражается в экономии минерально-сырьевых и природных ресурсов. Помимо этого, приведенное в исследовании оборудование препятствует уносу частиц металла в атмосферу (что косвенно способствует соблюдению законодательства в области охраны атмосферного воздуха [132] и уменьшает вероятность получения штрафа) и облегчает его сбор.

Затраты на изготовление циклона складываются из стоимости материала (нержавеющая сталь), сборке и установке аппарата. Среднерыночная стоимость предложения по состоянию на июнь 2024 года составляет **117 000 рублей** [133-137].

Энергопотребление установки будет равно энергопотреблению пылевого вентилятора. При стоимости одного кВт/ч в 5 рублей 75 копеек и мощности электроприбора в 250 Вт, **один час работы оборудования по состоянию на июнь 2024 года обойдется предприятию в 1 рубль 44 копейки.**

Благодаря съемной конструкции бункера, обслуживание данной установки не требует специальных навыков.

Основные проблемы с экономической оценкой аддитивных производств связаны с отсутствием стандартов в данной области, отсутствием статистических данных и закрытая архитектура аппаратного обеспечения цикла производств. В существующих работах внимание уделено целесообразности внедрения аддитивных технологий в производственный цикл. Процесс пылеулавливания в процессе печати, по своей сути является необходимой частью конструкции самого принтера. А значит, оценка его экономической эффективности входит в оценку аддитивного производства в целом. Подробнее об экономической эффективности аддитивных производств можно узнать в источниках [138].

Согласно [139] структура затрат аддитивного производства может быть представлена в виде:

$$C_1 = \sum (C_{1zi} + C_{1mi}) + C_{сб}, i = 1 \quad (4.1)$$

Где: C_1 – суммарная себестоимость изготовления конечного продукта;
 C_{1zi} — себестоимость получения заготовки i -й детали сборочной единицы;
 C_{1mi} — себестоимость механообработки i -й детали;
 m — число изготавливаемых деталей сборочной единицы;
 $C_{сб}$ — себестоимость сборки составной части изделия с учетом стоимости всех остальных комплектующих согласно спецификации сборочной единицы.

Так как аппаратное исполнение печатающей части принтера не меняется, интерес в данной формуле представляют только затраты на механообработку. Соответственно, в оценке экономической эффективности пылеулавливающего оборудование нецелесообразно приводить расчет затрат на полный цикл производства детали.

Стоимость механообработки определяем по формуле, приведенной в источнике [140].

$$C_m = K \cdot (Z + HP) \quad (4.2)$$

Где: K – понижающий коэффициент 0,2;
 Z – основная и дополнительная заработная плата производственных рабочих;
 HP – накладные расходы.

Зарботная плата производственных рабочих вычисляется по формуле:

$$Z = Z_o + Z_{дон} + Z_{нач}, \text{ руб} \quad (4.3)$$

где: Z_o – основная заработная плата с учетом 40 % премии, руб.

$$Z_o = 1,4 \cdot C_{\text{ч}} \cdot T_{\text{шк}} \cdot 60, \text{ руб} \quad (4.4)$$

где, $C_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка соответствующего разряда работы, руб;

$T_{\text{шк}}$ – штучно-калькуляционное время для данной операции, мин.

$$T_{\text{шк}} = T_{\text{пз}} / N \quad (4.5)$$

где: $T_{\text{пз}}$ – подготовительно-заключительное время на партию N обрабатываемых заготовок;

N – количество деталей.

$$З_{\text{доп}} = З_0 * 0,3, \text{ руб} \quad (4.6)$$

$$З_{\text{нач}} = 0,399 * (З_0 + З_{\text{доп}}), \text{ руб} \quad (4.7)$$

$З_{\text{доп}}$ – дополнительная зарплата основных рабочих (оплата отпусков и т.д.).

$З_{\text{нач}}$ – начисление на зарплату по социальному страхованию.

Накладные расходы исчисляются по формуле:

$$НР = ЦР + ОР + УР + ВР, \text{ руб} \quad (4.8)$$

ЦР – цеховые расходы, принимаемые в размере 224% от $З_0$;

ОР – общезаводские расходы, принимаем в размере 162% от $З_0$;

УР – управленческие расходы, принимаем в размере 50% от $З_0$;

ВР – внепроизводственные расходы, принимаем равными 25% общих затрат.

$$ВР = 0,25 * (З_0 + З_{\text{доп}} + З_{\text{нач}} + ЦР + ОР + УР), \text{ руб} \quad (4.9)$$

Таблица 15. Заработная плата сотрудников, выполняющих работы по постобработке готовых изделий

Наименование операции	Разряд	$C_{\text{ч}}^*$	$T_{\text{пз}}$	$З_0$	$З_{\text{доп}}$	$З_{\text{нач}}$
Плоскошлифовальная	4	600	47,2	44 688	13 406	23 179
Внутришлифовальная	5	800	53,2	59 584	17 875	30 906

* - данные получены из источника [141].

Итого: при обработке изделий на плоскошлифовальной машине стоимость часа обработки будет обходиться производству в **69 393 рубля**;

при обработке изделий на внутришлифовальной машине стоимость часа обработки будет обходиться производству в **92 484 рубля**.

В расчете не фигурируют затраты на покупку и эксплуатацию оборудования, так как внедрение циклона не полностью избавляет конечный продукт печати от потребности в постобработке.

Помимо затрат на механообработку, немалый экономический эффект оказывает сбор материала (в данной работе - порошка титана) в процессе печати. Так как печать одного изделия может длиться от двух часов до нескольких суток, целесообразнее будет вести расчет материала для одного часа печати.

Расход газа в установке варьируется от 80 до 160 м³/ч, при этом концентрация частиц порошка достигает 0,01 кг/м³ газа. Следовательно, за час печати в циклон поступает от 0,8 до 1,6 кг порошка. К сожалению, данный вид сырья не может быть употреблен в печать снова без предварительной обработки, а из-за высоких требований к качеству исходного сырья для печати, как правило, отправляется на другие этапы производства, в связи с чем, оценка его стоимости варьируется и не может быть точно определена без получения полной схемы производства.

