

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

Научный руководитель – **Седляров Олег Иванович** – доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»

Официальные оппоненты: **Таранцев Константин Валентинович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Чесноков Юрий Георгиевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры процессов и аппаратов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технологический университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева»)

Защита состоится «23» декабря 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.11 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. СПб, ул. Ивана Черных, д. 4, <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095 Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении учёных степеней).

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент
Соколова Виктория Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Витаяющие 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту и общие сведения по работе.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области пылеулавливания для очистки газового объема камер аппаратов селективного лазерного сплавления.

Дана краткая характеристика процесса селективного лазерного сплавления, проходящего в инертной среде (аргон), при температуре порядка 550°K и давлении более 150 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 головки принтера.

Приведен обзор существующих сухих пылеуловителей, в результате анализа было сделано предположение о применимости конусной конструкции циклона (серии СДК-ЦН-34 НИИОГАЗ) для очистки газового объема камеры аппарата селективного лазерного сплавления.

Вместе с тем, имеющиеся рекомендации по проектированию циклонов применимы для конкретных технологических систем, а их обобщение и перенос на другие системы и масштабы практически трудно реализуем.

Во **второй главе** приведен аналитический обзор имеющихся методик оценки параметров циклона и их влияния на эффективность пылеулавливания. Расчет нового диаметра проводился методом последовательных приближений с учетом характеристик пыли. Результаты расчета параметров циклона представлены на рисунке 1.

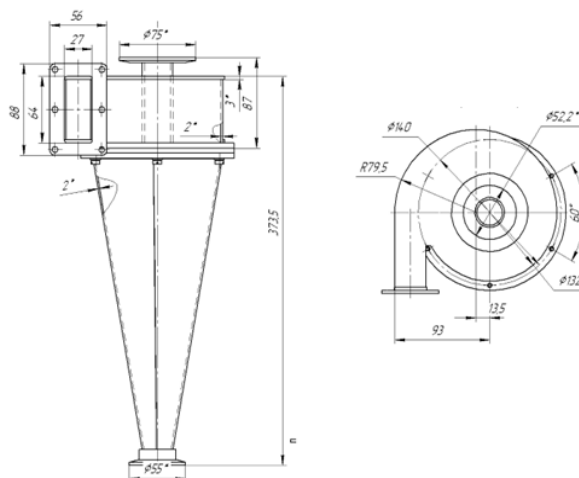


Рисунок 1. Конструкция циклона серии СДК-ЦН с указанием новых размеров

Расчет эффективности циклона (η) проводился по методике предложенной Хиксом. Расчетная эффективность составляет 99,13%. Расчетный минимальный размер частиц был проведен согласно пособию Ветошкина А.Г. и равен 4,17 мкм.

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 твердой 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 главе приведен обзор математических моделей, позволяющих описывать сложные многофазные турбулентные закрученные потоки и моделей взаимодействия газа с твердыми частицами, и твердых частиц между собой. Представлены достоинства и недостатки существующих моделей турбулентности. Выявлено, что для численного исследования внутренней аэродинамики циклона с учетом взаимодействия частиц со средой наиболее рациональными являются гибридный метод MPPIC и метод DPM.

На основе анализа, автором сделано предположение о возможности рационализации расчета, путём уточнения модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона. Уточненная модель должна сочетать в себе эффективность более требовательных к решению задачи моделей и при

этом учитывать потребность в оценке разных режимов пыления и разного дисперсного состава поступающих в циклон частиц.

В третьей главе приведены исследования по уточнению модели турбулентного движения двухфазного течения внутри циклона для получения данных о фракционной эффективности работы циклона. В качестве решателя было выбрано ПО с открытым исходным кодом OpenFOAM версии 22.12. Данный продукт использовался для генерации сетки, а также для непосредственного моделирования задачи. Для генерации сетки был выбран инструмент blockMesh и snappyHexMesh.

Для построения параметрической CAD модели также было выбрано ПО с открытым исходным кодом Salome.

Качество сетки определяет качество решения, ибо влияет на стабильность и сходимость моделирования. 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 моделирования не на прямую коррелируют с размером сеток. В литературе приводятся лишь отрывочные данные о требуемых размерах ячеек, в этой связи были созданы несколько вариантов сетки (рисунок 2), для последующей её калибровки. После проведения калибровки была выбрана сетка, представленная на рисунке 2а.

