

На правах рукописи



Тулубаев Роман Ринатович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО
ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО
АППАРАТА**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шваб Александр Вениаминович

Официальные оппоненты:

Терехов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термозагазованности, главный научный сотрудник

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор

Глазунов Анатолий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория проектирования рабочих элементов ракетно-космической техники Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, заведующий лабораторией

Защита состоится 10 февраля 2023 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.1.01», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 10 ТГУ, компьютерный класс № 1).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/e528fe15-2ff4-49e8-9c1d-07975a684c2f>

Автореферат разослан «___» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На текущий момент, потребность в получении мелкодисперсных порошков фиксированного размера испытывают очень много различных отраслей промышленного сектора, такие как порошковая металлургия, авиация, атомная промышленность, химическая промышленность, автомобилестроение, приборостроение, аддитивные технологии и многие другие отрасли промышленности. Обозначенная потребность в получении мелкой фракции порошков заданного размера как раз-таки послужила причиной для значительного роста и развития всех этих областей, особенно ярко выражено это было у аддитивных технологий, которые чаще всего были на слуху в последнее время. За последние 20 лет, сфера аддитивных технологий совершила существенный рост, ведь уже сейчас на основе аддитивных аппаратов производятся инструменты, различные детали ракет, авиалайнеров, спутников, подводных лодок, имплантов, протезов и ювелирных изделий и множество других изделий.

Однако для производства качественных изделий, здесь, как и во всех других областях, ключевое место занимает качество исходного материала. И здесь обозначается одна из основных проблем в порошковой технологии – возможность получения мелкодисперсных порошков с высокой степенью эффективности разделения на заданные фракции частиц по конкретному размеру.

Усовершенствование пневматических способов переработки порошковых материалов невозможно без проведения фундаментальных исследований аэродинамики однофазных и многофазных сред. Проведение экспериментальных исследований в этой области является достаточно трудозатратным занятием, поэтому наиболее перспективным и экономичным способом исследования процессов в процессе переработки дисперсных сред пневматическим методом являются численные методы [4, 5]. Особенно актуальным это является в современное время, так как вычислительные мощности компьютеров растут очень быстро, это позволяет достаточно быстро получать полезную информацию о моделируемом явлении или процессе.

Представленная диссертационная работа посвящена численному моделированию аэродинамики закрученного турбулентного течения в различных вихревых камерах центробежных классификаторов.

Целью представленной работы является моделирование двухфазного турбулентного закрученного течения в сепарационных камерах центробежных аппаратов, адекватно описывающих процесс фракционного разделения мелкодисперсных порошков. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1) Численное моделирование аэродинамики закрученного турбулентного потока, применительно к вихревой камере пневматического центробежного аппарата, разработанного в НИ ТГУ и защищенного патентом [1].

2) Создание математической модели двухфазного закрученного течения с использованием траекторного метода расчета движения частиц в центробежном аппарате.

3) Численное моделирование закрученного турбулентного течения в сепарационных камерах, предлагаемых перспективных и оригинальных геометрий для получения более однородного баланса центробежных и аэродинамических сил.

4) Проведение численных расчетов двухфазных закрученных течений на основе траекторного подхода, для предлагаемых оригинальных геометрических областей.

Методы исследования. Математическое моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения проводится путем численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкание которой производится на основе известной двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности Уилкокса. Численное решение замкнутых уравнений Рейнольдса проводится в переменных «скорость давление» на разнесенной разностной сетке с использованием метода физического расщепления полей скорости и давления. Расчет траекторий движения частиц осуществлялся на основе

дискретно-траекторного подхода с учетом влияния турбулентных пульсаций со стороны несущей среды на твердые сферические частицы, предполагая, что на них действуют только центробежная, инерционная, гравитационная и аэродинамическая силы.

Научная новизна.

1) Представлены новые физико-математические постановки задач для закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в модифицированной геометрии ротора существующей установки, а также для принципиально новой сепарационной камеры.

2) В результате проведенного численного исследования аэродинамики закрученного турбулентного течения, получены новые результаты распределения полей вектора скорости и давления, для всех рассматриваемых вариантов геометрии вихревой камеры.

3) Получены новые результаты распределения траекторий движения частиц в поле действия аэродинамической, центробежной, гравитационной и инерционной сил для рассматриваемых геометрий вихревой камеры.

4) На основе полученных траекторий движения частиц впервые были построены кривые распределения Тромпа, для оценки эффективности процесса сепарации частиц в данной физико-математической постановке задачи.

5) Впервые, проведено качественное сравнение остроты сепарации различных форм ротора (прямоугольная и трапецеидальная формы лопаток ротора) для комбинированного пневматического аппарата, расположенного в НИИ ПММ ТГУ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов следует из корректности физико-математических постановок задач, из тестовых исследований, непротиворечивости полученных результатов физическим принципам, а также из сравнения полученных решений с имеющимися экспериментальными данными и другими способами решения.

Практическая ценность работы.

1) Предложенная модификация существующей установки может позволить увеличить эффективность процесса классификации и сепарации частиц за счет создания дополнительного перепада давления, путем изменения формы лопаток ротора с прямоугольной на трапецеидальную, и, как следствие, выравнивания радиальной составляющей вектора скорости по высоте на входе в ротор.

2) Полученные результаты и построенные физико-математические модели могут быть использованы как для оптимизации режимно-геометрических параметров существующих воздушно-центробежных классификаторов, так и для создания принципиально новых аппаратов порошковых технологий.

3) Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении гранта РФФИ № 20-38-90135 «Физическое и математическое моделирование аэродинамики закрученного двухфазного турбулентного течения и процесса фракционного разделения порошков в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата»

4) Результаты проведенных численных расчетов получили свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ № 2019663302 («Аэродинамика вихревой камеры. Расчет закрученного турбулентного потока в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата») и № 2019663415 («Траектория частицы. Численный расчет траекторий движения одиночной твердой сферической частицы»).

5) По результатам работы проведенной в рамках Гранта РФФИ № 20-38-90135, разработанная методика расчета динамики закрученного турбулентного течения и процесса фракционного разделения твердых частиц в вихревой камере была внедрена и использована в учебном процессе в СТИ НИЯУ МИФИ при изучении учебных дисциплин «Математическое моделирование» и «Инженерные расчеты ядерных энергетических установок», а также при выполнении курсовых работ и написании выпускных квалификационных работ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1) Физико-математическая модель закрученного турбулентного течения для модифицированной вихревой камеры воздушно-центробежного классификатора, разработанного в Томском государственном университете.

2) Физико-математическая модель установившегося закрученного турбулентного течения для оригинальной предлагаемой геометрии вихревой камеры.

3) Результаты численного исследования аэродинамики закрученного турбулентного течения несущей среды для двух различных геометрий вихревой камеры воздушно-центробежного классификатора.

4) Результаты численных расчетов для траектории движения твердых сферических частиц для модифицированной вихревой камеры, разработанной в НИ ТГУ.

Апробация работы. Главные и показательные результаты были представлены на следующих конференциях: V Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2015» (г. Томск, 25-27 ноября 2015 г.), 54-ая международная научная студенческая конференция МНСК-2016 (г. Новосибирск, 16-20 апреля 2016 г.), VI Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017», посвященная 55-летию физико-технического факультета Томского государственного университета (г. Томск, 27-29 ноября 2017 г.), X всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященная 140-летию ТГУ и 50-летию НИИ ПММ ТГУ (г. Томск, 3-5 сентября 2018 г.), XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 27-30 апреля 2021 г.), VIII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» ФТИ-2021 (г. Екатеринбург, 17-21 мая 2021 г.), Отраслевая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения» (г. Северск, 13-16 декабря 2021 г.), Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 80-летию основания НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий» (г. Северск, 16–20 мая 2022 г.)