Выводы по главе 4

Глава 4 посвящена практическим аспектам разработки циклона. В первой части главы приведены сборочные элементы циклона, выполнен подбор подходящих марок конструкционных сталей (подходящей выбрана нержавеющая сталь 08X18H10).

Вторая часть главы посвящена экспериментальному исследованию циклона. По результатам проведенного эксперимента циклоном было уловлено ~ 99% пыли. Результаты проведенного эксперимента не могут в полной мере отражать эффективность пылеулавливания, так как условия проведения эксперимента не подразумевают достаточную точность, от которой зависит качество исследования.

Методом лазерной дифракции был произведен анализ формы и размера улавливаемых частиц. Установленный размер частиц, поступающих в циклон, варьируется от 5 до 200 мкм.

Третья часть главы посвящена оценке экономической эффективности спроектированного оборудования. В настоящее время экономическая эффективность аддитивного производства сложно поддаётся оценке ввиду отсутствия статистических данных, закрытой архитектуры аппаратного обеспечения цикла производства и отсутствия стандартов (в том числе международных), которые позволяли бы точно оценить размеры затрат и прибыли, получаемых при переходе на аддитивные технологии. Однако, быстрое

развитие отрасли и новые технологические возможности активно внедряют аппараты селективного лазерного сплавления в производственные циклы различных предприятий.

Исходя из данных представленных в главе 4 данного исследования, затраты на изготовления циклона по состоянию на июнь 2024 года составят 117 000 рублей, а энергозатраты на его функционирование в течение 1 часа стоит 1 рубль 44 копейки.

Положительный экономический эффект достигается за счет экономии минерально-сырьевых и природных ресурсов, увеличения срока работы печатающего оборудования, повышения качества производимых изделий и, как следствие, экономии на последующей обработке конечных изделий, один час которой складывается из многих финансовых показателей и варьируется от 69 396 рублей до 92 484 рубля за одну трудовую единицу без учета стоимости оборудования, ввиду невозможности полного отказа от постобработки готовых изделий.

Помимо этого, внедрение циклона носит социально-экологический характер, что способствует уменьшению негативной нагрузки предприятия на атмосферу, а также сберегает ресурсы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы над диссертацией были выполнены все поставленные задачи исследования:

1. На основе анализа современного состояния исследований в области разработки циклонов для улавливания пыли из газового объема камер аппаратов селективного лазерного сплавления был подобран циклон серии СДК-ЦН-34. По аналитическим формулам был проведен расчет циклона, определен минимальный диаметр улавливаемых частиц и эффективность пылеулавливания;

2. На основе проведенного обзора современных математических моделей, позволяющих описывать многофазные турбулентные закрученные потоки и взаимодействия газа с твердыми частицами, и твердых частиц между собой было сделано предположение о применимости метода крупных вихрей в сочетании с модифицированной моделью RNG $k-\varepsilon$ для расчета фракционной эффективности и гидродинамических параметров циклона;

3. В работе уточнены модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона с целью получения данных о фракционной эффективности очистки при работе циклона. Моделирование рассмотренного процесса пылеулавливания показало, что эффективность работы представленного циклона составляет около 95%;

4. В ходе работы была разработана опытно-экспериментальная установка для исследования эффективности работы циклона, произведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, экспериментально подтверждена высокая степень пылеулавливания (99%) в выносном контуре рециркуляции аргона, обеспечивающем улавливание пыли (частиц титана фракцией от 5 до 200 мкм) из газовой полости камеры послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления. В дополнение к гравиметрическому методу, методом лазерной дифракции был выполнен фракционный анализ уловленной пыли, показавший унос мелкодисперсной пыли из тела циклона, что соответствует результатам моделирования. По результатам диссертационного исследования составлено техническое задание на разработку рабочего проекта

промышленного аппарата для АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (г. Москва), позволяющего сократить потери материала и улучшить качество готовых изделий;

5. Проведена оценка экономической эффективности внедрения циклонной очистки газа в аппарат селективного лазерного сплавления. Выявлено, что издержки на функционирование циклона не превышают 1,5 руб./ч., а сам он окупается при первой печати продукции.

Полученные в исследовании результаты рекомендованы к использованию в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» при изучении различных циклов дисциплин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одинокова, Э. А. 3D-печать в медицине / Э. А. Одинокова // Физика и медицина: создавая будущее: сборник материалов, Самара, 15 декабря 2017 года. – Самара: НИЦ LJournal, 2017. – с. 140-145
2. Шемонаева, Е. С. Анализ применимости аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники / Е. С. Шемонаева, А. В. Гончаров, В. Д. Андреев // XL Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов : в 4 т., Москва, 30 марта – 02 2021 года. Том 4. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – с. 7-10
3. Мамедова, И. Ю. Перспективы 3D печати в ювелирном производстве и печати металлом, в частности / И. Ю. Мамедова, М. А. Мартынов, Н. В. Коновалова // Дизайн. Теория и практика. – 2016. – № 26. – С. 50-58
4. Шумкина, М. И. Анализ экономических выгод от использования аддитивных технологий для ремонта оборудования для нефтегазового производства / М. И. Шумкина, С. Е. Федорова // Вопросы экономики и управления нефтегазовым комплексом: Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 03 июня 2021 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2021. – с. 97-100
5. Жданова, Д. Н. 3D-технологии в машиностроении / Д. Н. Жданова, Н. В. Орлов // Машиностроение: новые концепции и технологии: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23–24 октября 2019 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2019. – с. 151-154