Скорректирована подмодель впрыска, так как в случае использования стандартной подмодели впрыска частиц 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.

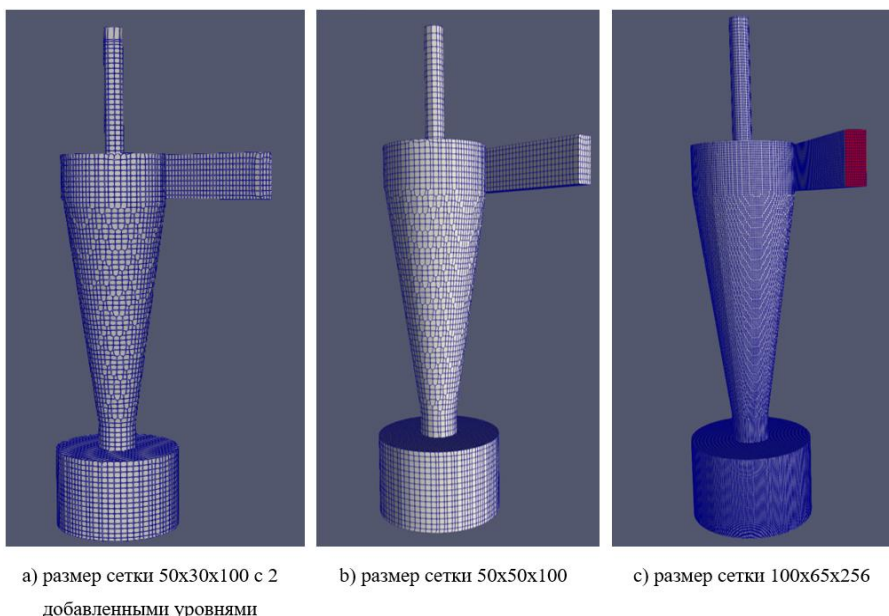


Рисунок 2. Построенная сетка утилитами blockMesh и snappyHexMesh

Приводится обоснование решателя и его модификации, а также параметров моделирования. В качестве решателя использовался метод MPPIC

(гибридная модель) и DPM (модель Эйлера-Лагранжа), являющиеся подходящими по вычислительным затратам и точности моделирования.

Течение газа в данном случае описывается системой уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \rho + \rho \nabla \cdot u = 0 \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u + \nabla p = \nabla \cdot \tau \\ \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)e + p \nabla \cdot u = \Phi - \nabla \cdot q \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \text{div} \vec{u} \right), \quad (2)$$

$$p = \rho R T \quad (3)$$

где u – скорость газа, ∇ – оператор набла, Φ – диссипативная функция, τ – тензор вязких напряжений, μ – динамическая вязкость, e – внутренняя энергия единицы массы вещества, q – тепловой поток, ρ – плотность газа, t – время. τ_{ij} – тензор вязких напряжений, μ – коэф. динамической вязкости, ε_{ij} – тензор скорости деформации, p – давление газа, R – удельная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

В качестве модели сопротивления выступает уточненная объединенная модель Ergun и Wen-Yu, учитывающая объемную долю частиц:

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

$$D_1 = 0.75 C_d \frac{\rho_g |u_g - u_p|}{\rho_p d} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p |u_g - u_p|}{\mu_g} \quad (5)$$

$$D_2 = \left(\frac{180 \theta_p}{\theta_g Re} + 2 \right) \frac{\rho_g |u_g - u_p|}{\rho_p d} \quad (6)$$

При $\theta_p < 0.75 \theta_{CP}$, $D = D_1$

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

При $\theta_p > 0.85 \theta_{CP}$, $D = D_2$

где C_d – коэффициент сопротивления; D – сила сопротивления, D_1 – сила сопротивления в модели Wen-Yu, D_2 – сила сопротивления в модели Ergun; 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 – объемные доли газа и частиц, θ_{CP} – объемная доля частиц и фазы.

Введение поправочных коэффициентов (уравнение 6) 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.