Публикации. Всего по теме диссертации было опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в журналах, включенных Перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Scopus), 1 статья в прочем научном журнале, 8 статей в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

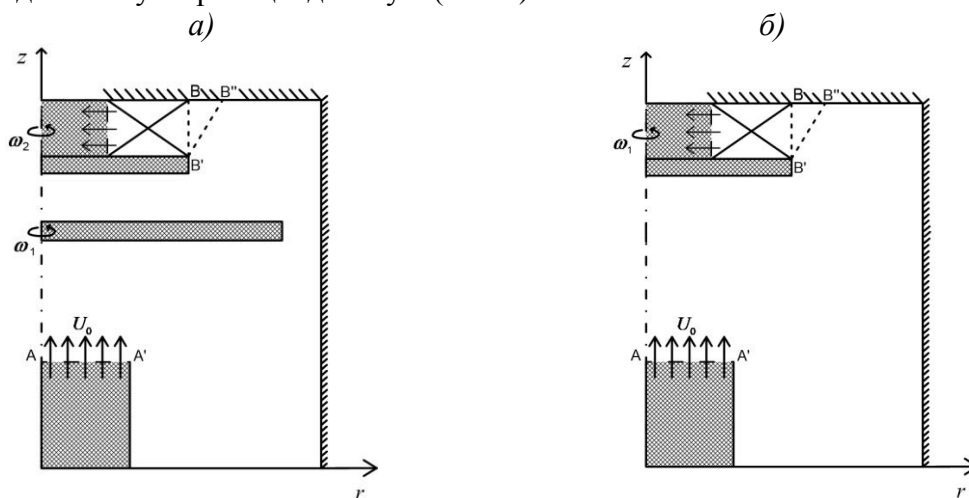
Во введении показана актуальность работы и проблемы численного моделирования аэродинамики и процесса классификации частиц в закрученных турбулентных потоках, обоснован выбор темы диссертационного исследования, сформулированы цели исследования и основные положения, которые автор защищает.

В первой главе проведен обзор научной литературы по исследованиям аэродинамики многофазных закрученных турбулентных потоков, научной литературы, в которой освещены вопросы сепарации и классификации частиц по размерам в центробежных аппаратах, а также обзор литературы по численным методам, применительно к задачам численного моделирования закрученных турбулентных потоков. Помимо этого, глава содержит обзор различных существующих подходов к моделированию движения частиц в поле скоростей, и выделены наиболее подходящие к тематике рассматриваемой задачи. Глава также кратко отражает развитие численного моделирования, и историю становления и развития различных центробежных классификаторов и аппаратов порошковой технологии.

Во второй главе приведены математическая и физическая постановки задачи закрученного турбулентного течения в сепарационной части вихревой камеры в цилиндрической системе координат, в силу особенностей геометрии. В рамках физической постановки задачи представлена модифицированная геометрия вихревой камеры, которая отличается от существующей геометрии формой лопаток ротора, а также приводится принципиально новая геометрия вихревой камеры, перспективная с точки зрения баланса центробежных и аэродинамических сил в центральной части вихревой камеры. Математическая часть постановки предложенных задач включает в себя моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения несущего газового потока на основе уравнений Рейнольдса, которые замыкаются на основе известной « $k-\omega$ » модели турбулентности Уилкокса [2]. Также, в данной главе приведены применяемые численные методы решения закрученных турбулентных течений.

Существует множество различных конструкций сепарационных камер, однако далеко не все из них позволяют получить высокое качество и однородность порошков заданного гранулометрического состава. Одними из самых важных критериев при выборе вихревой камеры являются эффективность процесса классификации, заключающаяся в остроте разделения и граничный размер разделения частиц, или размер частицы, вероятность которой попасть в мелкий или крупный продукт разделения составляет ровно 50%. Самой частой проблемой для повышения эффективности процесса классификации является попадание крупного продукта в мелкий, либо попадание мелкой фракции в крупную. Поэтому ключевой задачей является создание однородного баланса сил на частицу. В рассматриваемой работе предполагается, что на частицу действуют гравитационная, центробежная, аэродинамическая и инерционная силы. Так как частицы достаточно мелкие, то гравитационная и инерционная силы имеют меньшее влияния, нежели аэродинамическая и центробежная силы.

После исследования сепарационной камеры комбинированного пневматического аппарата, разработанного в НИИ ПММ ТГУ, была выявлена возможная причина пониженной эффективности вихревой камеры, заключающаяся в большом скоплении частиц в верхней части камеры, непосредственно перед входом в ротор. Одним из способов изменения аэродинамики вихревой камеры является изменение геометрических составляющих. В данном разделе диссертационного исследования предложена модификация формы лопаток ротора, которая позволяет создать дополнительный перепад давления и как следствие решить данную проблему. Ниже приведена схема вихревой камеры центробежного аппарата для которого рассматривается процесс классификации частиц, на схеме можно заметить изменения формы лопаток ротора с прямоугольной ($B-B'$) на предложенную трапецеидальную ($B''-B'$).



а – с центральным диском, б – без центрального диска
Рисунок 1 – Схема вихревой камеры

В существующих вихревых камерах воздушно-центробежных классификаторов скорость потока газа считается достаточно малой, в силу этого применяется допущение, что газ является несжимаемым. Поэтому, для описания процессов в рассматриваемой физической постановке применяется модель движения несжимаемой вязкой жидкости, основанной на уравнениях Рейнольдса и уравнениях Навье-Стокса. В силу особенностей геометрии вихревой камеры, задачу удобнее всего решать в цилиндрической системе координат. Уравнения Навье-Стокса в цилиндрической системе координат, с учетом осесимметричности рассматриваемой задачи, будут иметь вид:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\varphi^2}{r} = \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r^2}{r} \right\} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r};$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} \right\} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z};$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{u_r u_\varphi}{r} = \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r^2} \right\};$$

$$\frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(ru_z)}{\partial z} = 0.$$

Перепишем полученную систему уравнений в консервативном виде:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial(u_r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial z} + \frac{u_r^2 - u_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \nu \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \right] - \nu \frac{u_r}{r^2};$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} + \frac{u_z u_r}{r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \nu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z};$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u_\varphi u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{\partial z} + \frac{2u_r u_\varphi}{r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \nu \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\nu u_\varphi}{r^2};$$

$$\frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(ru_z)}{\partial z} = 0.$$

Далее будем следовать подходу Рейнольдса и перейдем к осреднению по времени уравнений Навье-Стокса. Давление и скорость в фиксированной точке турбулентного потока можно записать в виде суперпозиции осредненных и пульсационных величин:

$$p = p' + \bar{p}, \quad u_r = u_r' + \bar{u}_r, \quad u_z = u_z' + \bar{u}_z, \quad u_\varphi = u_\varphi' + \bar{u}_\varphi.$$

Здесь, p' , u_r' , u_z' , u_φ' - турбулентные пульсации для давления и компонент скорости, \bar{p} , \bar{u}_r , \bar{u}_z , \bar{u}_φ - осредненные по времени величины.