6. Павленко, П. Ю. Технологии 3D-печати металлами / П. Ю. Павленко // Будущее машиностроения России: сборник докладов, Москва, 24–27 сентября 2018 года / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2018. – с. 632-636
7. Lemu, H.G. On Opportunities and Limitations of Additive Manufacturing Technology for Industry 4.0 Era/H.G. Lemu // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2018. – pp. 106–113
8. Pose-Rodriguez, J. Patents and additive manufacturing: Trends in 3D printing technologies [Электронный ресурс] / Javier Pose-Rodriguez, Judy Ceulemans, Yann Ménière, Aliko Nichogiannopoulou, Ilja Rudyk // European Patent Office (EPO). - Netherlands - 2020. - Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353637859_Patents_and_additive_manufacturing_Trends_in_3D_printing_technologies
9. Литунов, С. Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 / С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2016. – № 1 (145). – С. 12–17.
10. Hu, R. Selective Laser Melting under Variable Ambient Pressure: A Mesoscopic Model and Transport Phenomena / Renzhi Hu, Manlelan Luo, Anguo Huang, Jiamin Wu, Qingsong Wei, Shifeng Wen, Lichao Zhang, Yusheng Shi, Dmitry Trushnikov, V. Ya. Belenkiy, I. Yu. Letyagin, K.P. Karunakaran, Shengyong Pang // Engineering. – 2021. – Vol. 7, № 8. – P. 1157-1164. – ISSN 2095-8099. – DOI: 10.1016/j.eng.2021.07.003
11. ГОСТ 25199-82. Оборудование пылеулавливающее. Термины и определения: межгосударственный стандарт: [утверждено и введено Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31 марта 1982 г. N 1388] офиц. текст: по состоянию на 15 нояб. 2024 г. / государственный стандарт союза ССР

12. Мисюля, Д. И. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. Сер. 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – № 3. – С. 154–163.
13. V-System 3000 HEPA Cyclone Dust Collector [Электронный ресурс] / CANCAM. – URL: <https://www.cancam.ca/products/v-system-3000-hepa-cyclone-dust-collector/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный
14. StoneVac AM-11051 [Электронный ресурс] / Vaniman Manufacturing Co. – URL: <https://www.vaniman.com/product/stonevac-am-11051/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный
15. Strauss, H. AM Envelope. The potential of Additive Manufacturing for facade constructions : dissertation / H. Strauss. – Delft : TU Delft, 2013. – 270 p.
16. Baskakov, A.P. Aerodynamics and heat transfer in cyclones with particle-laden gas flow / A.P. Baskakov, V.N. Dolgov, Yu.M. Goldovin // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1990. – Vol. 3. – P. 597-602
17. Сажин Б.С. Пылеулавливание при бурении / А.С. Латкин, Б.С. Сажин, Е.Б. Шевкун. – М.: Наука, 1992. – 112 с.
18. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты газоочистки: учебное пособие / А.Г. Ветошкин. //Изд-во ПГУ, – Пенза, 2006. – 201 с
19. Циклоны НИИОГаз [Текст]: Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / Всесоюз. объединение по очистке газов и пылеулавливанию. — Ярославль: [Верх.-Волж. кн. изд-во], 1970
20. Сабуров, Э. Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э. Н. Сабуров, С. В. Карлов // — М.: Экология, 1993. — 368 с.
21. Страус, В. Промышленная очистка газов/ В. Страус // — М.: Химия, 1981. - 616 с.

22. Ужов, В. П., Вальдберг А. Ю. Подготовка промышленных газов к очистке/ В. П. Ужов., А. Ю. Вальдберг // — М.: Химия, 1975. - 216 с.
23. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей/ Н.А. Фукс // - М.: Изд. АН СССР, 1955. - 551 с.
24. Jackson, R. Mechanical equipment for removing grit and dust from gases / R. Jackson // — Leatherhead: The British Coal Research Association, 1963. — 281 p.
25. Leith, D. Cyclones // Handbook Environmental Engineering. — 1979. — v. 1. — № 5. — P. 62–100.
26. Rietema, K. Performance and design of hydrocyclones - 1П: Separating power of the hydrocyclone. // Chem. Eng. Sci, - 1961 - v.15. - №3-4. - P.310-319
27. Яременко, А. Д., Вукович, Л. К. Структура закрученного потока и взаимодействие его с внутренними стенками циклонной топки [Текст] / А. Д. Яременко, Л. К. Вукович // Изв. вузов. Энергетика. — 1974. — №10. — С. 35–37
28. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, П. Сайред //Пер. с англ. под ред. С. Ю. Крашенникова. - М.: Мир, 1987. - 588 с.
29. Алиев, Г.М.-А.. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г.М.-А. Алиев// Металлургия, Москва, 1986. - 543 с.
30. Циклоны НИИОГаз [Текст]: Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / Всесоюз. объединение по очистке газов и пылеулавливанию. — Ярославль: [Верх.-Волж. кн. изд-во], 1970. - 95 с.
31. Бутаков, С. Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции / С. Е. Бутаков // — М.: Профиздат, 1949. — 240 с.
32. Зайончковский, Я. Обеспыливание в промышленности / Я. Зайончковский. — М.: Стройиздат, 1969. — 350 с.
33. Пирумов, А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / А. И. Пирумов. — М.: Госстройиздат, 1961. — 124 с.

34. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химических технологий / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. — Л.: Химия, 1982. — 288 с.
35. Василевский, М.В. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах. Учебное пособие / М.В. Василевский, Е.Г. Зыков. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005 — с. 67-79.
36. Василевский, М.В. Обобщенные параметры, определяющие эффективность сепарации в циклонных пылеуловителях. Методы гидроаэродинамики в приложении к некоторым технологическим процессам / М.В. Василевский. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1977 — с 96 - 101.
37. Калверт, С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений / Под ред. С. Калверта и Г.М. Инглунда // М.: Металлургия, 1988. - 1470 с.
38. Сажин, Б.С., Гудим Л.И. Пылеуловители со встречными закрученными потоками // Химическая промышленность. — Москва, 1984. — №8. — с.50-54.
39. Davies, C. N. The separation of airborne dust and particles / C. N. Davies // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. — 1952. — Vol. 1B, No. 5. — P. 185–213.
40. Umney, L. E. R., National Gas Turbine Est. / L. E. R. Umney // Pyestock. Report № R33, 1948.
41. Хазбулатов, А. И. Исследование процесса очистки газа от механических примесей в прямоточно-центробежном сепараторе / Г. А. Глебов, А. И. Хазбулатов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королева (национального исследовательского университета). — 2011. — № 5 (29). — С. 72–77.
42. Хазбулатов, А. И. Разработка и исследование прямоточно-центробежного сепаратора для очистки газа от механических примесей / А. И. Хазбулатов // Научно-технический вестник Поволжья. — 2012. — № 2. — С. 35–38

43. Хазбулатов, А.И. Выбор оптимальных параметров прямоточно-центробежного сепаратора для очистки газа от механических примесей, дис. На соискание ученой степени канд. технич. наук / А.И. Хазбулатов, Казань, 2013.
44. Смульский, И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах / И. И. Смульский. – Новосибирск : Наука, 1992. – 301 с.
45. Кныш, Ю.А. Автоколебания в закрученных струях / Ю.А. Кныш, Самара: изд. Самарского научного центра РАН, 2006 – 248 с.
46. Щукин, В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов – М.Машиностроение, 1982 – 200 с
47. Асламова, В.С. Сопоставление результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления и потерь давления прямоточного циклона с промежуточным отбором с экспериментом // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. – С. 51–53
48. Ровенский, А.И. Защита атмосферы от пылегазовых выбросов при производстве основных видов огнеупоров / А.И. Ровенский, А.М. Касимов, А.Н. Почтман. М.: Металлургия, 1992. 80 с.
49. Приходько, В.П. Основные принципы создания энергосберегающих устройств циклонного типа/ В.П. Приходько, О.А. Пирогова, Е.М. Прохоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 10. – с. 32–33
50. Балтренас, П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов / П.Б. Балтренас // М.: Стройиздат, 1990. 180 с
51. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учебник для вузов / С.Б. Старк. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 400 с
52. Русанов, А.А. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. А. А. Русанова. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с
53. Hicks, T. G. Handbook of Chemical Engineering Calculations / T. G. Hicks, N. P. Chokey. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill, 2012. – 768 p.

54. Биркгоф, Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие / Г. Биркгоф // М.: Иностранная литература, 1963, 246 с
55. Крамаренко, Н. В. Обзор способов вывода критериев подобия в механике / Н. В. Крамаренко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 163–192.
56. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1948. – 1148 с.
57. Зезин, В. Г. Механика жидкости и газа : учебное пособие / В. Г. Зезин. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 250 с.
58. Зуев, Ю. В. Об использовании критерия Стокса при математическом моделировании двухфазных струйных течений / Ю.В. Зуев// Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки, 2019, том 161, книга 3, 341–354 DOI: 10.26907/2541-7746.2019.3.341-354
59. Picano, F. Anomalous memory effects on transport of inertial particles in turbulent jets/ Picano F., Sardina G., Gualtieri P., Casciola C.M. // Phys. Fluids. — 2010. — Vol. 22, № 5. — Art. 031005. — P. 1–4. — DOI: 10.1063/1.3432439
60. Picano, F. Particle-laden jets: Particle distribution and back-reaction on the flow/ Picano F., Sardina G., Gualtieri P., Casciola C.M. // J. Phys.: Conf. Ser., 2011, vol. 318, sect. 5, art. 052018, pp. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/318/5/052018
61. Zaichik, L.I., Pershukov V.A. Problems of modeling gas-particle turbulent flows with combustion and phase transitions. Review/ L.I. Zaichik, V.A. Pershukov // Fluid Dyn., 1996, vol. 31, no. 5, pp. 635–646. doi: 10.1007/BF02078213
62. Hoffmann, A. Gas Cyclones and Swirl Tubes/A. Hoffmann, L. Stein // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; pp. 1–422
63. Cortés, C., Gil, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators / C. Cortés, A. Gil // Prog. Energy Combust. Sci. 2007, 33, 409–452
64. Barth, W. Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations/ W. Barth // Brennstow-Wärme-Kraft (BWK) 1956, 8, 1–9.

65. Hoffmann, A. Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones/ A. Hoffmann, A. van Santen, R. Allen, R. Clift // Powder Technol. 1992, 70, 83–91
66. Muschelknautz, E. Untersuchungen an Zyklonen / E. Muschelknautz, K. Brunner // Chemie Ing. Tech, 39, 1967, pp. 531–538
67. Nakhaei, M. CFD Modeling of Gas–Solid Cyclone Separators at Ambient and Elevated Temperatures / M. Nakhaei, B. Lu, Y. Tian, W. Wang, K. Dam-Johansen, H. Wu // Processes. – 2020. – Vol. 8. – Art. 228
68. Baskakov, A., Dolgov, V., Goldobin, Y. Aerodynamics and heat transfer in cyclones with particle-laden gas flow / A. Baskakov, V. Dolgov, Y. Goldobin // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1990. – Vol. 3. – P. 597–602
69. Huang, Y. Effects of Cyclone Structures on the Pressure Drop Across Different Sections in Cyclone Under Gas-Solid Flow Текст / Y. Huang, X. Mo, H. Yang, M. Zhang, J. Lv // Clean Coal Technology and Sustainable Development. – Singapore: Springer, 2016. – P. 301–307
70. Ashry, E. Numerical and experimental study on the effect of solid particle sphericity on cyclone pressure drop / E. Ashry, A. Abdelrazek, K. Elshorbagy // Separation Science and Technology. – 2018. – Vol. 53. – P. 2500–2516.
71. Hwang, I. Numerical simulation of a dense flow cyclone using the kinetic theory of granular flow in a dense discrete phase model/ I. Hwang, H. Jeong, J. Hwang // Powder Technology. – 2019. – Vol. 356. – P. 129–138.
72. Bohnet, M. Influence of the gas temperature on the separation efficiency of aerocyclones / M. Bohnet // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 1995. – Vol. 34. – P. 151–156
73. Patterson, P., Munz, R. Cyclone collection efficiencies at very high temperatures/ P. Patterson, R. Munz // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1989. – Vol. 67. – P. 321–328
74. Gimbut, J. CFD Simulation of Aerocyclone Hydrodynamics and Performance at Extreme Temperature/ J. Gimbut // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 2. – P. 22–29.