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

$$\tau_c^t = -\alpha_c \rho_c R_{c,ij} = -\alpha_c \left[-\frac{2}{3} (\rho_c k_c + \mu_{t,c} \nabla \cdot u_c) \delta_{ij} + \mu_{t,c} (\nabla u_c + \nabla u_c^T) \right] \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c k_c) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_c \rho_c u_c k_c) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_c \Gamma_k \frac{\partial k_c}{\partial x_j} \right) + \alpha_c f_r G_k - \alpha_c Y_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c \omega_c) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_c \rho_c u_c \omega_c) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_c \Gamma_\omega \frac{\partial \omega_c}{\partial x_j} \right) + \alpha_c f_r G_\omega - \alpha_c Y_\omega \quad (9)$$

где f_r – корреляция кривизны, $\Gamma=2\pi U_0$ – циркуляция в азимутальном течении, выступающий эффективным коэффициентом диффузии, α – объемная доля, k_c – кинетическая энергия турбулентности, G – генерация уд. скорости диссипации, Y – диссипация, ω – удельная скорость диссипации.

Коррекция вращения происходит в соответствии с уравнением:

$$e \equiv \frac{1}{2S_{mn}S_{mn}} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial U_k}{\partial x_i} + 2\varepsilon_{lki}\Omega_l \right] S_{jk} \left(\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_0[\varepsilon_{iop}S_{jp} + \varepsilon_{jop}S_{ip}] \right) \quad (10)$$

где $S_{ij} = \partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i$ – тензор деформации, Ω – частота вращения системы, $\varepsilon_{ijk} = (i-j)(j-k)(k-i)$ – переменный тензор, ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

В качестве моделей турбулентности были протестированы модель LES с подсеточными моделями Смагоринского 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). Результаты приведены в таблице 1, модели расположены в порядке возрастания вычислительных требований.

Таблица 1. 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

Исходя из полученных данных, в качестве модели турбулентности для дальнейшего моделирования предложен метод крупных вихрей LES с уточненной подсеточной моделью k-ε RNG:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u k}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v k r}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_k}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial \rho u \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v \varepsilon r}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \\ G_k &= \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(r \frac{\partial w / r}{\partial r} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$C_{1RNG} = \frac{\eta(\eta_0 - \eta)}{\eta_0(1 + \beta\eta^3)} \quad (12)$$

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.

Как видно из вышеизложенного материала, уточнение производится путём корректировки коэффициентов турбулентной вязкости, диссипации и скорости затухания.

При обработке результатов моделирования были получены следующие зависимости (рисунок 3), из которых следует, что решатель DPM более предпочтителен для низкой загрузки частиц в циклонах.

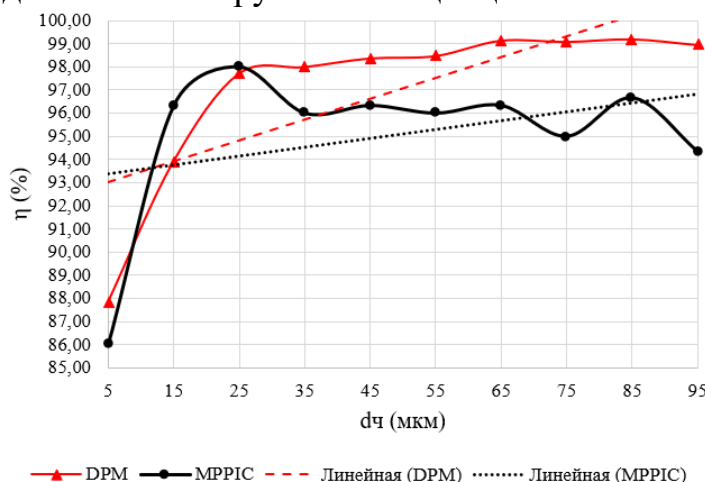


Рисунок 3. Сравнение данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателей DPM и MPPIC.

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 (рисунок 4). Сравнение показало небольшое снижение эффективности в ходе работы аппарата с 97,07% до 96,52 %.