Теперь, подставив вместо мгновенных значений давления и компонент скорости сумму их осредненной величины и пульсационной составляющей, получим уравнения Рейнольдса. Пренебрегая знаком осреднения у осредненных величин, оставив его только у корреляций пульсационного движения, получим:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial(u_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial z} + \frac{u_r^2 - u_\phi^2}{r} = \\
& = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r v \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r v \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \right] - v \frac{u_r}{r^2} - \frac{\partial}{\partial r} (\overline{u_r'^2}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u_r' u_z'}) - \frac{\overline{u_r'^2} - \overline{u_\phi'^2}}{r}; \\
& \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} + \frac{u_z u_r}{r} = \\
& = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r v \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r v \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} (\overline{u_r' u_z'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u_z'^2}) - \frac{\overline{u_r' u_z'}}{r}; \\
& \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{\partial(u_\phi u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\phi u_z)}{\partial z} + \frac{2u_r u_\phi}{r} = \\
& = \frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u_\phi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} (\overline{u_r' u_\phi'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u_z' u_\phi'}) - \frac{2\overline{u_r' u_\phi'}}{r} - \frac{v u_\phi}{r^2}; \\
& \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r u_z)}{\partial z} = 0.
\end{aligned}$$

Замыкается данная система при использовании обобщенной гипотезы Буссинеска, согласно которой, Рейнольдсовы напряжения пропорциональны скорости деформации осредненного течения с точностью до постоянной, называемой коэффициентом турбулентной вязкости.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij},$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Распишем подобные соотношения для случая с цилиндрической системой координат:

$$\begin{aligned}
-\overline{u_r' u_z'} &= \nu_t \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \quad -\overline{u_r'^2} = 2\nu_t \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{2}{3} k, \quad -\overline{u_z'^2} = 2\nu_t \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} k, \\
-\overline{u_r' u_\phi'} &= \nu_t \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \right), \quad -\overline{u_z' u_\phi'} = \nu_t \frac{\partial u_\phi}{\partial z}, \quad -\overline{u_\phi'^2} = 2\nu_t \frac{u_r}{r} - \frac{2}{3} k.
\end{aligned}$$

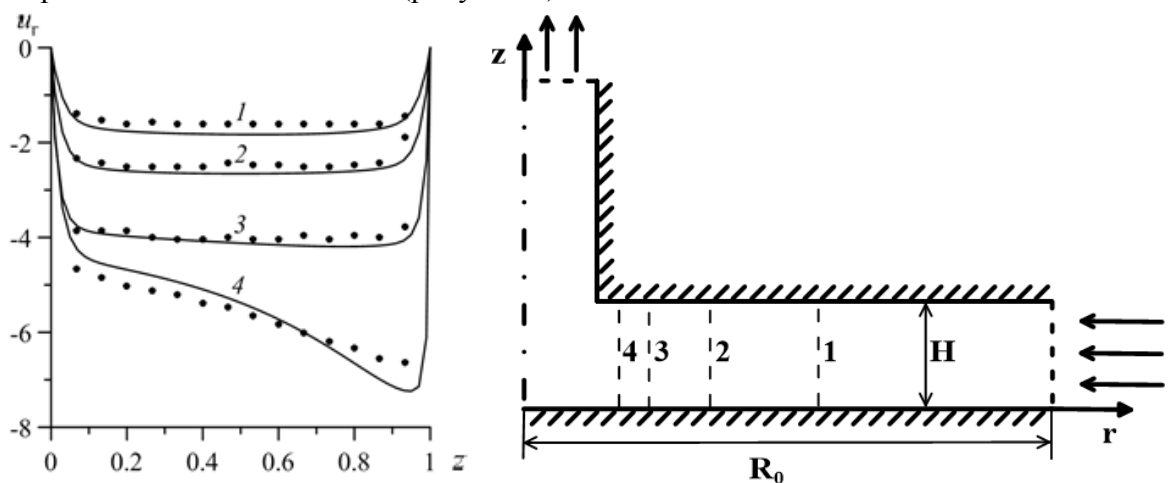
Подставим полученные соотношения в замкнутую систему уравнений Рейнольдса:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial(u_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial z} + \frac{u_r^2 - u_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r [v + \nu_t] \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(r [v + \nu_t] \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \right] - [v + \nu_t] \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial \nu_t}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial \nu_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial r};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} + \frac{u_z u_r}{r} = -\frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r[v+v_t] \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(r[v+v_t] \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial v_t}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z}; \\
& \frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u_\varphi u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{\partial z} + \frac{2u_r u_\varphi}{r} = \\
& = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r[v+v_t] \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r[v+v_t] \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} \right) \right] - \frac{u_\varphi}{r^2} [v+v_t] - \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial v_t}{\partial r}; \\
& \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(ru_z)}{\partial z} = 0.
\end{aligned}$$

Полученная система уравнений описывает закрученное турбулентное течения в цилиндрической системе координат для геометрии вихревой камеры, представленной на рисунке 1.

Третья глава отражает результаты численного исследования аэродинамики закрученного турбулентного течения для существующей геометрии вихревой камеры, модифицированной, а также для новой геометрии вихревой камеры. Для каждого варианта вихревой камеры, из перечисленных выше, продемонстрировано влияние различных режимных и геометрических параметров на распределение составляющих вектора скорости несущего потока и на параметры турбулентного течения. Помимо этого, в данной главе впервые проведено сравнение результатов исследования существующей установки, для оригинальной вихревой камеры и модифицированной, с измененной формой лопаток ротора. В данной главе также продемонстрированы результаты исследования достоверности полученных численных расчетов, которые представляют собой в первую очередь сравнение результатов численного решения задачи в переменных «вихрь – функция тока» и в переменных «скорость – давление» для ламинарной постановки задачи. Во-вторых, достоверность проведенного исследования подтверждается тестовыми исследованиями на сеточную сходимость и сравнение полученных результатов с аналитическим решением, а также с известными экспериментальными данными (рисунок 2).



Кривая 1 соответствует $R/R_0=0.6$; кривая 2 – $R/R_0=0.4$; кривая 3 – $R/R_0=0.275$; кривая 4 – $R/R_0=0.185$. Точками показаны экспериментальные данные [8].

Рисунок 2 – Сравнение численных расчетов с экспериментальными данными

Проведенные численные исследования являются уникальными и результаты впоследствии могут быть использованы как для проектирования принципиально новых аппаратов порошковых аппаратов, так и для оптимизации существующих установок. На рисунке 3 продемонстрировано как геометрические и режимные параметры влияют на распределение функции тока и картины течения. В частности, на рисунке слева видно, как поток поджимается в сепарационной зоне камеры и в целом присутствует несколько вихревых структур, что в данном случае негативно сказывается на аэродинамической картине течения. Подобное поведение безусловно препятствует более эффективной работе сепаратора. Рисунок справа ярко демонстрирует как путем простого изменения геометрии, можно добиться равномерного распределения изолиний функции тока при тех же режимных параметрах течения.