75. Danyluk, S. The erosion of a Type 310 stainless steel cyclone from a coal gasification pilot plant / S. Danyluk, W. Shack, J. Park, M. Mamoun // *Wear*. – 1980. – Vol. 63. – P. 95–104
76. Лапин Ю. В. Статистическая теория турбулентности (прошлое и настоящее — краткий очерк идей). Научно-Технические ведомости, Издательство Политехнического университета, 2004, № 2(36), с. 7-20
77. Spalart, P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P. R. Spalart // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2000. – Vol. 21. – P. 252–263.
78. Юн, А. А. Теория и практика турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений / А. А. Юн. – М. : URSS, 2009. – 272 с.
79. Elghobashi, S. On predicting particle-laden turbulent flows / S. Elghobashi // *Applied Scientific Research*. – 1994. – Vol. 52. – P. 309–329.
80. Elghobashi, S. Particle-laden turbulent flows: Direct simulation and closure models / S. Elghobashi // *Applied Scientific Research*. – 1991. – Vol. 48, № 3–4. – P. 301–314. – DOI: 10.1007/BF02008202.
81. Elsayed, K. Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters / K. Elsayed, C. Lacor // *Computers & Fluids*. – 2011. – Vol. 51. – P. 48–59.
82. de Souza, F., Large Eddy Simulation of the gas-particle flow in cyclone separators / F. de Souza, R. de Vasconcelos Salvo, D. de Moro Martins // *Separation and Purification Technology*. – 2012. – Vol. 94. – P. 61–70.
83. Wasilewski, M. Characterization of multiphase gas-solid flow and accuracy of turbulence models for lower stage cyclones used in suspension preheaters / M. Wasilewski, S. Anweiler, M. Masiukiewicz // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 27, No. 7. – P. 1618–1629
84. Towler, G. Specification and design of solids-handling equipment / G. Towler, R. Sinnott // *Chemical Engineering Design*. – 2013. – P. 937–1046.

85. Shukla, S. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators / S. Shukla, P. Shukla, P. Ghosh // *Applied Mathematical Modelling*. – 2013. – Vol. 37. – P. 5774–5789
86. Zhao, B. Development of a new method for evaluating cyclone efficiency / B. Zhao // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2005. – Vol. 44. – P. 447–451.
87. Chu, K. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator / K. Chu, B. Wang, D. Xu, Y. Chen, A. Yu // *Chemical Engineering Science*. – 2011. – Vol. 66. – P. 834–847.
88. Schneiderbauer, S. A Lagrangian-Eulerian hybrid model for the simulation of industrial-scale gas-solid cyclones / S. Schneiderbauer, M. Haider, F. Hauzenberger, S. Pirker // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 304. – P. 229–240.
89. Wei, J. The gas-solid flow characteristics of cyclones / J. Wei, H. Zhang, Y. Wang, Z. Wen, B. Yao, J. Dong // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 308. – P. 178–192.
90. Kozołub, P. Numerical simulation of a dense solid particle flow inside a cyclone separator using the hybrid Euler-Lagrange approach / P. Kozołub, A. Klimanek, R. Bialecki, W. Adamczyk // *Particuology*. – 2017. – Vol. 31. – P. 170–180.
91. Sgrott, O. Influence of inter-particle collisions and agglomeration on cyclone performance and collection efficiency / O. Sgrott, M. Sommerfeld // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 97. – P. 511–522.
92. Zhou, H. Numerical study on gas-solid flow characteristics of ultra-light particles in a cyclone separator / H. Zhou, Z. Hu, Q. Zhang, Q. Wang, X. Lv // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 344. – P. 784–796.
93. Hwang, I. Numerical simulation of a dense flow cyclone using the kinetic theory of granular flow in a dense discrete phase model / I. Hwang, H. Jeong, J. Hwang // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 356. – P. 129–138.
94. Kharoua, N. Study of the Pressure Drop and Flow Field in Standard Gas Cyclone Models Using the Granular Model / N. Kharoua, L. Khezzar, Z. Nemouchi // *International Journal of Chemical Engineering*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–11

95. Shi, L. CFD simulation of the influence of temperature and pressure on the flow pattern in cyclones / L. Shi, D. Bayless, G. Kremer, B. Stuart // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2006. – Vol. 45. – P. 7667–7672.

96. Cristea, E. Coupled 3-D CFD-DDPM numerical simulation of turbulent swirling gas-particle flow within cyclone suspension preheater of cement kilns / E. Cristea, P. Conti // *Proceedings of the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2016 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2016 14th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. – Washington, DC, USA, 2016. – P. 10–14, 2016

97. Cristea, E. Hybrid Eulerian Multiphase-Dense Discrete Phase Model Approach for Numerical Simulation of Dense Particle-Laden Turbulent Flows Within Vertical Multi-Stage Cyclone Heat Exchanger / E. Cristea, P. Conti // *Proceedings of the ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting*. – Montreal, QC, Canada, 2018. – P. 15–20, 2018

98. Andrews, M. J. The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particulate flows / M. J. Andrews, P. J. O'Rourke // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – Vol. 22, № 2. – P. 379–402. – DOI: 10.1016/0301-9322(95)00072-0

99. Snider, D. M. An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows / D. M. Snider // *Journal of Computational Physics*. – 2001. – Vol. 170, № 2. – P. 523–549. – DOI: 10.1006/jcph.2001.6747

100. Tsuji, Y. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed / Y. Tsuji, T. Kawaguchi, T. Tanaka // *Powder Technology*. – 1993. – Vol. 77, № 1. – P. 79–87. – DOI: 10.1016/0032-5910(93)85010-7

101. Полиефтова, А. П. Подходы к численному исследованию циклонов-сепараторов / А. П. Полиефтова, О. И. Седяров, Н. В. Вешнева, Е. В. Отрубянников, М. А. Апарушкина // *Industrial Processes and Technologies*. – 2025. – Т. 5, № 1(15). – С. 78–99. – DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-1(15)-78-99

102. Sedlyarov, O. I. Simulation of Internal Aerodynamics of Multi-Stage Inertial and Centrifugal Dust Collectors / O. I. Sedlyarov, E. V. Otrubyannikov, A. P.