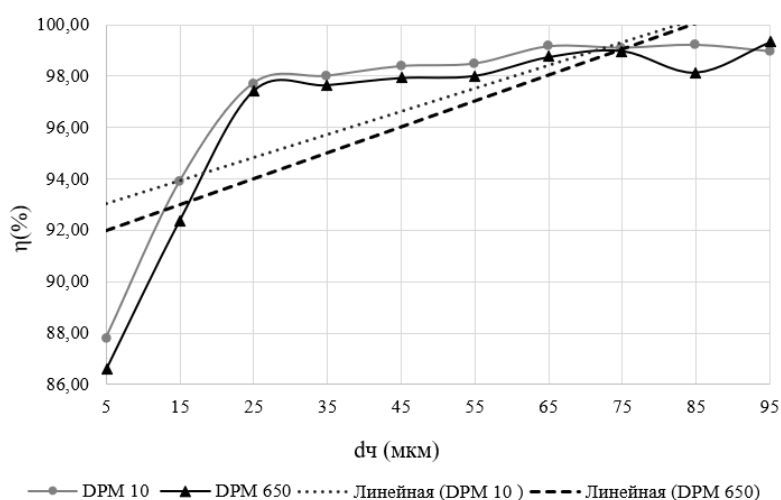


Рисунок 4. Сравнение данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 25 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателя DPM по прошествии 10 и 650 секунд моделирования

Далее проводилось моделирование для большего числа частиц, улавливаемых циклоном. Разница загрузок, как и необходимость моделирования разного количества частиц, объясняется нестабильностью распределения размера и количества частиц в потоке в процессе печати, для чего потребовалось внесение корректировок в стандартный решатель (рисунок 5b).

Частицы при решении, как правило, количественно распределены со сдвигом в сторону математического ожидания (рисунок 5, а), при

моделировании автором было задано точное число частиц определенного диаметра в потоке (рисунок 5, b).

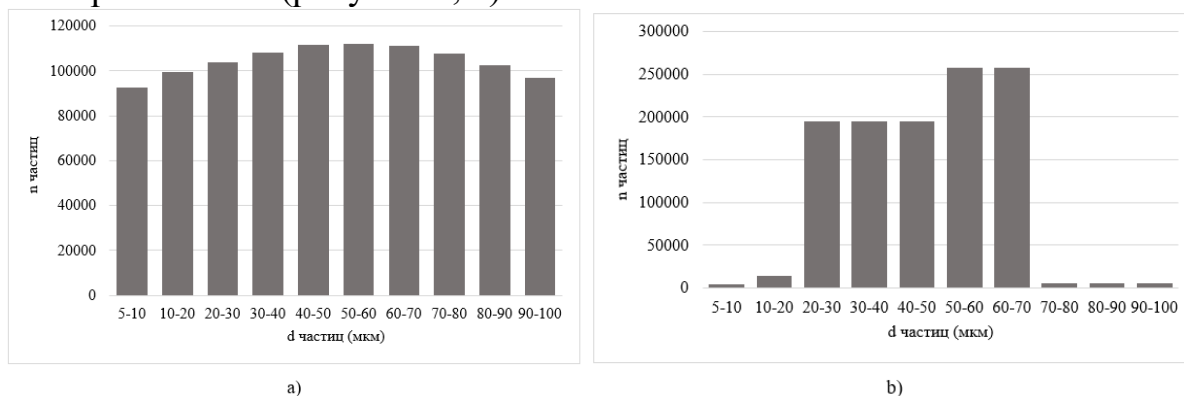


Рисунок 5. а) распределение размера частиц с помощью задания медианного диаметра; б) распределение размера частиц при точном указании количества частиц требуемого диаметра

Результат моделирования (рисунок 6) показывает, что при большем числе частиц в потоке методы MPPIC и DPM дают схожие результаты, при этом метод MPPIC требует меньше вычислительных мощностей, что делает его более предпочтительным при решении задач с высокой загрузкой частиц.