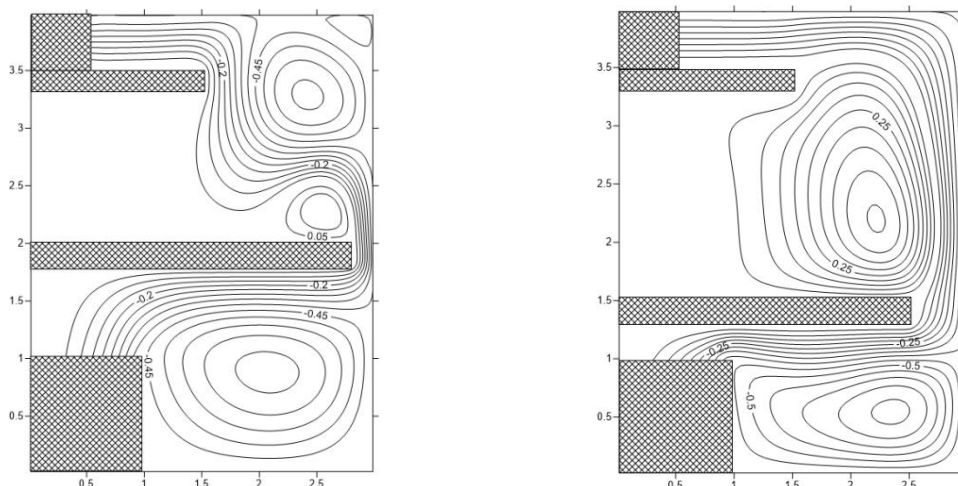


Рисунок 3 – Распределение функции тока.
 $Re=5000$, $\Omega_1=3$, $\Omega_2=5$ (слева) и $Re=5000$, $\Omega_1=3$, $\Omega_2=5$ (справа)

На рисунке 4 имеются ярко выраженные циркуляционные зоны. Однако если в первом случае, они существенным образом препятствуют равномерному распределению изолиний функции тока по высоте на входе в ротор, то во втором случае путем изменения величины закрутки удалось избавиться от неблагоприятных вихревых структур. Таким образом, можно сделать вывод, что путем изменения режимных параметров также есть возможность добиться более благоприятной картины течения с точки зрения аэродинамики.

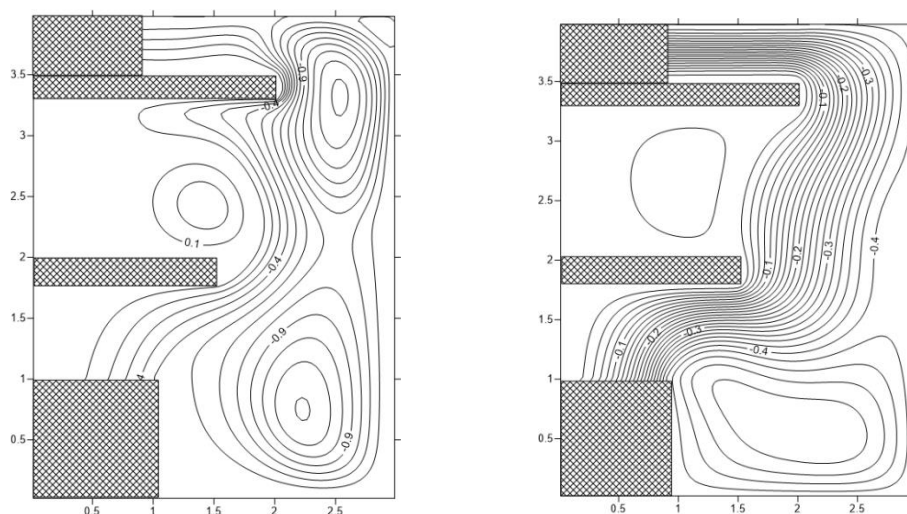


Рисунок 4 – Распределение функции тока.
 $Re=5000$, $\Omega_1=7$, $\Omega_2=3$ (слева) и $Re=5000$, $\Omega_1=3$, $\Omega_2=3$ (справа)

На рисунке 5 представлены изолинии турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентности при трапецидальной форме ротора с углом наклона границы 70 градусов. Стоит отметить наличие высокой кинетической энергии турбулентности в верхней части ротора, непосредственно на участке соприкосновения удлиненной формы лопаток ротора с верхней стенкой вихревой камеры.

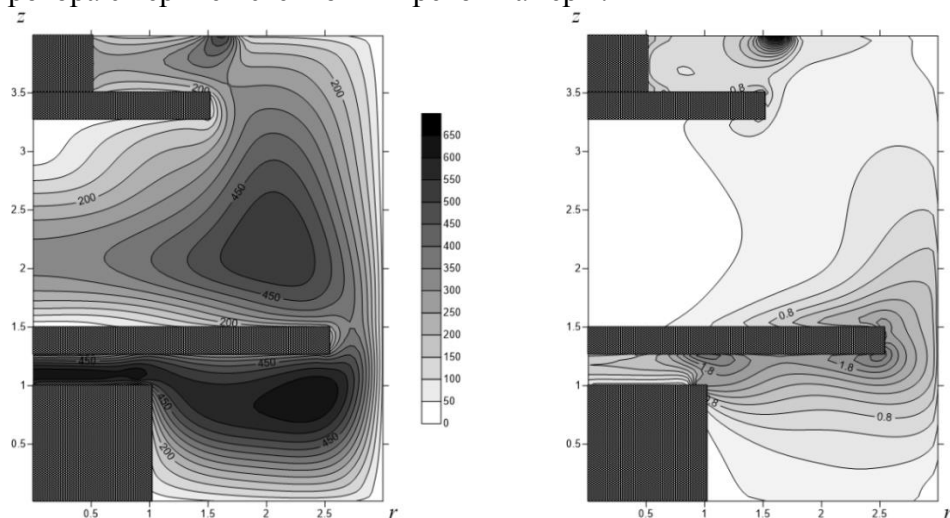


Рисунок 5 – Распределение изолиний турбулентной вязкости (слева) и распределение изолиний кинетической энергии турбулентности (справа) при параметрах течения $Re=4000$, $\Omega_1=3$, $\Omega_2=3$

На рисунке 6 продемонстрировано влияние числа Рейнольдса на профиль радиальной составляющей скорости на входе в сепарационную зону. Отметим, что при трапецидальной форме ротора (рисунок справа) увеличение числа Рейнольдса оказывает не такое сильное влияние, как при прямоугольной форме (рисунок слева). Следовательно, трапецидальная форма ротора менее чувствительна к изменению числа Рейнольдса, что свидетельствует о перспективности изменения формы ротора для аэродинамики вихревой камеры.

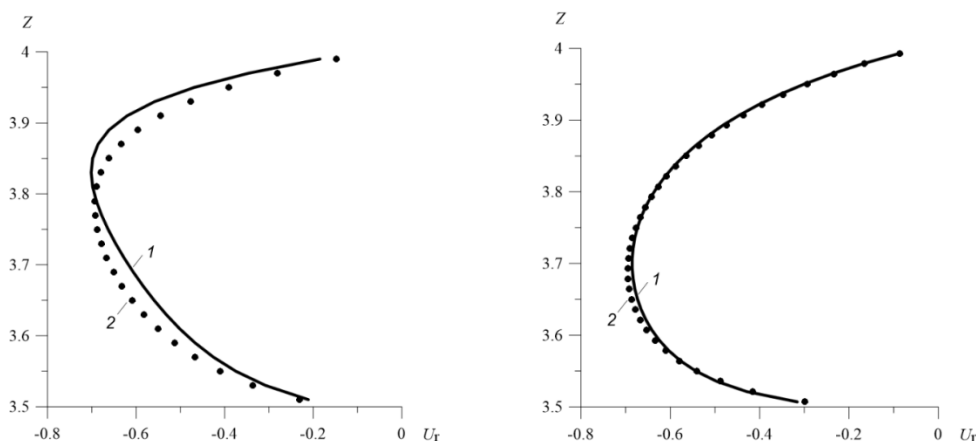


Рисунок 6 – Влияние числа Рейнольдса на профиль скорости u_r в сечении B-B': 1 – $Re = 5000$; 2 – $Re = 10000$ для прямоугольной формы ротора (слева) и для трапецидальной формы ротора (справа)

На рисунке 7 изображено распределение линий тока и изолинии окружной компоненты скорости для случая [7]. Из анализа этих графиков можно отметить, что наличие модернизированной геометрии зоны сепарации позволило получить достаточно однородные поля вектора скорости в центральной области рассматриваемого центробежного классификатора. Существенное увеличение окружной скорости в

непосредственной близости от левой перегородки объясняется сохранением импульса в окружном направлении и обеспечивает невозможность проникновения крупных частиц в область выхода мелкого продукта.