Polieftova // Fibre Chemistry. – 2022. – Vol. 53, No. 6. – P. 451-453. – DOI: 10.1007/s10692-022-10328-z

103. Autodesk [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.autodesk.com/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

104. КОМПАС [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://kompas.ru> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

105. SALOME Platform [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: https://www.salome-platform.org/?page_id=2430 (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

106. ANSYS Meshing [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.ansys.com/products/meshing> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

107. OpenFOAM [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.openfoam.com/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

108. LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.lammps.org/> (дата обращения: 04.09.2025)

109. ParaView Электронный ресурс: официальный сайт. – URL: <https://paraview.org> (дата обращения: 04.09.2025)

110. Dakota (Sandia National Laboratories) [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://dakota.sandia.gov/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

111. OpenFOAM. Руководство пользователя. Генерация сетки с помощью утилиты blockMesh [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.3-mesh-generation-with-the-blockmesh-utility#x13-410004.3> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

112. OpenFOAM. Руководство пользователя. Генерация сетки с помощью утилиты snappyHexMesh [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and->

conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

113. База данных технических параметров DB-TP-02 [Электронный ресурс] / официальный сайт. – URL: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/Ar.php> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

114. Отчет Антона Перссона по CFD-моделированию [Электронный ресурс] /PDF-документ. – URL: https://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2010/antonPersson/reportAntonPersson.pdf (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

115. Ergun, S. Fluid flow through packed columns / S. Ergun // Chemical Engineering Progress. – 1952. – P. 89–94.

116. Wen, C. Y. Mechanics of fluidization / C. Y. Wen, Y. H. Yu // Chemical Engineering Progress Symposium Series. – 1966. – Vol. 62. – P. 100–111.

117. Zhang, Y. Modeling of gas-solid flow in a CFB riser based on computational particle fluid dynamics / Y. Zhang, X. Lan, J. Gao // Petroleum Science. – 2012. – Vol. 9, № 4. – P. 535–543.

118. Yakhot, V. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory / V. Yakhot, S. A. Orszag // Journal of Scientific Computing. – 1986. – Vol. 1, № 1. – P. 3–51. – DOI: 10.1007/bf01061452

119. Matvienko, O. V. Analysis of Turbulence Models and Investigation of the Structure of the Flow in a Hydrocyclone / O. V. Matvienko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2004. – Vol. 77, № 2. – P. 316–323. – DOI: 10.1023/b:joep.0000028510.57907.87

120. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. – 1963. – Vol. 91. – P. 99–164

121. Spalart, P. R. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature / P. R. Spalart, M. Shur // Aerospace Science and Technology. – 1997. – Vol. 1, № 5. – P. 297–302. – DOI: 10.1016/s1270-9638(97)90051-1.

122. Wang, B. An GPU-accelerated particle tracking method for Eulerian–Lagrangian simulations using hardware ray tracing cores / B. Wang, I. Wald, N.

Morriscal, W. Usher, L. Mu, K. Thompson, R. Hughes // Computer Physics Communications. – 2022. – Vol. 271. – Art. 108221. – ISSN 0010-4655

123. cudaParticlesFoam [Электронный ресурс] / репозиторий на GitHub. – URL: <https://github.com/simzero/cudaParticlesFoam> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

124. Faiss: Сравнение GPU и CPU [Электронный ресурс] / документация на GitHub. – URL: <https://github.com/facebookresearch/faiss/wiki/Comparing-GPU-vs-CPU> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

125. Casal J. Cálculo y diseño de ciclones. En: Ingeniería Química / J. Casal, J.M. Martínez-Benet // Ingeniería Química. – Madrid, 1989

126. Марочник сталей и сплавов / Сост.: А.С. Зубченко и др. Под ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 782 с.: ил., табл. – ISBN 5-217-03177-8

127. Арзамасов, Б. Н. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьева, С. А. Герасимов и др.; под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 640 с.

128. HEPA-фильтр для StoneVac (запасной) [Электронный ресурс] / Vaniman Manufacturing Co. – URL: <https://www.vaniman.com/product/replacement-hepa-filter-97001/> (дата обращения: 04.09.2025). – Артикул: 97001. – Цена: 91.91 долл. США. – Текст: электронный

129. 3D-принтер Farsoon FS273M [Электронный ресурс]/ Farsoon Technology. – URL: <https://www.farsoon-gl.com/products/fs273m/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

130. Анализатор частиц BetterSize S3 Plus [Электронный ресурс]/ BetterSize Instruments. – URL: <https://www.bettersizeinstruments.com/products/bettersizer-s3-plus/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

131. BetterSize S3 Plus [Электронный ресурс] / BetterSize Instruments. – Режим доступа: <https://www.bettersizeinstruments.com/products/bettersizer-s3-plus/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

132. Российская Федерация. Законы. Об охране атмосферного воздуха [Текст]: федер. закон: [принят Гос. Думой 04.05.1999 года: одобр. Советом Федерации 22 апреля 1999 г.] [Электронный ресурс]/ – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102059495> – Текст: электронный

133. Собственное производство [Электронный ресурс]/ MC-EN. – URL: <https://www.mc-en.ru/ownproduction> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

134. Часто задаваемые вопросы [Электронный ресурс]/ Gas-Cleaning. – URL: https://gas-cleaning.ru/faq?&page_faq=2 (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

135. Услуги завода [Электронный ресурс]/ KBЗР. – URL: <https://www.kvzr.ru/uslugi-zavoda.html> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

136. E-Formula [Электронный ресурс]/ E-Formula. – URL: <https://e-formula.ru/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

137. Муссон [Электронный ресурс]/ Муссон. – URL: <https://musson-mari.ru/> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

138. Экономические науки [Электронный ресурс]/ ИТМО. – URL: https://openbooks.itmo.ru/read_economics/19283/19283.pdf (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный.