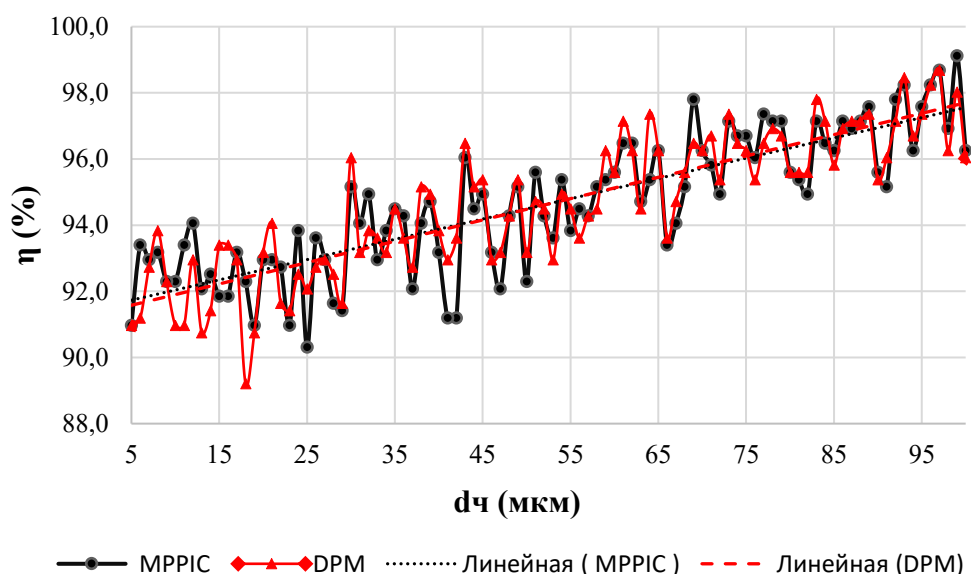


Рисунок 6. Сравнение данных о фракционной эффективности циклона при поступлении 1 135 000 частиц в секунду, полученных с использованием решателя DPM и MPPIC

Исходя из полученных данных, эффективность сепарации циклоном частиц от 5 до 100 мкм при заданных условиях, согласно расчету, составит 95,5%. Показано, что при заполнении бункера эффективность пылеулавливания снижается.

Четвертая глава посвящена практическим аспектам разработки циклона. Приведены сборочные элементы циклона, выполнен подбор подходящих марок конструкционных сталей (наиболее оправданной выбрана нержавеющая сталь 08X18H10).

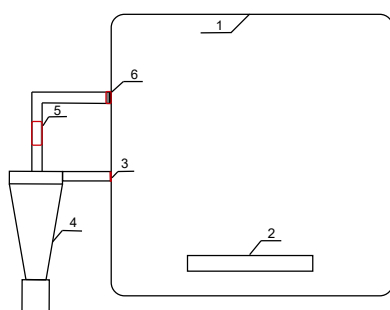
Готовый циклон монтируется к камере принтера (рисунок 7а) для осуществления непосредственной очистки запыленного газа при печати. Из-за наличия рециркуляции газа в камере аппарата селективного лазерного

сплавления систему необходимо дополнять фильтрами для устранения вторичного загрязнения газа.

Для оценки эффективности циклона был создан промышленный образец, с помощью которого был выполнен эксперимент по оценке эффективности пылеулавливания циклоном. Процедура выполнения эксперимента состояла из отбора пробы порошка титана, прибывающего в камере принтера во время печати. Затем бункер-накопитель был отделен от циклона с целью контрольного взвешивания. После выполненного замера бункер был прикреплен к телу циклона.

Навеска вносилась в камеру после запуска аппарата селективного лазерного сплавления перед началом печати. 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 121,590 кПа, инертный газ в камере принтера – аргон. 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. По результатам проведенного эксперимента циклоном было уловлено 99% пыли.

Результаты работы были использованы при разработке циклона, предназначенного для очистки газового объема камеры аппарата селективного лазерного сплавления АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (г. Москва), вид готового изделия представлен на рисунке 7б.



а)



б)

Рисунок 7. а) Схема расположения циклона, 1 – камера принтера, 2 – стол печати, 3 – заслонка, 4 – циклон, 5 – каналный вентилятор, 6 – фильтр,

б) вид готового изделия

Анализ формы и размера улавливаемых частиц (рисунок 8) был проведен методом лазерной дифракции. Установленный размер частиц, поступающих в циклон, варьируется от 5 до 200 мкм.

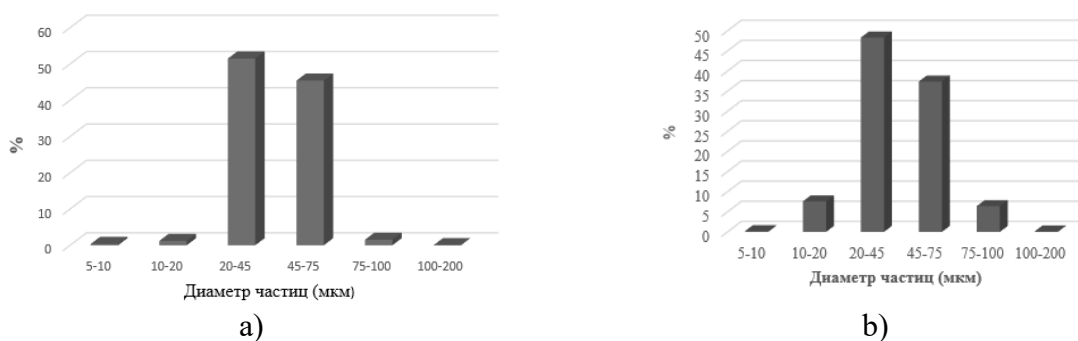


Рисунок 8. Дисперсный состав частиц порошка титана до (а) и после(б) проведения очистки