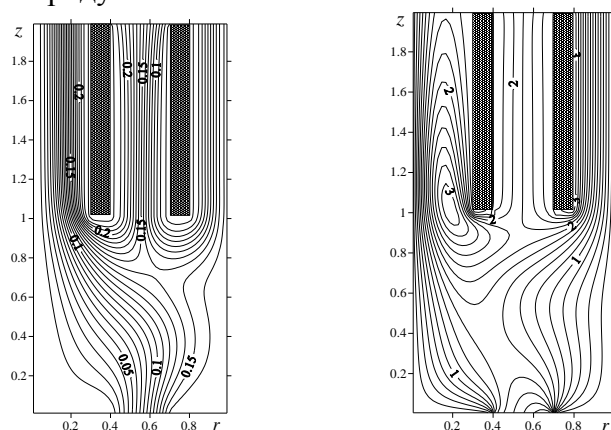


Рисунок 7 – Картина изменений линий тока (слева) и изолиний окружной скорости (справа) в оригинальной геометрии сепарационной зоны при параметрах течения $Re=20$; $R\omega_0=4$; $R\omega_1=4$; $R\omega_d=4$, $\gamma=1$

На рисунке 8 ниже представлены изолинии функции тока, где можно заметить, что при увеличении величины закрутки в 2 раза существенно уменьшается вихревая структура вблизи правой границы, что говорит о перспективности увеличенной закрутки для аэродинамики газа в данной геометрической области.

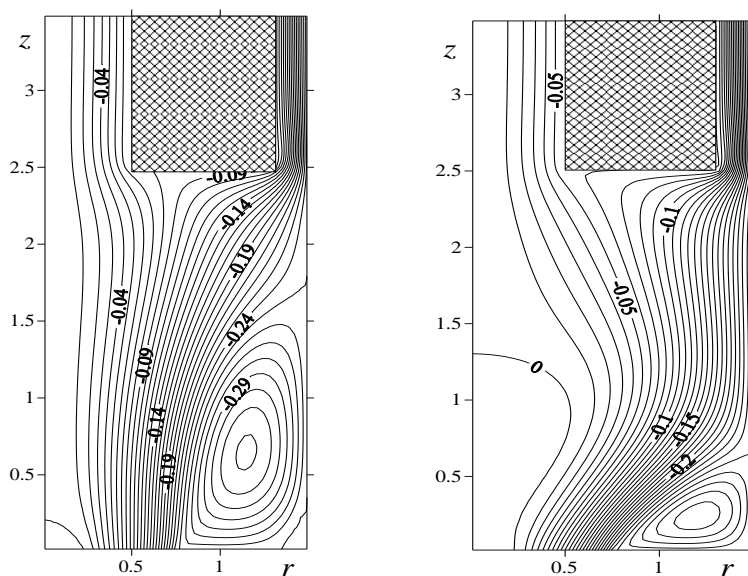


Рисунок 8 – Закрутка 1 (слева) и 2 (справа). Изолинии функции тока

Рисунок 9 изображает распределения изолиний турбулентной вязкости, где тоже заметно увеличение вязкости по всей области при увеличении закрутки в 2 раза.

Схожую тенденцию можно наблюдать и на рисунке 10 ниже, где приведены изолинии кинетической энергии турбулентности. Однако здесь влияние увеличения закрутки в два раза уже не столь заметное, так как максимальное значение абсолютной величины кинетической энергии турбулентности изменилось лишь на немного. Однако картина поменялась существенно, например, при увеличении закрутки область у входа, в непосредственной близости от оси симметрии имеет уже не столь большие значения, в этом случае они более размазаны к центральной части аппарата.

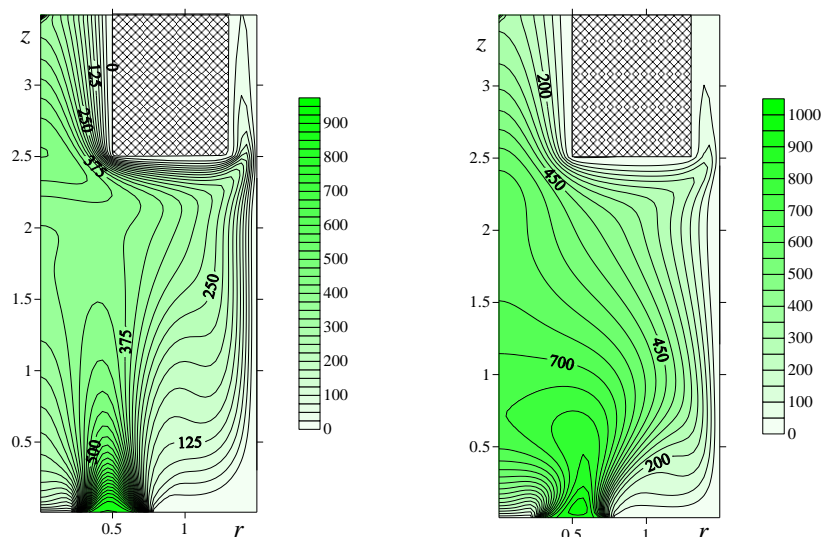


Рисунок 9 – Закрутка 1 (слева) и 2 (справа). Турбулентная вязкость

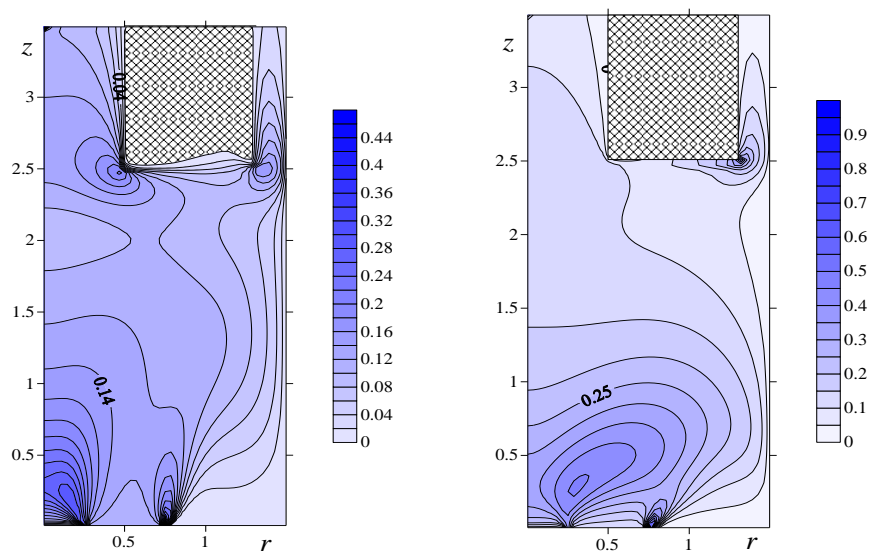


Рисунок 10 – Закрутка 1 (слева) и 2 (справа). Кинетическая энергия турбулентности