139. Голубев С. Аддитивные технологии в производственных процессах [Электронный ресурс] // Medium. – URL: <https://golubevsergey.medium.com/аддитивные-технологии-в-производственных-процессах-2a64f4fa2123> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст : электронный

140. Любимый Н.С. Оценка экономической эффективности технологии изготовления композитных металл-металлополимерных деталей в сравнении с аддитивной и субтрактивной технологиями/ Н.С. Любимый, А.А. Польшин, А.А.

Тихонов, С.И. Анциферов, М.Д. Герасимов, Н.А. Мелентьев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 5. – С. 91–105

141. HeadHunter [Электронный ресурс] /: сайт. – URL: <https://hh.ru> (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

142. DynamicStudio IPI: определение размеров с помощью метода интерферометрической визуализации частиц [Электронный ресурс]/ Октава. – URL:

https://octava.ru/catalog/sistemy_dlya_issledovaniya_potokov_zhidkostey_i_gazov/sistemy_issledovaniy_razmerov_chastits_i_geometrii_raspyla/dynamicstudio_ipi_opredelenie_razmerov_s_pomoshchyu_metoda_interferometricheskoy_vizualizatsii_chast/ (дата обращения: 04.09.2025). – Текст: электронный

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методы порошковой печати

Методы порошковой печати металлами					
	SLS	SHS	SLM	DMLS	EBM
1 Метод печати	Частицы порошка покрываются слоем полимера помещаются в прогретую камеру при помощи валика. Лазер спекает только участки, соответствующие сечению модели на этом слое	Повторяет SLS-метод, но для спекания используется тепловая печатающая головка	Металлические частицы помещаются на поверхность и свариваются друг с другом при помощи лазера. Плавление происходит в герметичной камере, заполненной инертным газом - аргоном или азотом со сверхмалыми примесями кислорода	В качестве нагревательного элемента используются оптоволоконные лазеры мощностью порядка 200 Вт	Для расплавления порошка используется управляемый поток электронов. Поток фокусируется и позиционируется с помощью управляемого магнитного поля. Печать происходит в вакууме при высокой температуре (700-1000 °C)
2 Постобработка	Требуется запекание и устранение шероховатостей	Требуется запекание и устранение шероховатостей	Требуется запекание	Не требуется, ситуативно применяется запекание	Не требуется
3 Ключевые недостатки (относительно других методов)	Высокие затраты энергии на прогрев камеры и порошка	Ограничен ассортимент материалов, не подходит для тугоплавких металлов	Повышенная пористость из-за сферондизации	Повышенная пористость (низкая прочность) изделий. Максимальный размер изделия 6 см в диаметре и 3 см в высоту	Высокие затраты энергии, высокая сложность и стоимость оборудования, необходимость изолировать изделие
4 Достоинства метода (относительно других методов)	Широкий выбор материала, отсутствие подпорок, возможно повторного использования порошков	Метод, уступающий SLS	Возможно создание объектов с закрытыми полостями, создание изделий с большой площадью, но малым объемом	Позволяет печатать объекты очень малых размеров (толщина слоя 1-5 нм)	Высокая прочность готовых изделий, высокая скорость печати

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Координаты для построения параметрического циклона

Таблица 1. Координаты для построения параметрического циклона

№п/п	Точка	Координаты	№п/п	Точка	Координаты
1	D	0.14	27	X9	0
2	s	0.0001	28	Y9	0
3	X1	0	29	Z9	0
4	Y1	0	30	X10	0
5	Z1	$2.14*D+0.46*D-0.11*D+0.18*D$	31	Y10	0
6	X2	$0.19*D/2$	32	Z10	$2.14*D+0.46*D$
7	Y2	0	33	X11	$0.18*D/2$
8	Z2	$2.14*D+0.46*D-0.11*D+0.18*D$	34	Y11	0
9	X3	$0.19*D/2$	35	Z11	$2.14*D+0.46*D$
10	Y3	0	36	X12	$(D/2)+(0.18*D)$
11	Z3	$2.14*D+0.46*D-0.6*D$	37	Y12	0
12	X4	$(0.19*D/2)+s$	38	Z12	$2.14*D+0.46*D$
13	Y4	0	39	X13	$-1.0*D/2$
14	Z4	$2.14*D+0.46*D-0.6*D$	40	Y13	0
15	X5	$(0.19*D/2)+s$	41	Z13	$2.14*D+0.46*D$
16	Y5	0	42	a	$-0.43*D$
17	Z5	$2.14*D+0.46*D$	43	b	$0.18*D$
18	X6	$D/2$	44	h _v	$0.6*D$
19	Y6	0	45	R _v	$(D/2)+(0.18*D/2)$
20	Z6	$2.14*D+0.46*D$	46	h _{pat}	$0.2*D$
21	X7	$D/2$	47	X14	0
22	Y7	0	48	Y14	0
23	Z7	$2.14*D$	49	Z14	$-0.2*D$
24	X8	$0.37*D/2$	50	R _{bun}	$0.61*D$
25	Y8	0	51	H _{bun}	$0.81*D$
26	Z8	0			