Проведена оценка экономического эффекта внедрения предлагаемого оборудования. Капитальные затраты на изготовление циклона в ценах по состоянию на июнь 2024 года составили 120 тыс. рублей, а издержки на его функционирование не превышают 1,5 руб./ч.

Кроме того, достигается экономия минерально-сырьевых и природных ресурсов, увеличивается эксплуатационный ресурс печатающего оборудования, повышается качество производимых изделий и, как следствие, экономия на последующей обработке конечных изделий, поскольку каждый час обработки конечных изделий связан с финансовыми издержками, оцениваемыми ориентировочно затратами от 69 396 до 92 484 руб. в расчете на одну трудовую единицу (без учета стоимости оборудования, ввиду невозможности полного отказа от постобработки готовых изделий). Таким образом, работа циклона окупается при первой же печати изделия.

Помимо этого, внедрение замкнутого контура циклонного пылеулавливания уменьшает негативную нагрузку предприятия на окружающую среду и 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-ε 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.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus:

1. 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

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

2. Полиефтова, А. П. Подходы к численному исследованию циклонов-сепараторов / А. П. Полиефтова, О. И. Седляров, Н. В. Вешнева, Е. В. Отрубьянников, М. А. Апарушкина // Промышленные процессы и технологии. – 2025. – Т. 5, № 1(15). – С. 78–99. – DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-1(15)-78-99

3. Полиефтова, А. П. Численное исследование эффективности циклонов, применяемых в аппаратах послойного синтеза методом селективного лазерного сплавления / А. П. Полиефтова, О. И. Седляров, Е. В. Отрубьянников // Промышленные процессы и технологии. – 2025. – Т. 5, № 3(17) – С. 82–91. DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-3(17)-82-91

Статьи в других научных изданиях, сборниках научных трудов, материалов конференций:

4. Полиефтова, А.П. Численное моделирование процессов пылеулавливания в сухих гравитационных и инерционных пылеуловителях с использованием свободного программного обеспечения / А.П. Полиефтова, О. И. Седяров [и др.] // Дизайн и технологии. – 2018. – № 67(109). – С. 81–87
5. Полиефтова, А. П. Моделирование внутренней аэродинамики инерционных пылеуловителей для установок послойного синтеза методом селективного лазерного плавления / А. П. Полиефтова, О. И. Седяров, Е. С. Бородин, [и др.] // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование : сб. науч. тр. Международного научно-технического симпозиума «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. Том 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – С. 147–151
6. Полиефтова, А. П. Использование инерционных пылеуловителей в аддитивном производстве / А. П. Полиефтова, О. И. Седяров // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020): сб. материалов Всероссийской науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием, посвященной Юбилейному году в ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Москва, 14–16 апреля 2020 года. Том Часть 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – С. 100–103
7. Полиефтова, А. П. Подготовка к моделированию – определение физических параметров для процесса лазерного осаждения металлической проволоки / О. И. Седяров, А. П. Полиефтова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 12 ноября 2020 года. Том Часть 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – С. 62–64
8. Полиефтова, А. П. Численное моделирование внутренней аэродинамики многоступенчатых инерционных и центробежных пылеулавливающих аппаратов с использованием свободного программного обеспечения / А. П. Полиефтова, Е. В. Отрубянных, А. А. Костров, О. И. Седяров // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS “EESTE-2021”) : сб. науч. тр. Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Планошкого, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 20–21 октября 2021 года. Том 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – С. 106–109. – DOI 10.37816/eeste-2021-2-106-109.
9. Полиефтова, А. П. Особенности CFD моделирования инерционных пылеуловителей, функционирующих при повышенных температурах / А. П. Полиефтова, О. И. Седяров, А. В. Якутов, А. И. Понкратова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022): сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 2022