Четвертая глава содержит новые полученные результаты численного моделирования движения твердых сферических частиц для оригинальной вихревой камеры и для модифицированной, путем изменения формы лопаток ротора. Приведено влияние режимных и геометрических параметров на остроту классификации частиц и на их граничный размер. Представлены результаты влияния турбулентных пульсаций на траектории движения твердых сферических частиц. Впервые проведено сравнение численных результатов процесса классификации частиц для прямоугольного и трапецеидального ротора, в вихревой камере рассматриваемого аппарата. Предложенные изменения формы лопаток ротора показали перспективность в плане повышения эффективности процесса классификации для вихревой камеры комбинированного пневматического аппарата. Как показывают экспериментальные данные и численные исследования высокую остроту фракционного разделения частиц по размерам можно получить только при очень малой концентрации частиц. Очевидно, что в этом случае можно пренебречь обратным влиянием частиц на несущую среду и взаимодействием частиц между собой. Поэтому целесообразно для расчета движения частиц использовать траекторный подход [3]. В рамках дискретно-траекторного подхода, используемого в данной работе, уравнения для описания траекторий движения частиц выглядят следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{W}. \quad (4.1)$$

$$m \frac{d\mathbf{W}}{dt} = \mathbf{F}. \quad (4.2)$$

Здесь \mathbf{r} – радиус-вектор, m – масса твердой частицы, \mathbf{W} – вектор скорости и \mathbf{F} – вектор сил, действующих на твердую частицу.

Уравнения (4.1) – (4.2) выполняются вдоль траектории фиксированной частицы. После задания месторасположения и вектора скорости частицы на входе в вихревую камеру в начальный момент времени и выполнив при этом интегрирование уравнений, можно вычислить траекторию движения фиксированной частицы и рассчитать, в каком продукте разделения она окажется. Учитывая, что на твердые сферические частицы существенное влияние оказывают только аэродинамические, гравитационные, центробежные и инерционные силы, в безразмерном виде и в цилиндрической системе координат, уравнения будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{dw_r}{d\tau} = \frac{w_\varphi^2}{r} + \frac{u_r - w_r}{Stk} \zeta; \quad (4.3)$$

$$\frac{dw_z}{d\tau} = \frac{u_z - w_z}{Stk} \zeta - \frac{1}{Fr}; \quad (4.4)$$

$$\frac{dw_\varphi}{d\tau} = \frac{u_\varphi - w_\varphi}{Stk} \zeta - \frac{w_\varphi w_r}{r}; \quad (4.5)$$

$$d\tau = \frac{dr}{w_r} = \frac{dz}{w_z} = \frac{r d\varphi}{w_\varphi}. \quad (4.6)$$

Здесь Stk , Fr – безразмерные критерии Стокса (4.10) и Фруда (4.9) соответственно, ζ – учитывает отклонение коэффициента аэродинамического сопротивления частицы от его значения (4.7), полученного из закона Стокса.

$$\zeta = 1 + \frac{1}{6} Re_p^{\frac{2}{3}}; \quad (4.7)$$

$$Re_p = \frac{\delta |\mathbf{U} - \mathbf{W}|}{\nu}; \quad (4.8)$$

$$Fr = \frac{U_0^2}{gR_0}; \quad (4.9)$$

$$Stk = \frac{\rho_p}{\rho} \frac{\delta^2 U_0}{18\nu R_0}, \quad (4.10)$$

где δ – диаметр частицы, g – ускорение свободного падения, ρ_p – плотность частицы, ρ – плотность несущего потока, Re_p – критерий Рейнольдса для частицы (4.8), U_0 – масштаб скорости, среднерасходное значение скорости несущего потока, R_0 – масштаб длины, радиус входного сечения.

$$w_r^* = \frac{w_r}{U_0}; \quad w_z^* = \frac{w_z}{U_0}; \quad w_\phi^* = \frac{w_\phi}{U_0}; \quad \tau = \frac{tU_0}{R_0}. \quad (4.11)$$

Здесь (4.11), безразмерные переменные обозначены индексом «*», которые для простоты записи в дальнейшем опущены.

После интегрирования системы уравнений (4.3) – (4.5) вычисляются компоненты вектора скорости частицы. Далее, с учетом уравнения (4.6), рассчитывается траектория движения твердой частицы. На основе траектории можно определить, в какой продукт разделения попадет рассматриваемая частица. Подобные вычисления повторяются для каждой фракции частиц и с каждой точки старта, по итогам которых, вычисляется процесс фракционного разделения порошка по заданным размерам. Также, на их основе вычисляется кривая разделения Тромпа, характеризующая вероятность попадания частиц заданного диаметра в мелкий продукт разделения. На основе полученной кривой распределения Тромпа проводится оценка производительности процесса фракционного разделения частиц по размерам для данного аппарата при данных режимных и геометрических параметрах.

Описанный метод расчета процесса классификации частиц имеет исключительно детерминированный характер. Откуда следует, что частицы одного и того же размера, при прочих равных условиях будут иметь одну и ту же траекторию движения. Для вычисления траектории движения частицы, необходимо предварительно определить компоненты скорости несущего потока в точке расположения частицы в данный конкретный момент времени. Поэтому необходимо определить принадлежность частицы конкретному контрольному объему, и только потом разложить компоненты вектора скорости в полином и вычислить величину компоненты вектора скорости в точке нахождения частицы.

Согласно экспериментальным данным, в численных расчетах эффективность процессов фракционного разделения частиц выше, чем в реальных устройствах. Это объясняется тем, что многие факторы, влияющие на эффективность разделения частиц, не принимаются во внимание при численных расчетах. Одним из самых важных факторов для мелкодисперсных частиц при малых концентрациях твердой фазы, который влияет на эффективность аппаратов центробежного типа – это пульсационное движение несущей среды. При учете данного фактора, эффективность процесса центробежной классификации и сепарации частиц по заданным размерам заметно снижается.

В работе [6], при расчете влияния турбулентных пульсаций на траектории движения частиц использовался следующий подход. Пульсационные величины скоростей следуют вероятностному закону Гаусса. В качестве дисперсии выступает кинетическая энергия турбулентности k , тогда, вероятностный закон Гаусса будет выглядеть следующим образом:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \exp\left(-\frac{(u' - u'_m)^2}{2k}\right). \quad (4.12)$$

Здесь (4.12), f - плотность вероятности, u'_m - математическое ожидание. Прологарифмировав закон Гаусса, получим значение пульсационной скорости в виде:

$$u' = \pm \sqrt{-2k \ln(f \sqrt{2\pi k})}. \quad (4.13)$$

Так как плотность вероятности лежит в интервале $0 < f < 1/\sqrt{2\pi k}$, воспользуемся генератором случайных чисел, который определяет случайное число N в диапазоне $0 < N < 1$, и определим случайную величину пульсационной скорости (4.13):

$$u' = \pm \sqrt{-2k \ln N}. \quad (4.14)$$

Учитывая полуэмпирический характер последнего выражения, вводим константу γ , которая определяется на основе экспериментальных данных [3]. В таком случае из (4.14) получаем (4.15)

$$u' = \pm \gamma \sqrt{-2k \ln N}. \quad (4.15)$$

Знак направления пульсационной скорости также учитывается на основе определения случайного направления соответствующей составляющей вектора скорости. Рисунок 11 демонстрирует частный случай закрученного турбулентного течения двухфазной среды, из которого следует, что крупная фракция частиц попадает на периферию и падает вниз для повторного измельчения. Однако мелкая фракция частиц беспрепятственно попадает в ротор, расположенный в верхней части вихревой камеры. В данных примерах рассматривалась геометрия без центрального дискового элемента и при его наличии.