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты проведения эксперимента

Таблица 1. Результаты взвешивания пыли, бункера и бункера с пылью

№ п/п	Вес пустого бункера	Δa_1	Вес пыли 1	Δa_2	Вес бункера с пылью	Δa_3	Вес пыли 2	Δa_4
1	1,573	0,002	0,108	0,002	1,678	-0,003	0,105	-0,001
2	1,571	0,000	0,105	0,001	1,676	-0,001	0,105	-0,001
3	1,571	0,000	0,105	0,001	1,676	-0,001	0,105	-0,001
4	1,570	0,001	0,105	0,001	1,672	0,003	0,102	0,002
5	1,572	0,001	0,107	0,001	1,674	0,001	0,102	0,002
$\bar{x}$	1,571		0,106		1,675		0,104	

S_n

0,001

0,001

0,002

0,001

	№п/п	Вес пустого бункера	Δa_1	Вес пыли 1	Δa_2	Вес бункера с пылью	Δa_3	Вес пыли 2	Δa_4
	1							0,105	-0,001
	2	1,571	0,000	0,105	0,001	1,676	-0,001	0,105	-0,001
	3	1,571	0,000	0,108	0,001	1,676	-0,001	0,105	-0,001
	4	1,570	0,001	0,105	0,001				
	5	1,572	0,001	0,107	0,001	1,674	0,001		
	$\bar{x}$	1,571		0,106		1,675		0,105	
дисперсия:		0,617		0,003		1,403		0,005	
ср. кв. откл-е		0,786		0,053		1,185		0,073	
		0,351		0,024		0,530		0,033	
	2,778	0,976		0,023		0,012		0,000	
	S_n		0,001		0,001		0,001		0,001
кр.Стьюд.	2,78	при P=0,95							
	Δx		0,002		0,003		0,003		0,003
результат:		1,571 ±0,002		0,106 ±0,003		1,675 ±0,003		0,105 ±0,003	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт об использовании результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
- директор ИМИМ

И.А. Иванов

2025 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Полиефтовой Анны Павловны

АО «НПО «ЦНИИТМАШ» подтверждает, что результаты научных исследований Полиефтовой Анны Павловны, изложенные в научных публикациях и диссертационной работе, выполненной на кафедре Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности института химических технологий ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», были использованы при проектировании аппарата селективного лазерного плавления методом послойного синтеза.

Предложенная конструкция инерционного пылеуловителя показала высокую эффективность очистки запыленного аргона в камере принтера от частиц титана, что позволило существенно улучшить качество готовых изделий.

Согласовано зам.директора ИМИМ по новым технологиям



А.В. Юдин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении результатов работы в учебный процесс

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Российский государственный
университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

А К Т

№ _____

Москва

О внедрении результатов работы в учебный
процесс университета

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор по
образовательной деятельности
ФГБОУ ВО «РГУ им. Косыгина»
С.Г. Дембицкий

« 20 » _____ 2025 г.



Настоящий акт свидетельствует о внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационного исследования Полиефтовой Анны Павловны.

Результаты, представленные в работе Полиефтовой Анны Павловны, имеют теоретическое и практическое значение и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина» для студентов 3 курса бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника (Промышленная теплоэнергетика)» в учебной дисциплине «Математическое моделирование в теплофизике и теплоэнергетике», а также для студентов 3 и 4 курса бакалавриата по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность (Инжиниринг техносферы, системы безопасности и экспертиза)» в учебных дисциплинах «Основные процессы и техника защиты окружающей среды», «Основы моделирования технологических процессов и аппаратов».

Результаты были внедрены кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности.

Дата и номер протокола заседания кафедры ЭТПЭБ: протокол №5 от 22.11.2024

Декан института

«Химических технологий и промышленной экологии»

Заведующий кафедрой ЭТПЭБ

И.Н. Бычкова

О.И. Седяров

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении результатов работы в учебный процесс

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Российский государственный
университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

А К Т

№ _____

Москва

О внедрении результатов работы в учебный
процесс университета

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор по
образовательной деятельности
ФГБОУ ВО «РГУ им. Косыгина»
С.И. Дембицкий

« 20 » _____



Настоящий акт свидетельствует о внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационного исследования Подишефтовой Анны Павловны.

Результаты, представленные в работе Подишефтовой Анны Павловны, имеют теоретическое и практическое значение и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина» для студентов 1 и 2 курса магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность ("Моделирование техносферных процессов и систем")» в учебных дисциплинах «Моделирование процессов и технологий защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты промышленных производств», «Прогнозирование и оценка последствий негативного воздействия на окружающую среду».

Результаты были внедрены кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности.

Дата и номер протокола заседания кафедры ЭТПЭБ: протокол №5 от 22.11.2024

Начальник отдела магистратуры

Заведующий кафедрой ЭТПЭБ

Е.С. Бокова

О.И. Седяров

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении результатов работы в учебный процесс

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Российский государственный
университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

А К Т

№ _____

Москва

О внедрении результатов работы в учебный
процесс университета

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор по
образовательной деятельности

ФГБОУ ВО «РГУ им. Косыгина»

С.Г. Дембинский

« 20 »

09

2025 г.



Настоящий акт свидетельствует о внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационного исследования Полиефтовой Анны Павловны.

Результаты, представленные в работе Полиефтовой Анны Павловны, имеют теоретическое и практическое значение и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина» для подготовки аспирантов по направлению подготовки 05.06.01 «Науки о Земле» в учебных дисциплинах «Современные технологии защиты окружающей среды», «Методы обеспечения экологической безопасности», «Экологические аспекты проектирования предприятий», а также по направлению подготовки 2.6.13 «Процессы и аппараты химических технологий» в учебных дисциплинах «Процессы и аппараты химических технологий», «Математическое моделирование процессов химической технологии».

Результаты были внедрены кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности.

Дата и номер протокола заседания кафедры ЭТПЭБ: протокол №5 от 22.11.2024

Начальник отдела аспирантуры и докторантуры

Шитова Т.И. Шитова

Заведующий кафедрой ЭТПЭБ

Седяров

О.И. Седяров