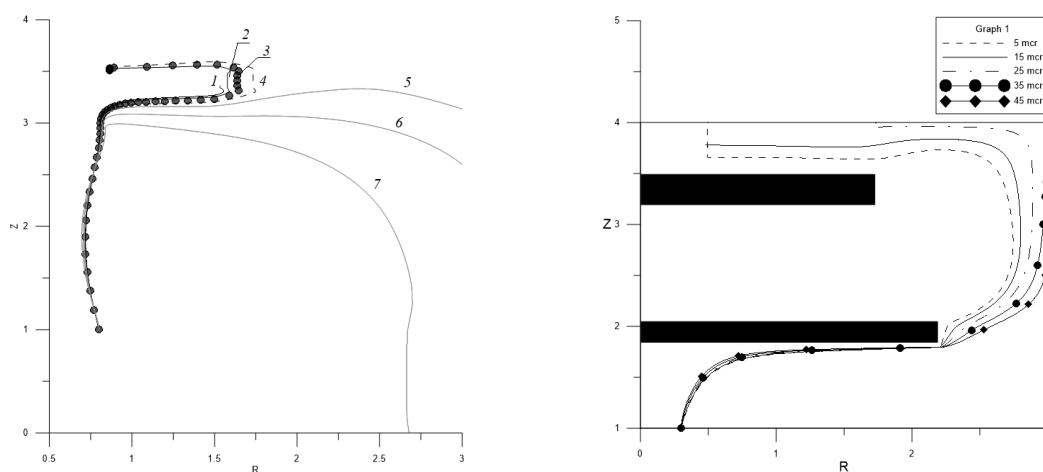


Рисунок 11 – Распределение траекторий движения частиц различного размера при $Re = 5000$. Здесь, 1–10 мк, 2–15 мк, 3–20 мк, 4–25 мк, 5–30 мк, 6–40 мк, 7–50 мк. Слева геометрия без центрального диска, а справа при наличии центрального диска.

На рисунке 12 (слева) продемонстрированы траектории частиц для размеров 5 и 50 микрон без учета турбулентных пульсаций. Как видим, легкие частицы попадают на выход, расположенный вблизи оси, а тяжелые частицы, за счет преобладания центробежных сил попадают на периферию. На рисунке 12 (справа) показано влияние точек запуска на траектории движения частиц с учетом пульсационного движения и без него. Получившиеся результаты, не противоречат физическим принципам, частицы, запущенные из точки, ближе к левому выходу, попадают в мелкую фракцию частиц, в то время как частицы запущенные ближе к периферии, улетают на периферию. На данном рисунке также видны отклонения от траектории при учете турбулентных пульсаций.

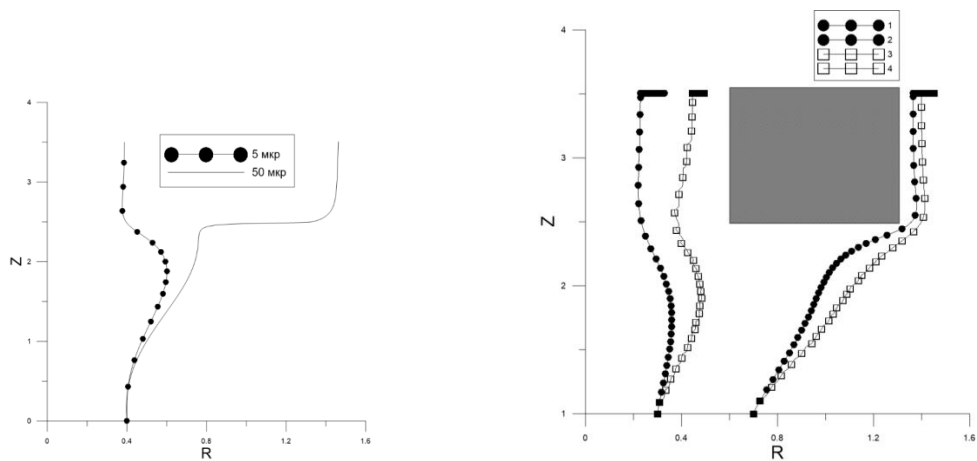


Рисунок 12 – Траектории частиц без учета турбулентных пульсаций с размерами 5 и 50 микрон, запущенных с одной точки входа (слева). Траектории движения частиц, размером 10 мкм, запущенные из разных точек, с различной величиной γ . Здесь, 1,2 - $\gamma=0$; 3,4 - $\gamma=5$ (справа)

Рисунок 13 демонстрируют влияние турбулентных пульсаций на изменение траекторий движения частиц для размеров 5 и 50 микрон соответственно. Из графиков видно, что траектории частиц теперь различаются, даже несмотря на одну и ту же точку запуска, более того, одна из частиц размером 50 микрон попала в мелкую фракцию частиц.

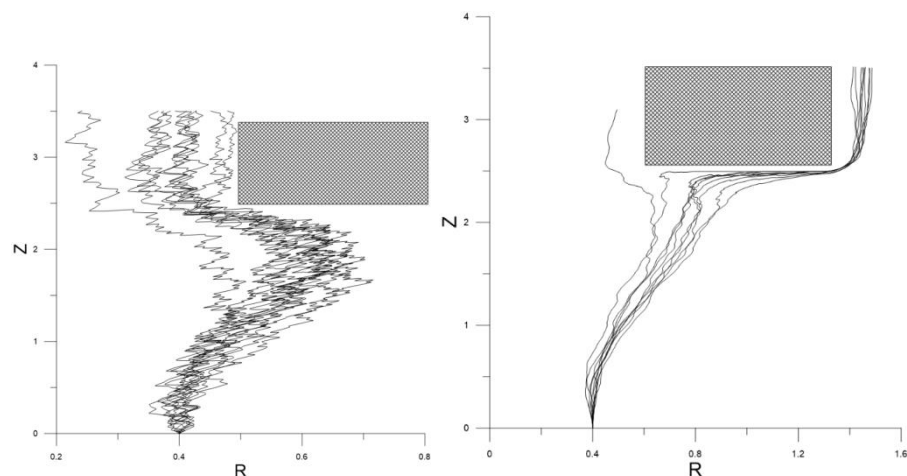


Рисунок 13 – Траектории частиц размером 5 микрон (слева) и 50 микрон (справа) с учетом турбулентных пульсаций, запущенных с одной точки входа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие **выводы**:

1. Разработана физико-математическая модель установившегося закрученного турбулентного течения в модифицированной вихревой камере комбинированного пневматического аппарата. Данная модель послужила основой для получения оригинальных результатов аэродинамики в рассматриваемой геометрической конфигурации.

2. Впервые проведено численное исследование двухфазного закрученного турбулентного течения в новой модифицированной вихревой камере комбинированного пневматического аппарата, с учетом влияния турбулентных пульсаций несущего потока на распределение траекторий твердых сферических частиц. По результатам распределения траекторий частиц, были рассчитаны кривые разделения Тромпа, для оценки эффективности процесса классификации частиц по заданному размеру. Предложенная модификация формы лопаток ротора позволяет создать дополнительный перепад давления, что способствует более равномерному распределению частиц по высоте на входе в сепарационную зону.

3. Достоверность разработанных физико-математических моделей и проведенных численных исследований подтверждается сравнением численных результатов с известными экспериментальными данными, проведением тестовых исследований и сравнением различных способов решения.

4. Новые полученные результаты численных расчетов, могут способствовать повышению эффективности существующих установок воздушно центробежных классификаторов, и созданию принципиально новых устройств порошковой технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 740305 СССР. МКИ В 07 В 7/083. Центробежный классификатор / В. А. Шваб, А. Т. Росляк, П. Н. Зятиков, Ю. А. Бирюков, В. К. Никульчиков, Л. Н. Лаврентьев: заявл. 17.10.78; опубл. 15.06.80. Бюл. № 22, Патент РФ № 2407601, МПК В07В7/083, Способ воздушно-центробежной классификации порошков и устройство для его осуществления / П. Н. Зятиков, А. Т. Росляк, И. М. Васенин, А. В. Шваб, А. А. Демиденко, Ш. Р. Садретдинов //опубл., Б.И. №36, 27.12.2010.

2. Методы расчета турбулентных течений: Пер. с англ. / Под ред. В. Кольмана. – М.: Мир, 1984. -464 с.

3. Волков К.Н. Течения газа с частицами / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 600 с.

4. Hwang C. B. Improved low-Reynolds-number k-ε model based on direct numerical simulation data / C. B. Hwang, C. A. Lin // AIAA Journal. – 1998. –Vol.36. – P. 38-43.

5. Гореликова А. Е. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование / А. Е. Гореликова, О. Н. Кашинский, М. А. Пахомов, В. В. Рандин, В. И. Терехов, А. В. Чинак // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. - 2017. - № 1. - С. 117–129. - DOI: 10.7868/S0568528117010066.

6. Мостафа А. А. Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование / А. А. Мостафа, Х. Ц. Монджиа, В. Г. Макдонелл, Г. С. Самуэлсен // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 3. – С. 65-81.

7. Судаков В. Г. О применимости моделей турбулентности для задач с сильной закруткой потока // Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института. – 2003. – Т. XXXIV, № 1-2. – С. 76-83.

8. Wilcox D.C. Reassessment of the scale – determining equation for advanced turbulence models // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1988. – Vol. 26, № 11. – P. 1299-1310.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1*. **Турубаев Р. Р.** Численное исследование аэродинамики закрученного потока в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 47. – С. 87–98. – DOI: 10.17223/19988621/47/9. – 0.47 / 0.23 а.л.

2*. Шваб А. В. Моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения в центробежном аппарате / А. В. Шваб, **Р. Р. Турубаев** // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53, № 2. – С. 196–204. – DOI: 10.1134/S0040357119010135. – 0.39 / 0.19 а.л.

в переводной версии журнала, индексируемой Scopus:

Shvab A. V. Simulation of Swirling Turbulent Flow Aerodynamics in a Centrifugal Machine / A. V. Shvab, **R. R. Turubaev** // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. – 2019. – Vol. 53, № 2. – P. 242–250. – DOI: 10.1134/S0040579519010135.

3*. **Турубаев Р. Р.** Численное исследование аэродинамики закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере центробежного аппарата / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – № 65. – С. 137–147. – DOI: 10.17223/19988621/65/11. – 0.52 / 0.26 а.л.

4*. **Турубаев Р. Р.** Моделирование аэродинамики газа и траектории движения частиц при взаимодействии двух встречных закрученных потоков / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 75. – С. 138–149. – DOI: 10.17223/19988621/75/12. – 0.49 / 0.24 а.л.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

5*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663302. Аэродинамика вихревой камеры. Расчет закрученного турбулентного потока в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата / **Турубаев Р. Р.**, Шваб А. В., Евсеев Н. С.; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2019662207; дата поступления – 08.10.2019; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 15.10.2019.

6*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663415. Траектория частицы. Численный расчет траекторий движения одиночной твердой сферической частицы / **Турубаев Р. Р.**, Шваб А. В., Евсеев Н. С.; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2019662259; дата поступления – 08.10.2019; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 16.10.2019.

Публикации в прочих научных изданиях:

7*. **Турубаев Р. Р.** Моделирование аэродинамики закрученного течения в пневматическом центробежном сепараторе / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы V Международной молодежной научной конференции. Томск, 25–27 ноября 2015 г. – Томск, 2015. – С. 115–116. – 0.09 / 0.04 а.л.

8*. **Турубаев Р. Р.** Моделирование аэродинамики натекания струи на твердую поверхность / Р. Р. Турубаев // Материалы 54-й международной научной студенческой конференции «МНСК-2016». Новосибирск, 16–20 апреля 2016 г. – Новосибирск, 2016. – С. 62. – 0.02 / 0.01 а.л.

9*. **Турубаев Р. Р.** Исследование аэродинамики закрученного турбулентного течения в вихревой камере / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Актуальные проблемы

современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017 : материалы VI Международной молодежной научной конференции. Томск, 27–29 ноября 2017 г. – Томск, 2018. – С. 332–334. – 0.07 / 0.03 а.л.

10*. **Тулубаев Р. Р.** Моделирование процесса классификации частиц в вихревой камере / Р. Р. Тулубаев, А. В. Шваб // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2018) : сборник трудов X всероссийской конференции, посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию НИИ ПММ ТГУ. Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 162–165. – 0.24 / 0.12 а.л.

11*. Шваб А. В. Моделирование аэродинамики газа при взаимодействии двух встречных закрученных течений / А. В. Шваб, Д. А. Левченко, **Р. Р. Тулубаев** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 12-2 (732). – С. 134–139. – 0.27 / 0.09 а.л.

12*. **Тулубаев Р. Р.** Численное исследование аэродинамики газа при взаимодействии двух закрученных встречных потоков / Р. Р. Тулубаев, А. В. Шваб // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 27–30 апреля 2021 г. – Томск, 2021. – Т. 1 : Физика. – С. 349–351. – 0.12 / 0.06 а.л.

13*. **Тулубаев Р. Р.** Численное моделирование аэродинамики струйного закрученного турбулентного течения в вихревой камере / Р. Р. Тулубаев, А. В. Шваб // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения : материалы отраслевой научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Северск, 13–16 декабря 2021 г. – Северск, 2021. – С. 79. – 0.05 / 0.02 а.л.

14*. **Тулубаев Р. Р.** Численное исследование процесса фракционного разделения порошков в вихревой камере / Р. Р. Тулубаев, А. В. Шваб // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021 : тезисы докладов VIII Международной молодежной научной конференции. Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г. – Екатеринбург, 2021. – С. 692–694. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 0.1 / 0.05 а.л.

15*. **Тулубаев Р. Р.** Численное исследование аэродинамики струйного закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере / Р. Р. Тулубаев, А. В. Шваб // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию основания НИЯУ МИФИ. Северск, 16–20 мая 2022 г. – Северск, 2022. – С. 86. – 0.05 / 0.02 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7471 от «20» декабря 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru